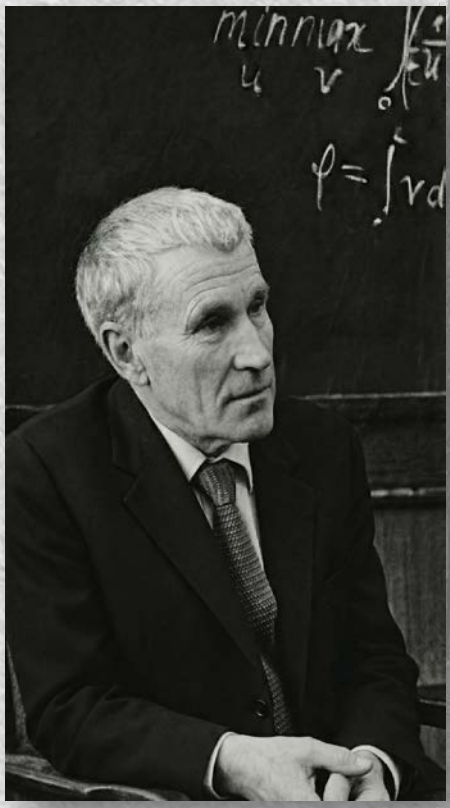


К 100-летию со дня рождения
А.А. Поздеева

МЕХАНИКА В НОВЫХ МАТЕРИАЛАХ, КОНСТРУКЦИЯХ, ТЕХНОЛОГИЯХ

Тезисы докладов

25-27 марта 2026 г., Пермь

Институт механики сплошных сред УрО РАН – филиал
Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

Российский национальный комитет по теоретической и
прикладной механике

Секция механики Отделения энергетики, машиностроения,
механики и процессов управления РАН

Уральское отделение РАН

Всероссийская конференция

МЕХАНИКА В НОВЫХ МАТЕРИАЛАХ, КОНСТРУКЦИЯХ, ТЕХНОЛОГИЯХ

посвященная
100-летию со дня рождения
члена-корреспондента АН СССР
Александра Александровича Поздеева

25-27 марта 2026 г.

Тезисы докладов

г. Пермь, 2026

УДК [539.3+532.5]

Механика в новых материалах, конструкциях, технологиях. Пермь, 25 – 27 марта 2026г. Тезисы докладов. – Пермь: ПФИЦ УрО РАН, 2026г. – 204.с.
ISBN 978-5-6053637-9-8

Сборник содержит тезисы докладов на Всероссийской конференции «Механика в новых материалах, конструкциях, технологиях», посвященной 100-летию со дня рождения члена-корреспондента АН СССР Поздеева Александра Александровича - основателя Института механики сплошных сред УрО РАН и его первого директора.

Сборник отражает тематику конференции и содержит результаты исследований по актуальным проблемам пластичности, вязкоупругости, вычислительной механики сплошных сред, механики функциональных материалов и механики композиционных и структурно-неоднородных материалов, конвекции, гидродинамической устойчивости и турбулентности, гидродинамики неньютоновских жидкостей и жидкостей с особыми свойствами, фундаментальной и прикладной магнитной гидродинамики, механики сплошных сред в биологии и медицине, горной механики, мониторингу природных и техногенных систем, механики технологических процессов.

Материалы, представленные в сборнике, могут быть полезны научным работникам, а также студентам и аспирантам, специализирующимся в области механики сплошных сред.

Издается в авторской редакции.

ISBN 978-5-6053637-9-8

Издается по решению Ученого совета «Института механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук» - филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук

Ответственный за выпуск: Н.А. Юрлова

Партнер конференции

«ООО «Специальные Системы. Фотоника»

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

СОДЕРЖАНИЕ

Стр.

ТЕЗИСЫ ПЛЕНАРНЫХ ДОКЛАДОВ ……..…..…….. 13

Беляев А.К. Статика и динамика гибких стержней. Задача Лаврентьева-Ишлинского ……... 15

Горячева И.Г., Яковенко А.А. Моделирования изнашивания преднапряженных деформируемых тел в условиях фрикционного взаимодействия……. 16

Ерманюк Е.В., Карра Ж.-Б., Гаврилов Н.В., Черданцев А.В., Шмакова Н.Д. Начальный этап соударения твердого тела с поверхностью раздела газ-жидкость .. 17

Зубарев Н.М. Нелинейные стадии неустойчивости свободной поверхности жидкости в электрическом поле …….. 18

Иванова А.А., Козлов В.Г. Некоторые вопросы вибрационной механики многофазных систем ……...…… 19

Иноземцев А.А. Основные программы новых авиационных двигателей. Решения задач прочности в ТРДД ПД-35 …….. 20

Краус Е.И. Численное моделирование высокоскоростного взаимодействия гетерогенных материалов ……. 21

Любимова Т.П. Динамика многофазных сред в вибрационных полях ……... 22

Майер А.Е. Применение методов машинного обучения при разработке моделей механического поведения материалов …… 23

Наймарк О.Б. Нелинейная динамика дефектов при деформировании и разрушении материалов ……..……... 24

Полянский В.А., Беляев А.К., Нечаева А.В., Яковлев Ю.А., Фролова К.П. Общий механизм изменения напряженно-деформированного состояния металлов при водородной хрупкости и при пластической деформации .. 25

Прууэл Э.Р. Возможности станции 1-3 «Быстропротекающие процессы» ЦКП «СКИФ» для задач механики ……... 26

Столбов О.В., Райхер Ю.Л. Магнитоэлектрический эффект в композитах "пьезополимер / дисперсный ферромагнетик": результаты математического моделирования …….. 27

Сыпало К.И., Чернышев С.Л., Ковалев И.Е., Дубовиков Е.А., Шаныгин А.Н. Развитие композитных про-бионических конструкций …… 28

Трусов П.В. Конститутивные многоуровневые физически-ориентированные модели: преимущества, проблемы, области применения ……. 29

Фрик П.Г. Динамические модели космических МГД систем …….. 30

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ ……..……. 31

Агеева М.В., Голдобин Д. С. Континуальное описание коллективной динамики сетей нейронов с разреженной системой связей ……...…… 33

Адамов А.А. О методических проблемах идентификации и верификации уравнений состояния МДТТ …… 34

Алабужев А.А. Влияние неоднородности поверхности подложки на продольные 35

колебания капли в ограниченном объеме ……..

Аптуков В.Н. Изгиб круглой микро-пластины …….. 36

Бабешко В.А., Евдокимова О.В., Бабешко О.М., Телятников И.С., Евдокимов В.С., Плужник А.В., Лозовой В.В. О влиянии нестационарных воздействий на поведение анизотропных композитов с трещинами ……. 37

Балдин М.Н., Кондратьев Н.С., Безверхий Д.С. Применение модели возврата к описанию механизмов образования зародышей рекристаллизации в сплаве INCONEL 718 …… 38

Банников М.В., Уваров С.В., Никитюк А.С., Соколов А.М., Аристова А.В. Разработка методики неразрушающего контроля изделий из композитных материалов и определение стадийности поврежденности методами акустической эмиссии и рентгеновской томографии …… 39

Басанов Е.А, Келлер И.Э Расчет циклической долговечности элементов подвески авиационного двигателя для нагрузок типового полетного цикла …….. 40

Бахматов С.М. Оценка распределения поля остаточных напряжений в металлах в процессе лазерной ударной проковки ……. 41

Безверхий Д.С., Балдин М.Н., Кондратьев Н.С., Шарифуллина Э.Р., Гошкодер А.А. Многоуровневое моделирование рекристаллизации для описания поведения алюминиево-магниевых сплавов при горячем деформировании ……. 42

Беляева А.В., Сухановский А.Н., Легенький Н.М. Особенности распределения диоксида углерода в условиях городской среды ……... 43

Беляева А.В., Сухановский А. Н., Попова Е. Н., Легенький Н. М. Лабораторное моделирование конвективной циркуляции в условиях городской застройки …… 44

Беспалов М.В., Зайцев А.В. Ощепкова М.Ю. Экспериментально-технологическая оптимизация эластичного подвижного соединения из композитов на основе полимерных матриц …….. 45

Богданова А.П., Каменских А.А., Носов Ю.О. Термомеханика термопластичных полимерных антифрикционных материалов …….. 46

Бондаренко А.А., Колесниченко И.В. Возникновение вихревых структур в Т-образной ячейке под действием противоположно направленных вращающихся магнитных полей ……... 47

Ботин А.В., Лебедева Е.А., Иванова Е.В., Пантелеев И.А., Астафьева С.А. Прогнозирование ориентации короткого углеродного волокна в слабонаполненных АБС-пластиках при литье под давлением ……. 48

Бохоева Л.А., Рогов В.Е., Чермошенцева А.С. Разработка сверхпрочных пластин из модифицированных многослойных композиционных материалов для многократного удержания высокоскоростного удара ……... 49

Васильев А.Ю., Степанов Р.А., Сухановский А.Н., Фрик П.Г. Реориентации крупномасштабной циркуляции в конвективной турбулентности …….. 51

Вассерман И.Н. Моделирование свободных колебаний двунаправленных функционально градиентных балок методом конечных элементов …… 52

Вережак М.В., Бартоломей М.Л., Вшивков А.Н., Гачегова Е.А., Плехов О.А. Оптимизация параметров лазерной ударной обработки титанового сплава ВТ6 с использованием моделей глубокого обучения …….. 53

Вильдеман В.Э. Теория закритического деформирования и механика разрушения 54

Вичужанин Д.И. Новая модель предельной пластичности металлических материалов ……. 55

Володин И.В., Алабужев А.А. Моделирование динамики межфазной границы при вертикальных вибрациях методом решеточных уравнений Больцмана ……. 56

Вшивкова А.А., Швейкин А.И., Романов К.А. Многоуровневое моделирование горячего деформирования сплава 1565ч: идентификация, верификация, исследование устойчивости модели ……..…… 57

Вяткин Я.В., Трусов П.В. Моделирование поликристаллов в краевых задачах на основе прямых физически ориентированных подходов …… 58

Гладких П.А., Швейкин А.И. Оценка применимости суррогатных моделей на основе нейронных сетей для прогнозирования отклика материалов …….. 59

Глухов В.А., Кузнецова Е. В. Численное моделирование вала вентилятора авиационного двигателя с учетом вариативности граничных условий …….. 60

Голдобин Д.С. Неизотермическое диффузионное формирование горизонтов слаборастворимых веществ в земной коре ……..……. 61

Гордеева А.И., Шмыров А.В. Экспериментальное исследование устойчивости механического равновесия слоя ПАВ, сжимаемого однородным потоком …… 62

Гусев Г.Н., Стась Е.А. Моделирование деформированного состояния здания в процессе таяния многолетнемерзлых грунтов в его основании ……... 63

Гусев Г.Н., Цветков Р.В., Епин В.В., Сологуб Ф.Д. Исследование механических свойств свайных фундаментов в условиях таяния грунтов криолитозоны …… 64

Гусев Г.Н., Цветков Р.В., Епин В.В., Сологуб Ф.Д. Особенности деформационного мониторинга в условиях низких температур ……. 65

Дементьев В.Б., Волков К.Г., Ганзий Ю.В. Исследование напряженно-деформированного состояния стальной заготовки при высокотемпературной термомеханической обработке винтовым обжатием …… 66

Демин В.А., Демина Т.В., Коновалов В.В., Любимова Т.П. К вопросу об обосновании уравнения переноса паров кремния в ходе парофазного силицирования …….. 67

Демин В.А., Демина Т.В., Коновалов В.В., Любимова Т.П. Трехмерное численное моделирование процесса переноса паров кремния в условиях среднего вакуума с помощью вычислительного пакета CrystarPack …… 68

Демин В.А., Петухов М.И. О влиянии внешнего электрического поля на процесс протонного обмена ……... 69

Демус М.А. Электровязкоупругий демпфер продольных колебаний ……. 70

Димитриенко Ю.И. «Универсальные» модели сплошных сред с конечными деформациями и их применение в нелинейных задачах механики композитов …… 71

Дугинова Е.Б., Басалаев Ю.М. Механические свойства оксидов LiMO2 со структурой халькопирита ……. 72

Дудин Д.С., Келлер И. Э. Приложение модели хемомеханики к описанию высокотемпературной коррозии металлических сплавов ……. 73

Дуканов И.А., Юшков Е.В., Соколов Д.Д., Фрик П.Г. Применение нового метода оценки чисел Рейнольдса в турбулентном потоке на примере данных спутниковой 74

миссии PARKER SOLAR PROBE ……..……

Егорова С.А. Вычислительные схемы определения параметров нелинейно-упругих материалов …….. 75

Епин В.В., Корепанов В.В. Оценка горизонтальных деформаций основания здания по данным мониторинга неравномерных осадок …….. 76

Еремин М.О., Чирков А.О., Пажин А., Скрипкин А.Г. Закономерности деформирования горных пород вокруг скважин при проходке угольных пропластков. Эксперимент и математическое моделирование …… 77

Еремина Г.М., Смолин А.Ю., Еремин М.О. Разработка модели системы «внеклеточный матрикс мозга-нейрон» при механическом нагружении в рамках дискретного похода …….. 78

Ерофеев В.И., Ерофеева И.В., Лисенкова Е.Е., Шекоян А.В. Дисперсия и затухание плоских сдвиговых волн, распространяющихся в пористых флюидонасыщенных материалах …… 79

Ефремов Д.В., Уваров С.В., Наймарк О.Б. Статистический анализ сигналов гидро- и сонолюминесценции при интенсивном течении жидкости в узком канале …… 80

Жуков Л.О., Лунегов И.В. Численный вибрационный анализ основных элементов конструкции зондовой станции ……... 81

Зайцев А.В., Коуров Р.Н., Фукалов А.А. Аналитическое решение задачи о равновесии горизонтального тяжелого ортотропного цилиндра, находящегося под действием неоднородного бокового внешнего давления ……. 82

Зайцев А.В., Лобанов П.А., Банников М.В., Уваров С.В., Лукьянов Н.С. Деформирование и разрушение функциональных фторопластов, наполненных графеновым материалом …….. 83

Зайцев А.В., Мильхин В.А., Судаков И.А., Шобей М.М. Экспресс-метод определения дефектов подшипников качения, основанный на вейвлет-анализе сигналов виброускорения …… 84

Зайцев А.В., Поснов А.С., Химуля В.В., Шевцов Н.И., Карев В.И., Коваленко Ю.Ф. Идентификация деформационных постоянных нефтенасыщенных и экстрагированных карбонатных пород по результатам экспериментов на трехосное непропорциональное нагружение ……. 85

Затонская В.М., Еленская Н.В., Пащенко И.А., Ташкинов М.А. Моделирование механического отклика анизотропных скаффолдов в условиях контактного взаимодействия с костной тканью …….. 86

Земсков А.В. Волны Рэлея в изотропном термоупругом полупространстве …….. 87

Зимасова А.Р. Экспериментальное исследование инерционных волн во вращающейся двухжидкостной системе …… 88

Зиновьева Т.В., Беляев А.К. Биконтинуальная модель взаимодействия водорода и трубы под давлением …… 89

Иванов А.Р. Методика оценки остаточного ресурса сталей, эксплуатирующихся в условиях Арктики ……. 90

Изюмов Р.И., Свистков А.Л. Метод определения положения и формы включений в приповерхностном слое эластомерного нанокомпозита …… 91

Ильиных А.В. Экспериментальное исследование анизотропии характеристик 92

сопротивления малоцикловой усталости аддитивной нержавеющей стали 316LSi ..

Каменских А.А., Носов Ю.О. Обобщённая модель ANAND для термомеханического поведения полимеров и консистентных смазок …… 93

Каменских А.О., Матвеенко В.П. Управление частотным спектром пластины с помощью пьезоактуатора ……. 94

Камшилин А.А., Подолян Н.П., Мизева И.А., Мамонтов О.В., Зайцев В.В., Васильева М.Е., Кащенко В.А., Саковская А.В., Долотовская П.М., Маргарянц Н.Б., Ромашко Р.В. Увеличение скорости распространения пульсовой волны при локальном нагреве кожи человека ……... 95

Карякина В.Д., Виндокурова Е.Р., Созонов Н.С., Оглезнев А.А., Ризванов Д.Г., Вотинов Е.О. Анализ технологии закрепления высокотемпературных волоконно-оптических датчиков деформации …….. 96

Келлер И.Э., Адамов А.А., Виндокуров И.В., Еленская Н.В., Ташкинов М.А. Вязопластичность и вязкоупругость полилактида: базовые испытания и модели … 97

Князев Д.В. О некоторых преобразованиях двумерных уравнений Навье-Стокса ... 98

Князев Н.А., Никитюк А.С. Анализ устойчивости и чувствительности статистико-термодинамической модели клетки при сдвиговом нагружении …… 99

Колесниченко И.В., Бондаренко А.Б., Митрополит И.Ю., Лосев Г.Л., Мамыкин А.Д. Механизмы генерации концентрированных вихрей во вращающемся жидком металле ……... 100

Конюхов В.А., Матвеенко В.П., Сероваев Г.С. Идентификация параметров квазисосредоточенной нагрузки на поверхности деформируемого тела с применением нейронных сетей ……... 101

Корягина П.О., Еленская Н.В., Ташкинов М.А. Моделирование гидролитической деградации полилактидных скаффолдов на основе трижды периодических минимальных поверхностей …… 102

Краснякова Е.А. Динамика конвекции двойной диффузии в осциллирующей системе жидкостей …… 103

Крыласова О.С., Косков М.А., Иванов А.С. Расчет магнитного поля вблизи постоянного дискового и кольцевого магнитов …… 104

Кудряшев И.С., Изюмова А.Ю., Бартоломей М.Л., Вшивков А.Н., Угольников М.В., Ведерникова А.И., Плехов О.А. Оценка величины критической дистанции после лазерной ударной обработки ……. 105

Кузнецова Ю.Л. Изменение числа Пекле в прогнозировании морфологии частиц хлорида натрия …….. 106

Кузькин В.А., Трунова И.Н. Термоупругость нелинейных цепочек и определение температуры …….. 107

Курмоярцева К.А., Трусов П.В. Физически-ориентированная конститутивная модель для исследования деформирования двухфазных материалов: описание взаимодействия дислокаций с границами зерен …… 108

Кучеровский А.С., Пантелеев И.А. Условия применимости структурного тензора для описания распределения ориентаций планарных дефектов сплошности в твердом теле …….. 109

Кучинский М.О., Любимова Т.П., Рыбкин К.А. Влияние ультразвуковой 110

обработки на флотацию кварца ……...

Леднов А.С., Наседкин А.В. Моделирование эффективных термоупругих характеристик нанопористых материалов с учетом поверхностных эффектов …… 111

Лекомцев С.В., Матвеенко В.П., Сенин А.Н. Пассивное демпфирование колебаний предварительно нагруженных пластин и оболочек с помощью пьезоэлементов … 112

Лешпаев Д.М., Шайдуров М.Ю., Кузнецова Е.В. Анализ испытаний полноразмерного двигателя по вибрографированию маслобака ……. 113

Лобанов Д.С., Чеботарева Е.А. Изучение механизмов разрушения полимерных композитов на основе регистрации сигналов акустической эмиссии при сжатии …. 114

Ложкин Д.В., Пантелеев И.А. Ориентационная природа отклика флюидонасыщенной геосреды на прохождение объемных сейсмических волн …… 115

Ломакин Е.В. Деформирование и разрушение неоднородных природных и конструкционных материалов ……. 116

Лосев Г.Л., Ельтищев В.А., Шестаков А.В. Влияние формы включений на генерацию электровихревых течений ……. 117

Лыкова А.В., Третьяков М.П., Вильдеман В.Э., Оглезнева С.А. Исследование механического поведения алюминиево-магниевого сплава при горячем деформировании ……... 118

Любимова Т.П., Кирпичёв В.А., Устюгов М.Д., Иванцов А.О. Влияние пульсаций давления на устойчивость плоского фронта вытеснения вязкопластической жидкости ньютоновской жидкостью в ячейке Хеле-Шоу …… 119

Любимова А.А., Кучумов А.Г. Численное моделирование внутрисосудистой гемодинамики в Виллизиевом круге с аневризмами: влияние реологических моделей крови ……... 120

Любимова Т.П., Паршакова Я.Н., Лепихин А.П., Богомолов А.В. Разработка технологии повышения качества воды, забираемой из стратифицированного водоема, для технического водоснабжения ……... 121

Любимова Т.П., Шубенков И.С. Устойчивость и нелинейные режимы конвекции в горизонтальном пористом слое, насыщенном трехкомпонентной жидкой смесью 122

Ляжков С.Д. Энергетическая динамика волнового пакета в цепочке Пейрарда-Бишопа-Доксуа …….. 123

Мамыкин А.Д., Лосев Г.Л., Колесниченко И.В. Богатая вихревая динамика жидкого металла под действием встречно-вращающихся магнитных полей ……. 124

Манухина К.Д., Погорелко В.В., Майер А.Е., Плехов О.А. Применение машинного обучения для анализа эффективности лазерной ударной обработки меди …… 125

Марескин И.В. Использование оснастки и кольцевых стяжек для улучшения параметров локальной устойчивости высоконагруженных трубчатых металлокомпозитных стрежней ……... 126

Марышев Б.С., Клименко Л.С. Конвекция в пористой среде при различных моделях закупорки …… 127

Матвеенко В.П., Сероваев Г.С., Кошелева Н.А., Галкина Е.Б., Конюхов В.А. Мониторинг формирования технологических и остаточных деформаций в различных материалах с использованием волоконно-оптических датчиков …….. 128

Мехоношин К.А., Трусов П.В. Дислокационно-ориентированная модель для описания эффекта Портевена - Ле Шателье ……... 129

Миргородский Ю.С. Поиск рациональных параметров встроенной системы мониторинга на основе пьезоэлектрических датчиков для надежного определения локализации и уровня внешнего ударного воздействия на про-бионическую конструкцию панели …… 130

Митрополит И.Ю., Лосев Г.Л., Ельтищев В.А., Колесниченко И.В. Влияние различных конфигураций бегущего магнитного поля на образование вихревых структур в жидком металле и характеристики его перемешивания …… 131

Морозов И.А. Машинное обучение и атомно-силовая микроскопия в определении свойств поверхности полимера ……... 132

Мохирева К.А., Свистков А.Л. Влияние гибридных и смешанных углеродных наполнителей на вязкоупругие свойства эластомерных нанокомпозитов …….. 133

Мугатаров А.И., Вильдеман В.Э. Накопление повреждений, разупрочнение, разрушение в аналитических и численных решениях краевых задач ……. 134

Никитюк А.С., Баяндин Ю.В., Наймарк О.Б. Механизм перехода от экспоненциальной к степенной реологии в клетках и индекс метастатического потенциала ……. 135

Оборин В.А., Банников М.В., Балахнин А.Н., Никитюк А.С., Наймарк О.Б. Масштабно-инвариантные закономерности роста усталостной трещины при сверхмногоцикловой усталости в титановом сплаве Ti-6Al-4V после обработки поверхности наносекундными лазерными импульсами ……... 136

Озерных В.С., Колесниченко И.В. Механизмы возникновения полоидальной компоненты скорости течения жидкого металла под действием вращающегося магнитного поля …… 137

Окатьев Р.С., Фрик П.Г. Линейная неустойчивость МГД-течения с неоднородно распределенной примесью ……... 138

Павлецов Д.А., Еленская Н.В., Садырин Е.В., Виндокуров И.В., Ташкинов М.А, Моделирование механического поведения функционально-градиентных костных скаффолдов на различных этапах биорезорбции ……... 139

Пантелеев И.А., Ложкин Д.В., Барях А.А. Сравнительный анализ методов теории эффективных сред в оценке упругого отклика трещиноватого сильвинита по КТ-данным ……..…… 140

Панькова Н.В., Кетов А.И., Мизёв А.И. Генерация осредненного течения бегущей поверхностной волной …….. 141

Пермякова Э.В., Голдобин Д.С., Тюлькина И.В. Стохастическое параметрическое возбуждение тепловой конвекции в слое пористой среды ……... 142

Петухов Д.А., Фролов М.Е. Сравнительный анализ точности расчета классических и нейросетевых решений в задаче о плоской деформации ……... 143

Пешина Е.А., Кузнецова Е.В. Определение опасных сечений вала ротора турбины низкого давления …….. 144

Пирогова Ю.В., Затонская В.М., Еленская Н.В., Ташкинов М.А. Оптимизация механического отклика трижды периодической пористой структуры для проектирования костных имплантатов ……... 145

Плехов М.А., Плехов О.А. Влияние остаточных напряжений на процесс зарождения и скорость распространения усталостных трещин в металлах ……... 146

Полежаев Д.А., Терёхина А.В. Исследование массопереноса флуоресцентного красителя в пористых средах для оценки диффузионной извилистости …… 147

Полуянов А.О., Колесниченко И.В, Взаимодействие перемешивающего МГД-течения и затопленного струйного течения жидкого металла ……. 148

Пьянков Г.А., Баяндин Ю.В., Наймарк О.Б. Нелинейная гиперболическая теплопроводность в композитах при интенсивном нагреве …….…… 149

Пятковский Н.В., Ташкинов М.А. Исследование влияния стратегии укладки слоев на механические свойства изделий, изготовленных методом многоосевой и традиционной FDM-печати …….. 150

Разумовский Е.С., Чекалкин А.А. Влияние графитации на структурные параметры и пористость УУКМ для медицинских имплантатов …… 151

Рахимов Р.Ф., Лоцманов М.В., Беляев И.А. Струйное импульсное воздействие в полость канала с жидким металлом в поперечном магнитном поле ……... 152

Роговой А.А., Столбова О.С. Моделирование процессов намагничивания и переориентации мартенситной структуры в ферромагнитном сплаве с памятью формы ……. 153

Роготнев А.А., Никитюк А.С., Наймарк О.Б. Исследование связанной постановки задачи теплопроводности и деформации эпителиального монослоя …….. 154

Романов К.А., Балдин М.Н., Кондратьев Н.С. Моделирование замка для крепления лопатки к диску ГТД с применением расширенного комбинированного подхода … 155

Рысин К.Ю., Субботин С.В. Инерционно-волновые режимы течений, возбуждаемые прецессией диска, во вращающемся длинном цилиндре …… 156

Саврасова А.И., Галкина Е.Б. Оценка применения волоконно-оптических датчиков для определения механических констант конструкционных материалов 157

Салихова Н.К., Дудин Д.С., Келлер И.Э. Расчет остаточных напряжений алюминиевого ребра, возведенного на основании проволочно-дуговой наплавкой 158

Саркисян С.О., Саркисян Л.С., Жамакочян К.А. Модель и расчёт на устойчивость листа графена на основе моментно-мембранной теории упругой пластинки …… 159

Сбоев И.О., Любимова Т.П., Рыбкин К.А. Численное моделирование динамики газового пузырька в поле стоячей ультразвуковой волны …… 160

Сбоев И.О., Мингалев С.В., Абрамчук Т.В. Численное моделирование кавитации в турбулентном потоке жидкости в топливной форсунке в упрощенной постановке 161

Седова Ю.С. Водородная хрупкость и влияние скин-эффекта: анализ трех критериев разрушения …….. 162

Серебренников А.М. Квантовая гидродинамика из вариационных принципов для оптоспинтроники …….. 163

Сизиков В.С., Чупахин А.П. Перфузия крови и кровезамещающих растворов по эластичному сосуду виброобъемным методом …….. 164

Симонов А.В., Швейкин А.И. Об оценке устойчивости по Ляпунову базовых соотношений физической теории пластичности ……... 165

Смирнов А.С., Канакин В.С. Нейросетевая NARX модель для описания напряжения текучести металлических материалов при высокотемпературной 166

пластической деформации с учетом истории деформации ……..

Смирнов С.В., Мясникова М.В., Вичужанин Д.И. Анализ межслойной прочности металлополимерного композита при трехточечном изгибе ……. 167

Смирнова А.Е., Кузнецова Е.В. Проектирование и численный анализ конструкций инерциальных модулей навигации с учетом перегрузок …….. 168

Смольянов И.А., Шмаков Е.И., Листратов Я.И., Беляев И.А. Исследование импульсного воздействия тока на покоящуюся проводящую жидкость …… 169

Смольянов И.А., Шмаков Е.И., Листратов Я.И., Беляев И.А. Роль граничных условий в численных задачах МГД в режимах интенсивной магнитной конвекции 170

Соковиков М.А., Симонов М.Ю., Чудинов В.В., Оборин В.А., Уваров С.В., Наймарк О.Б. Изучение механизмов локализации пластической деформации при различных видах динамического нагружения как результата поведения дефектной структуры материала ……... 171

Соколов А.М., Банников М.В. Разработка программного пакета для количественного анализа морфологии поверхности разрушения ……... 172

Спорышева Д.И., Виндокуров И.В., Ташкинов М.А., Куликова Ю.В. Влияние параметров 3D-биопечати на формирование структуры и механические свойства образцов из гидрогелей на основе коллагена морского происхождения …… 173

Староверов О.А., Вильдеман В.Э., Мугатаров А.И., Сивцева А.В. Усталостная чувствительность полимерных композитов в условиях многоосного нагружения ... 174

Столбов О.В., Райхер Ю.Л. Силовой отклик магнитоактивного эластомера: роль качества поверхности ……..…… 175

Субботин С.В., Ширяева М.А. Генерация инерционных волн неустойчивостью зонального течения во вращающемся сферическом слое жидкости ……... 176

Сумин А.А., Зайцев А.В. Влияние формы и размера зерна на образование трещин в отливках из сплава ЭП202Л …….. 177

Сухановский А.Н., Васильев А.Ю. Динамика крупномасштабной циркуляции при наличии слабых периодических воздействий …… 178

Сыромятников Д.И., Сыромятникова А.С. Расчетно-экспериментальный способ оценки несущей способности усиленного ледового покрова …….. 179

Тарасова А.С., Ташкинов М.А. Деформационный отклик цилиндрических ауксетичных структур при комбинированном термомеханическом нагружении ….. 180

Ташкинов А.А., Шавшуков В.Е. Локализация очагов повреждений в хрупких поликристаллических материалах ……... 181

Телеппев И.А., Романюк В.С., Кузнецова Е.В. Исследование влияния геометрических концентраторов на напряженно-деформированное состояние элементов газотурбинных двигателей …… 182

Трухинов Д.К., Лебедева Е.А., Иванова Е.В., Беляев А.Ю., Свистков А.Л., Астафьева С.А. Исследование физико-механических характеристик термоэластопластов, наполненных углеродным волокном и магнитными частицами …….. 183

Уваров С.В., Юрина А.Д. Оптимизация параметров обработки сплавов авиационного назначения методом LSP с использованием данных лазерного измерителя скорости (PDV) ……. 184

Угольников М.В., Гачегова Е.А., Вшивков А.Н., Изюмова А.Ю., Кудряшев И.С., Плехов О.А. Формирование остаточных напряжений при комбинированной обработке: ЛУО и малопластическое выглаживание …… 185

Филатов С.В. Метастабильность антициклонических доменов во вращающейся турбулентности ……. 186

Фрейдин А.Б., Михеев Е.В., Иванова А.Б. Тензор химического сродства в хемомеханике …… 187

Хмелев А.А., Мугатаров А.И., Вильдеман В.Э Особенности конечно-элементного моделирования процессов закритического деформирования в твердых телах …….. 188

Хрипченко С.Ю., Тонков Е.Ю. Численное исследование распространение пассивной примеси в теплом верхе кристаллизатора машины непрерывного литья круглых слитков при перемешивании жидкого алюминиевого сплава МГД – перемешивателями различных конструкций ……. 189

Хрипченко С.Ю., Тонков Е.Ю. Численные исследования течений расплавленного металла в теплом верхе кристаллизатора машины непрерывного литья при воздействии на него МГД-перемешивателями различной конструкции …… 190

Чириков Д.Н., Зубарев А.Ю. Численное решение уравнения Ландау-Лифшица-Гильберта для описания неелевской релаксации …….. 191

Шакиров Н.В., Судаков А.И. Реологические свойства сверхтекучих систем и методы их измерения …… 192

Шаныгин А.Н. Обеспечение прочности высоконагруженных композитных каркасных пробионических конструкций …….. 193

Шарифулин В.А., Любимова Т.П. Длинноволновая неустойчивость горизонтального слоя жидкости с инверсией плотности при заданном тепловом потоке с учетом эффекта Марангони …….. 194

Шарифулин В.А., Любимова Т.П. Линейная устойчивость стационарного течения вязкоупругой жидкости в квадратной полости при сдвиговом воздействии и плавучести ……. 195

Швейкин А.И., Шарифуллина Э.Р., Вшивкова А.А., Вильдеман В.Э., Оглезнева С.А. Многоуровневое моделирование при разработке современных технологий горячего и сверхпластического формования …… 196

Шерстобитова К.А., Кузнецова Е.В. Расчет статической прочности и определение минимальной разрушающей частоты вращения диска 6-7 ступени ротора КВД ….. 197

Шестаков А.П., Камбур Д.А., Константинов Ю.А., Шардаков И.Н., Белокрылов М.Е., Клод Д. Реализация дальномера на основе оптической рефлектометрии частотной области ……. 198

Шипунов Г.С., Паньков А.А. Исследование влияния мезоструктуры полимерного композиционного материала на макродеформации с применением волоконно-оптических датчиков …… 199

Яковлев Ю.А. Поверхностный эффект при накоплении водорода в металлах и его влияние на напряженно-деформированное состояние ……..…… 200

Ганзий Ю.В., Дородов П.В., Чекмышев К.Э., Петров В.А. Анализ влияния пониженной температуры на механические свойства качественных и дефектных образцов АКП 201

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

СТАТИКА И ДИНАМИКА ГИБКИХ СТЕРЖНЕЙ. ЗАДАЧА ЛАВРЕНТЬЕВА–ИШЛИНСКОГО

Беляев А.К.

Институт проблем машиноведения Российской академии наук, Санкт-Петербург
vice.ipme@gmail.com

В основе доклада лежит критический анализ знаменитой статьи М.А.Лаврентьева и А.Ю.Ишлинского [1]. Рассматривается тонкий упругий горизонтально расположенный стержень в полной динамической постановке. В продольном направлении левый конец стержня свободен, а правый закреплен. В поперечном направлении оба конца шарнирно оперты. К свободному концу скачкообразно приложена постоянная продольная сила. Стержень искривлен и имеет исходную погибь, совпадающую с n-й эйлеровой формой потери устойчивости. Оказывается, что при скачкообразном приложении n-й эйлеровой критической силы максимальную скорость роста прогиба имеет отнюдь не n-я форма потери устойчивости. Так, при n=3 максимальная скорость роста соответствует второй форме потери устойчивости, а при n=4 - третьей форме. Объяснению этого парадоксального результата посвящена часть доклада.

В противоположность квази-динамической постановке [1], рассматривается динамическая задача в полной постановке и проверяется динамическая устойчивость тривиального решения, то есть прямолинейной формы. Вышеуказанная нагрузка порождает в стержне периодическую систему продольных волн. При определенных соотношениях между параметрами задачи продольные волны параметрически возбуждают поперечные колебания стержня. В теории колебаний этот феномен классифицируется как параметрический резонанс. Он принадлежит к классу резонансных явлений, однако принципиальное отличие от классического резонанса заключается в том, что параметрический резонанс занимает целые области неустойчивости на плоскости параметров. Как всякий резонансный эффект, в линейной постановке он характеризуется безграничным ростом амплитуды колебаний при отсутствии демпфирования и многократным увеличением амплитуды колебаний при наличии демпфирования.

В линейном приближении имеем неограниченный рост амплитуды поперечных колебаний, которые черпают энергию из продольных колебаний. При более аккуратной, нелинейной постановке задачи, которая вводит зависимость продольных колебаний от поперечных, картина движения оказывается иной. Движение представляет собой незатухающие биения с последовательной перекачкой энергии продольных колебаний в поперечные и наоборот.

Рассмотрен случай длительной нагрузки, позволяющий объяснить результаты статьи [1] несмотря на кажущуюся парадоксальность. Получены аналитические выражения для скорости роста каждой из форм потери устойчивости, что сделало наглядным соотношения между ними. Численная симуляция подтвердила робастность результата [1].

Продемонстрирована возможность и условия потери устойчивости при внешней силе, меньше эйлеровой, приводящей к возникновению параметрических колебаний.

Литература

[1] Лаврентьев М.А., Ишлинский А.Ю., Динамические формы потери устойчивости упругих систем // ДАН СССР. – 1949. – т. 64. № 6. – с. 779-782.

МОДЕЛИРОВАНИЯ ИЗНАШИВАНИЯ ПРЕДНАПРЯЖЕННЫХ ДЕФОРМИРУЕМЫХ ТЕЛ В УСЛОВИЯХ ФРИКЦИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Горячева И.Г. [1], Яковенко А.А. [1]

[1]*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва*
goryache@ipmnet.ru, anastasiya.yakovenko@phystech.edu

Фрикционное взаимодействие тел практически всегда сопровождается процессом изнашивания материалов. Избавиться от износа практически невозможно, но существуют способы уменьшения его скорости, например, за счет наведения в приповерхностных слоях взаимодействующих тел полей остаточных напряжений. Для управления процессом изнашивания необходимо установить зависимость скорости изнашивания от величины остаточных напряжений при заданных условиях контактного взаимодействия.

В данной работе рассматривается фрикционный контакт упругого цилиндра и упругой преднапряженной полуплоскости. Из решения контактной задачи получено поле внутренних напряжений в полуплоскости, которое затем используется для анализа поврежденности материала в условиях циклических перемещений цилиндра по границе полуплоскости. При исследовании процесса накопления контактно-усталостных повреждений используется макроскопический подход [1], основанный на построении внутри упругого тела функции поврежденности, зависящей от критериальных значений внутренних напряжений, в частности, напряжений фон Мизеса. Остаточные напряжения в полуплоскости моделируются растягивающими или сжимающими напряжениями, распределенными заданным образом по глубине в приповерхностном слое материала основания. Проведен анализ влияния суммарного поля внутренних напряжений на процесс накопления контактно-усталостных повреждений в условиях циклических перемещений цилиндра при различных видах распределения остаточных напряжений в материале основания. Установлено, что за счет наведения в приповерхностных слоях контактирующих тел полей сжимающих остаточных напряжений можно уменьшить скорость накопления подповерхностной поврежденности в материале основания тел [2]. Показано также, что протекающее одновременно с усталостным абразивное изнашивание материала может существенно повлиять на глубину зарождения усталостных повреждений и на характер контактно-усталостного изнашивания основания в условиях циклических перемещений контртела.

Таким образом, с помощью наведения соответствующим образом распределенных полей остаточных напряжений в подповерхностных слоях контактирующих тел при заданных условиях фрикционного взаимодействия (трение скольжения/качения) можно управлять характером и скоростью изнашивания, избегая подповерхностного отслаивания по контактно-усталостному механизму.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024).

Литература

[1] Горячева И.Г. Механика фрикционного взаимодействия – Москва, 2001. – 478 с.

[2] Горячева И.Г., Яковенко А.А., Гачегова Е.А., Пантелеев И.А. Моделирование влияния остаточных напряжений на контактно-усталостное разрушение упругих тел в условиях трения скольжения/качения // Физическая мезомеханика. – 2025. – т. 28, № 4. – с. 77-95.

НАЧАЛЬНЫЙ ЭТАП СОУДАРЕНИЯ ТВЕРДОГО ТЕЛА С ПОВЕРХНОСТЬЮ РАЗДЕЛА ГАЗ-ЖИДКОСТЬ

Ерманюк Е.В. [1], Карра Ж.-Б. [1], Гаврилов Н.В. [1], Черданцев А.В. [2], Шмакова Н.Д. [1]

[1]*Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск*
[2]*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск*
ermanyuk@hydro.nsc.ru, carrat@hydro.nsc.ru

Начальный этап соударения твердого тела со свободной поверхностью, разделяющей газовую и жидкую среды, сопровождается рядом нетривиальных эффектов. Непосредственно перед соударением в тонком слое газа, разделяющем тело и жидкость, возникает значительное давление, под действием которого происходит локальная деформация свободной поверхности, вследствие чего касание (смачивание) происходит на некотором расстоянии от нижней точки тела. В случае тела с вертикальной осью симметрии смачивание на начальном этапе соударения происходит в кольцевой зоне, окружающей носик тела [1]. Схлопывание воздушной прослойки внутри кольцевой зоны под действием капиллярных сил приводит к формированию газового пузырька в районе носика тела. Аналогичное явление имеет место при падении капли на твердую поверхность и на свободную поверхность жидкости [2], что имеет большое значение в приложениях [3]. Интенсивные экспериментальные исследования данного круга задач, проведенные методами скоростной видеосъемки в течение последних двух десятилетий, продемонстрировали чрезвычайное разнообразие наблюдаемых явлений и режимов течений [4]. Описание этих эффектов требует развития новых теоретических и численных подходов, пригодных в соответствующих подобластях исходной многопараметрической задачи. В докладе приведено обсуждение различных подходов к решению задачи о соударении тел с жидкостью от классических работ [5] до современных исследований, в которых учитываются процессы в газовой прослойке для тел различной геометрии, включая гладкие тела [1], тела с плоским дном [6], а также с геометрическими особенностями [7,8].

Литература

[1] Hicks P.D., Ermanyuk E.V., Gavrilov N.V., Purvis R., Air trapping at impact of a rigid sphere onto a liquid // J. Fluid Mech. – 2012. – т.695, с. 310–320.

[2] Thoroddsen S.T., Etoh T.G., Takehara K., Air entrapment under an impacting drop // J. Fluid Mech. – 2003. – т.478, с. 125–134.

[3] Lohse D., Fundamental Fluid Dynamics Challenges in Inkjet Printing // Annu. Rev. Fluid Mech. – 2022. – т.54, с.349-382.

[4] Josserand C., Thoroddsen S.T., Drop impact on a solid surface // Annu. Rev. Fluid Mech. – 2016. – т.48, с.365–391.

[5] Wagner H., Über Stoß- und Gleitvorgänge an der Oberfläche von Flüssigkeiten // ZAMM. – 1932. – т.12 (4), с.193–215.

[6] Jain U., Vega-Martinez P., van der Meer D., Air entrapment and its effect on pressure impulses in the slamming of a flat disc on water // J. Fluid Mech. – 2021. – т.928, A31.

[7] Carrat J.-B., Gavrilov N.V., Cherdantsev A.V., Shmakova N.D., Ermanyuk E.V., Air entrapment at impact of a conus onto a liquid // J. Fluid Mech. – 2023. – т.966, R1:1-13.

[8] Carrat J.-B., Gavrilov N.V., Cherdantsev A.V., Shmakova N.D., Ermanyuk E.V., Air entrapment at impact of a wedge, pyramids and conus onto a liquid // J. Fluid Mech. – 2026. – (accepted)

НЕЛИНЕЙНЫЕ СТАДИИ НЕУСТОЙЧИВОСТИ СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ЖИДКОСТИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Зубарев Н.М. [1,2]

[1]*Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург*
[2]*Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва*
nick@iep.uran.ru

Лекция посвящена исследованию сильно нелинейных стадий развития неустойчивости Тонкса–Френкеля [1,2], т.е. неустойчивости свободной поверхности жидкостей с различными физическими свойствами в нормальном электрическом поле. Основное внимание уделяется двум ситуациям: поведению идеально проводящей жидкости (расплавленного металла для приложений) и непроводящей жидкости с заряженной поверхностью (например, жидкого гелия с локализованными над поверхностью электронами). В первом случае электрическое поле имеется только вне жидкости, а во втором – только внутри ее. Линейные стадии неустойчивости для этих ситуаций идентичны: они описываются одинаковым законом дисперсии поверхностных волн. Однако нелинейные стадии принципиально отличаются.

На поверхности проводящей жидкости в электрическом поле за конечное время образуются конические острия – динамические конусы Тейлора. При формировании особенности кривизна вершины выступа, локальная напряженность поля и скорость жидкости обращаются в бесконечность. В этом процессе можно выделить два масштаба с различным типом поведения системы. На макромасштабе применимо приближение идеальной жидкости; формируется конус с тейлоровским углом раствора 98.6 градусов. На микромасштабе определяющую роль начинают играть вязкие эффекты, и формируется конус с втрое меньшим углом раствора. В обоих случаях реализуются автомодельные режимы течения жидкости [3,4].

На заряженной поверхности непроводящей жидкости (или границе раздела непроводящей жидкости и плазмы), как показывают результаты прямого численного моделирования, возникает тенденция к формированию заряженных пузырьков. Можно выделить две основные стадии неустойчивости – начальную, на которой в поверхности возникают лунки, и развитую, когда они трансформируются в расширяющиеся пузырьки. Размер пузырьков растет с ростом приложенного поля, несмотря на то, что масштаб, соответствующий доминантной моде неустойчивости, уменьшается [5].

Литература

[1] Tonks L., A theory of liquid surface rupture by a uniform electric field //Phys. Rev. – 1935. – vol. 48. – p. 562.
[2] Френкель Я.И., К теории Тонкса о разрыве поверхности жидкости постоянным электрическим полем в вакууме // ЖЭТФ. –1935. – т. 6, № 4. – с. 348.

[3] Zubarev N.M., The effect of viscosity on the self-similar growth of conic cusps on the surface of a conducting liquid in an electric field: Limiting cone angle //Phys. Fluids. – 2024. – vol. 36. – art. no 042102.

[4] Зубарев Н.М., Модели Стокса и Навье–Стокса в описании неустойчивости заряженной границы проводящей жидкости //Письма в ЖТФ. – 2025. – т. 51, № 19. – с. 32-35.

[5] Зубарев Н.М., Кочурин Е.А., Развитие сильно нелинейных структур на заряженной границе непроводящей жидкости в электрическом поле //Письма в ЖЭТФ. – 2026. – т. 123, № 5. – с. 346-353.

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ВИБРАЦИОННОЙ МЕХАНИКИ МНОГОФАЗНЫХ СИСТЕМ

Иванова А.А., Козлов В.Г.

Лаборатория вибрационной гидромеханики
Пермский государственный гуманитарно-педагогический университет, Пермь
a.ivanova@pspu.ru, kozlov@pspu.ru

Дается краткий обзор экспериментальных и теоретических исследований осредненных эффектов, наблюдаемых в многофазных системах в осциллирующих силовых полях. Внимание уделяется новым явлениям, обнаруженным и исследованным в лаборатории вибрационной гидромеханики ПГГПУ. Необычное, подчас парадоксальное, поведение гетерогенных гидродинамических систем объясняется генерацией осредненных массовых сил в результате колебаний даже малой амплитуды. Обсуждается несколько разделов: динамика поверхностей раздела в осциллирующих силовых полях [1-5]; течения, индуцируемые вибрациями [6,7]; динамика твердых и жидких включений в несжимаемой жидкости [8-10]. Уделяется внимание важной роли безразмерной частоты вибраций (осцилляций) – в предельных случаях высокой и низкой частоты эффекты оказываются противоположными по знаку. Показано качественное изменение (усиление) осредненных эффектов при действии осложняющих факторов: вращения; высокого контраста вязкостей жидкостей в системах с межфазной границей; течений в стесненных каналах (пористых средах); комбинированного действия вращения и вибраций. Результаты выполненных исследований наряду с развитием фундаментальных основ вибрационной гидромеханики имеют большой прикладной потенциал и представляют практический интерес.

Доклад подготовлен при поддержке Мин. Прос. РФ (Гос. Зад., № 1025032600036-8-2.3.2.)

Литература

[1] Ivanova A., Kozlov V., Evesque P., Patterning of liquefied sand surface in a cylinder filled with liquid and subjected to horizontal vibrations // Europhys. Letters. – 1996. – т. 35. № 3. – с. 159–164.

[2] Иванова А.А., Козлов В.Г., Граница раздела песок – жидкость при вибрационном воздействии // Изв. РАН. МЖГ. – 2002. – № 2. – с. 120–138.

[3] Kozlov V., Vlasova O., Oscillatory dynamics of immiscible liquids with high viscosity contrast in a rectangular Hele-Shaw channel // Phys. Fluids. – 2022. – т. 34. №3. – с.032121.

[4] Kozlov V, Petukhova M, Kozlov N., Dynamics of liquids with high viscosity contrast in unevenly rotating Hele-Shaw cell // Phil. Trans. R. Soc. A. – 2023. – 20220082.

[5] Kozlov V., Vlasova O., Dyakova V., Oscillatory excitation of Faraday waves on the interface of immiscible fluids in a slotted channel // Physics of Fluids.– 2024. – т. 36. №10. – с.102117.

[6] Kozlov V.G., Kozlov N.V., Subbotin S.V., Steady flows in rotating spherical cavity excited by multi-frequency oscillations of free inner core // Acta Astr. – 2017. – т. 130. – с. 43–51.

[7] Kozlov V. G., and Subbotin S. V., Librations induced zonal flow and differential rotation of free inner core in rotating spherical cavity // Physics of fluids. – 2017. – т.29. – с. 096601.

[8] V.G. Kozlov., Solid-body dynamics in cavity with liquid under high-frequency rotational vibration // Europhys. Letters. – 1996. – т. 36. № 9. – с. 651–656.

[9] Иванова А.А., Козлов В.Г., Кузаев А.Ф., Вибрационная подъемная сила, действующая на тело в жидкости вблизи твердой поверхности // Докл. РАН. – 2005. – т. 402. № 4. – с. 488–491.

[10] Козлов В.Г., Козлов Н.В., Вибрационный гидродинамический волчок // Докл. РАН. – 2007. – т.415. № 6. – с. 759–762.

ОСНОВНЫЕ ПРОГРАММЫ НОВЫХ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ. РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПРОЧНОСТИ В ТРДД ПД-35

Иноземцев А.А.

Акционерное общество «ОДК-Авиадвигатель», Пермь
office@avid.ru

В докладе представлены результаты работ по созданию и внедрению новых типов авиационных турбореактивных двухконтурных двигателей типа ПД-14, ПД-35 и ПД-8 для магистральных самолетов РФ.

Рассмотрены решения ряда задач динамики и прочности в двигателе большей тяги ПД-35. Особое внимание уделено задачам обеспечения прочности высоконагруженных деталей из полимерных композиционных материалов, таких как рабочая лопатка вентилятора; обеспечению жесткости силовой схемы двигателя, перспективным методам упрочнения деталей, повышения требований к прочностным характеристикам материалов.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ГЕТЕРОГЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Краус А.Е., Краус Е.И., Фомин В.М., Шабалин И.И.

Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск
kraus@itam.nsc.ru

В работе [1] разработана замкнутая упругопластическая дискретная модель разрушаемой гетерогенной среды. В каждой расчетной ячейке заданы физико-механические свойства компонент гетерогенного материала. При переходе из одной ячейки в другую свойства могут изменяться скачком. На границах ячеек выполняются условия совместности перемещения узлов компонент гетерогенного материала. На рис. 1 *а*, в качестве примера, приведено дискретное 3D геометрическое представление многокомпонентного гетерогенного материала в форме куба. На рис. 1 *б–г* представлены различные типы 2D двухкомпонентных гетерогенных образцов при одной и той же концентрации включений.

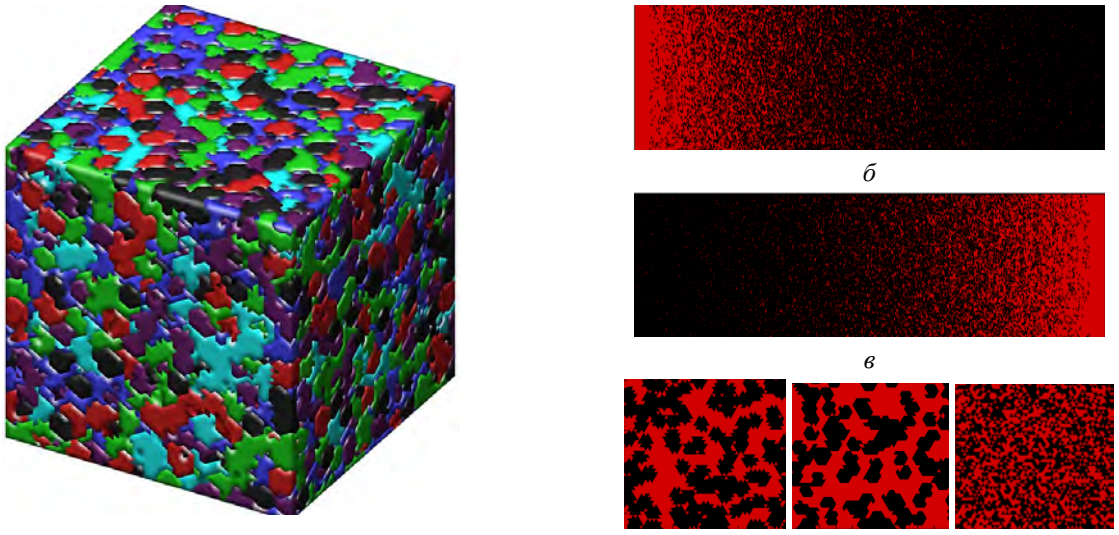


Рис.1 Дискретное геометрическое представление гетерогенного материала в: 3D многокомпонентных средах (*а*); 2D двухкомпонентных средах (*б–г*)

Представлена модель прямого численного моделирования гетерогенного материала, основанная на распределении компонент, составляющих материал, по заданным их пространственным координатам и долям в материале. Проведено моделирование процессов проникания стержней в массивные блоки из гетерогенных материалов, а также процессов разрушения гетерогенных пластин отколом, сдвигом и пластическим проколом. Построена модель периодически объемно-армированных металломатричных композитов и выполнено сравнение результатов расчетов высокоскоростного соударения частиц космического мусора с экранами из таких композитов с данными экспериментов. Предложены методы идентификации эффективного динамического предела текучести гетерогенных материалов, а также предельных величин напряжений откола и деформаций.

Литература

[1] Фомин В.М., Краус Е.И., Шабалин И.И., Краус А.Е., Бузюркин А.Е. Высокоскоростное взаимодействие гетерогенных материалов. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2025. - 437 с.

ДИНАМИКА МНОГОФАЗНЫХ СРЕД В ВИБРАЦИОННЫХ ПОЛЯХ

Любимова Т.П.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
lubimova@icmm.ru

Вибрации могут оказывать значительное влияние на поведение неоднородных по плотности гидродинамических систем. Вертикальные вибрации достаточно высокой интенсивности могут стабилизировать состояния равновесия двухслойных систем в гравитационном поле, в которых более плотная жидкость расположена над менее плотной, а горизонтальные вибрации могут приводить к новым устойчивым состояниям равновесия с наклонной или даже вертикальной границей раздела жидкостей [1]. Это позволяет рассматривать вибрации как простое и эффективное средство управления поведением неоднородных гидродинамических систем.

В настоящем докладе анализируется влияние вибраций разного типа на поведение многофазных сред. Первая часть доклада посвящена воздействию вибраций на поверхности раздела несмешивающихся и смешивающихся жидкостей. Рассматриваются механизмы неустойчивости поверхностей раздела жидкостей в вибрационных полях и методы управления поведением систем с поверхностями раздела жидкостей с помощью вибраций. Обсуждается применение поступательных вибраций для повышения устойчивости фронта вытеснения, а также применение поступательных и вращательных вибраций для управления течениями и тепломассопереносом при выращивании кристаллов из расплава методами плавающей зоны, Бриджмена и Чохральского.

Вторая часть доклада посвящена влиянию вибраций на поведение жидкостей с твердыми, жидкими или газовыми включениями, суспензий и эмульсий. Рассматриваются резонансные колебания пузырьков и капель в колеблющейся жидкости и вызванная высокочастотными вибрациями средняя деформация включений. Анализируются средние вибрационные силы, действующие на твердые, жидкие и газовые включения со стороны жидкости, взаимодействие включений в колеблющейся жидкости и формирование периодических структур в суспензиях и эмульсиях. Обсуждается применение акустических и неакустических вибраций для повышения эффективности процессов разделения фаз, в том числе процессов обогащения минерального сырья методом флотации.

Выявленные закономерности поведения многофазных сред в вибрационных полях делают перспективным применение вибраций для управления технологическими процессами с участием таких сред.

Литература

[1] Любимов Д.В., Любимова Т.П., Черепанов А.А. Динамика поверхностей раздела в вибрационных полях. – М.: Физматлит, 2003. – 216 с.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ПРИ РАЗРАБОТКЕ МОДЕЛЕЙ МЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ

Майер А.Е.

Челябинский государственный университет, Челябинск
mayer@csu.ru

Формализованный анализ данных при помощи методов машинного обучения является удобным инструментом, помогающим в разработке и параметризации моделей механического поведения материалов. В докладе представлен обзор работ коллектива по данному направлению. Рассматривается выбор параметров определяющих соотношений по наборам обучающих данных при помощи стохастических методов оптимизации, таких как метод Байеса и метод роя частиц. Рассматривается применение полносвязных искусственных нейронных сетей (ИНС) прямого распространения как быстрых эмуляторов модели и как отдельных частей модели для аппроксимации сложных нелинейных зависимостей. В качестве обучающих данных могут использоваться экспериментальные результаты [1], либо результаты моделирования на более «низком» уровне: молекулярно-динамического (МД) моделирования [2], первопринципного моделирования [3] или моделирования методом дискретной дислокационной динамики (ДДД) [4]. В частности, комбинация метода Байеса и ИНС-эмулятора модели позволяет эффективно оптимизировать параметры модели дислокационной пластичности по наборам экспериментальных данных [1] для интересующих материалов. Аппроксимация с помощью ИНС функции пластического потенциала [2] или непосредственно кривых напряжение-деформация [4] позволяет «перенести» данные МД или ДДД моделирования на уровень механики сплошных сред с учетом микроструктурных особенностей сплавов алюминия.

Исследования с применением методов машинного обучения выполняются в настоящее время за счет проекта РНФ 24-19-00684 (https://rscf.ru/project/24-19-00684/) в части развития моделей высокоскоростной пластической деформации, в том числе с применением экспериментальных данных, и за счет проекта РНФ 24-11-20031 (https://rscf.ru/project/24-11-20031/) в части многомасштабного моделирования сплавов алюминия.

Литература

[1] Rodionov E. S., Pogorelko V. V., Lupanov V. G., Fazlitdinova A. G., Mayer P. N., Mayer A. E., Dynamic deformation and fracture of brass: Experiments and dislocation-based model // International Journal of Plasticity. – 2024. – V. 183. – P. 104165.

[2] Krasnikov V. S., Manukhina K. D., Latypov F. T., Voronin D. S., Mayer A. E., Mechanical response of metastable grain boundaries under shear deformation: A multi-scale study // International Journal of Plasticity. – 2025. – V. 195. – P. 104524.

[3] Panchenko B. A., Fomin E. V., Mayer A. E., Tensor equation of state for copper and aluminum // Computational Materials Science. – 2025. – V. 253. – P. 113845.

[4] Krasnikov V. S., Voronin D. S., Mayer A. E., Competing mechanisms and pathways of dislocation-precipitate interaction in Al-Cu alloys under dynamic deformation // International Journal of Plasticity. – 2026. – V. 199. – P. 104652.

НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИКА ДЕФЕКТОВ ПРИ ДЕФОРМИРОВАНИИ И РАЗРУШЕНИИ МАТЕРИАЛОВ

Наймарк О.Б.

Институт механики сплошных сред Уральского отделения РАН, Пермь
naimark@icmm.ru

Закономерности деформирования и разрушения материалов в широком диапазоне интенсивностей нагружения (квазистатические, усталостные, динамические, ударно-волновые) исследуются экспериментально и теоретически с целю обоснования связи механизмов релаксации (пластичности) и разрушения, обусловленных нелинейной динамикой развития дефектов, с автомодельными режимами поведения материалов. Процессы деформации при ударно-волновом и динамическом нагружении характеризуются близкими временами нагружения к временам развития дефектов, структурной релаксации. Это предполагает рассмотрение процесса деформирования и разрушения, обоснование термодинамики в терминах структурных переменных, характеризующих дефекты, связь нелинейной динамики дефектов с релаксационными свойствами и стадийностью развития разрушения Экспериментальные исследования поведения конденсированных сред в широком диапазоне интенсивностей нагружения показывают ограниченность предположения о «адиабатическом подчинении» механических свойств структурным переменным, отражающих поведение дефектов.

Развитая в [1] статистическая термодинамика сред с дефектами установила вид термодинамического потенциала (неравновесной свободной энергии) в зависимости от внутренних переменных: деформации, индуцированной дефектами, и параметра структурного скейлинга, определяющего взаимодействие дефектов. Анализ кинетики дефектов с учетом нелинейности термодинамического потенциала показал связь коллективных мод ансамблей дефектов (автоволновых структур и диссипативных структур обострения), имеющих природу автомодельных решений, с механизмами локализации пластического течения и стадийностью поврежденности, зарождения и распространения трещин. Исследовано влияние коллективных мод дефектов на формирование упруго-пластических фронтов в металлах, механизм «релаксации» упругого предвестника; анализируется связь с термодинамикой инертных и энергетических материалов [2]. Развиты методы многомасштабного анализа структурных изменений, обусловленных дефектами, с использованием данных рентгеновской томографии применительно к широкодиапазонному моделированию поведения материалов.

Работа выполнена в рамках госзадания, регистрационный номер темы №124020200116-1.

Литература

[1] Naimark O.B. Defect induced transitions as mechanisms of plasticity and failure in multifield continua // In: Advances in multifield theories of continua with substructure. Ed.: G.Capriz, P.Mariano.- Boston, Birkhauser - - 2004 - P.75-114.

[2] Naimark O., Bayandin Yu., Uvarov S., Bannikova I., Saveleva N. Critical Dynamics of Damage-Failure Transition in Wide Range of Load Intensity // Acta Mechanica – 2021 - V.232 - P.1943–1959 https://doi.org/10.1007/s00707-020-02922-1

ОБЩИЙ МЕХАНИЗМ ИЗМЕНЕНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛОВ ПРИ ВОДОРОДНОЙ ХРУПКОСТИ И ПРИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Полянский В.А.[1], Беляев А.К. [1], Нечаева А.В. [2], Яковлев Ю.А. [1], Фролова К.П. [1]

[1]*ИПМаш РАН, Санкт-Петербург*
[2]*АО НДЦ НПФ «Русская лаборатория», Санкт-Петербург*
pva@ipme.ru

Для большинства конструкций пластическая деформация конструкционных металлов является важным механизмом выравнивания внутренних напряжений в областях вокруг концентраторов напряжений и областей приложения внешней сосредоточенной нагрузки. Полностью исключить пластические деформации металла конструкционных элементов при рабочей нагрузке практически невозможно, даже несмотря на то, что весь инженерный расчет на прочность делается так, чтобы все напряжения лежали в упругой области. Вторым неизбежным и опасным для конструкций, плохо прогнозируемым феноменом является водородная хрупкость.

Основным механизмом пластической деформации считается механизм зарождения и движения дислокаций внутри металла. Феномен водородной хрупкости также практически для всех металлов объясняется с помощью дислокационной теории.

Вместе с тем, за 20 век накоплено достаточно много экспериментальных данных о неполном соответствии этих теорий наблюдаемым процессам. Например, установлено, что наклеп и упрочнение металлов после пластической деформации связаны с изменением внутренней структуры металла в тонком поверхностном слое. Но разрезание упрочненного металлического образца вдоль границы этого слоя приводит к разупрочнению, как оставшейся внутренней части металла, так и самого слоя. Насыщение металла водородом также приводит к увеличению плотности и скорости движения дислокаций на границах поликристаллических зерен, но при насыщении водородом корсетных металлических образцов наблюдается как водородной наклеп, так и водородное разупрочнение.

Исследование распределения концентрации растворенного водорода в металлических образцах после пластической деформации, показывает, что происходит резкое увеличение концентрации водорода в металле. Микроструктура приповерхностного слоя содержит некоторое количество микропор и микротрещин, которых до пластического деформирования не было. Что позволяет предположить сходство механизмов изменения напряженно-деформированного состояния металлов при водородной хрупкости и при пластической деформации.

Рассмотрение решений задачи о росте поры в упруго пластическом материале показывает, что такой рост сопровождается образованием области пластической деформации, которая примерно на два порядка больше объема поры. Поэтому даже при небольшой объемной концентрации пор и микротрещин практически весь металл оказывается в области пластических деформаций, что определяет его дальнейшее поведение под нагрузкой и механические свойства. Учет неравномерности объемного распределения накопленной поврежденности позволяет получить адекватное описание как водородного упрочнения, так и водородного размягчения.

ВОЗМОЖНОСТИ СТАНЦИИ 1-3 «БЫСТРОПРОТЕКАЮЩИЕ ПРОЦЕССЫ» ЦКП «СКИФ» ДЛЯ ЗАДАЧ МЕХАНИКИ

Прууэл Э.Р.

Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева, Новосибирск
pru@hydro.nsc.ru

В докладе представлено описание станции 1-3 «Быстропротекающие процессы» ЦКП «СКИФ». Станция предназначена для исследования быстропротекающих, в том числе взрывных, процессов с использованием синхротронного излучения.

Источником синхротронного излучения служит накопительное кольцо с периметром 476 м, энергией электронов 3 ГэВ и током 400 мА; время между банчами — около 3 нс. Пучок заряженных частиц, двигаясь в поперечном магнитном поле, генерирует мощное и яркое излучение, которое по транспортному каналу поступает на экспериментальную станцию.

В качестве излучающего устройства выбран вигглер с периодом 27 мм, магнитным полем 2,8 Тл и 74 периодами. Полная мощность излучения — 36 кВт, диапазон энергий фотонов — 15–40 кэВ.

Для создания импульсных воздействий разработаны две пневматические пушки калибром 20 и 50 мм, взрывная бронекорпус на 2 кг взрывчатого вещества и импульсный лазер. Все оборудование обеспечивает надежную локализацию поражающих факторов взрыва и оснащено защищенными окнами для прохождения рентгеновского излучения.

На станции реализованы методики с высоким временным разрешением (время между кадрами 100 нс): адсорбционной радиографии и томографии, малоуглового рентгеновского рассеяния и дифракции.

Литература

[1] ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ИНФРАСТРУКТУРА СИБИРСКОГО КОЛЬЦЕВОГО ИСТОЧНИКА ФОТОНОВ "СКИФ". Сборник статей. В 3-х томах. Том 1. Под общей редакцией К.И. Шефер, Составитель Я.В. Зубавичус. Новосибирск, 2022.

МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ В КОМПОЗИТАХ «ПЬЕЗОПОЛИМЕР / ДИСПЕРСНЫЙ ФЕРРОМАГНЕТИК»: РЕЗУЛЬТАТЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Столбов О.В., Райхер Ю.Л.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
sov@icmm.ru, raikher@icmm.ru

Одной из основных разновидностей магнитоэлектрических материалов (мультиферроиков), наиболее востребованной в сенсорике и медико-биологических приложениях, являются композиты, где матрицей служит пьезоэлектрический полимер, а наполнителем – дисперсия микронных или наноразмерных частиц феррита или ферромагнитного сплава. Полимерные мультиферроики преимущественно используются – в виде плёнок или скаффолдов (ажурных волоконных объектов) – для получения так называемого прямого магнитоэлектрического (МЭ) эффекта, то есть создания электрической поляризации (разности потенциалов) в ответ на приложенное магнитное поле. Очевидным преимуществом таких систем при использовании *in vivo* является «прозрачность» всех органических материалов для магнитного поля, то есть возможность возбуждать в них МЭ эффект дистанционно.

МЭ эффект в указанных системах возникает из комбинации двух классических явлений: магнитострикции и пьезоэлектричества. Под действием магнитного поля частицы ферромагнетика, испытывают стрикционную деформацию и/или вынужденное смещение. Тем самым они создают в окружающей их полимерной матрице механические напряжения, которые, благодаря пьезоэлектрической природе полимера, индуцируют в последнем электрическую поляризацию.

Мелкодисперсный феррит кобальта является наиболее популярным и, возможно, самым интересным материалом для полимерных мультиферроиков. С одной стороны, у него рекордное значение константы магнитострикции. С другой – это высокоанизотропный феррит и, значит, приложенное поле способно создавать заметный момент сил, стремящийся повернуть частицу внутри матрицы. Обе эти причины приводят к возникновению в композите мелкомасштабных механических напряжений, тем самым внося отдельные собственные вклады в МЭ эффект. Моделирование на мезоскопическом уровне позволяет оценить каждый из этих вкладов и определить условия, при которых они либо складываются (синеэгия), либо ослабляют друг друга. Важно, что и магнитостатические, и упругие межчастичные силы являются дальнодействующими. Это значит, что для корректного расчёта МЭ эффекта в композите следует рассматривать многочастичные ансамбли. Компьютерное моделирование позволяет это сделать: мы используем метод конечных элементов для представительной ячейки и RVE схему для связывания ячеек. Представлены результаты по зависимости МЭ эффекта от формы частиц (квазисферические частицы феррита кобальта, пластинчатые частицы феррита бария), ориентации магнитного поля и направления полинга модельных плёнок и филаментов из пьезополимерного композита [1,2].

Работа выполнена в рамках госзадания, регистрационный номер темы 126020916888-9.

Литература

[1] Stolbov O.V., Raikher Yu.L. Magnetoelectric effect in piezopolymer composites with a weakly-magnetostrictive filler: the contribution of torsional stresses //Advanced Theory and Simulations. – 2025. – V. 8. – Art. no. 2401318.

[2] Stolbov O.V., Raikher Yu.L. Modeling of the field-induced electrization of a magnetoelectric PVDF@cobalt ferrite filament //Soft Matter. – 2026. – V. 22. – P. 497–507.

РАЗВИТИЕ КОМПОЗИТНЫХ ПРО-БИОНИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ

Сыпало К.И., Чернышев С.Л., Ковалев И.Е., Дубовиков Е.А., Шаныгин А.Н.

Федеральное автономное учреждение
«Центральный аэрогидродинамический институт им.профессора Н.Е.Жуковского»,
г.Жуковский
info@tsagi.ru

Начиная с 2010-х годов в качестве альтернативы композитным конструкциям типа «black metal» для пассажирских самолетов стали разрабатываться конструкции на основе жестких однонаправленных композитных каркасов, которые стали прообразом, но уже на новом техническом уровне, конструкций первых самолетов. Развитию таких каркасных конструкций был посвящен ряд отечественных и международных проектов, организованных ЦАГИ [1], в рамках которых совместно с ЦНИИСМ и другими партнерами происходил поиск рациональных композитных каркасных конструкций, удовлетворяющих авиационным требованиям перспективных пассажирских самолетов, получивших название про-композитные. Такие конструкции стали основой для развития про-бионических конструкций, получивших многоуровневую систему защиты от ударных и климатических воздействий, а также встроенную систему мониторинга технического состояния.

В докладе представлен обзор результатов по разработке про-бионических конструкций для дозвуковых и сверхзвуковых пассажирских самолетов, полученных в рамках открытых отечественных и международных проектов [2] и открытых публикаций [3,4]. В настоящей работе показаны основные этапы развития конструктивно-силовых схем до появления про-бионических конструкций. Показано преимущество про-бионических конструкций в обеспечении прочности, надежности и весовой эффективности. Рассмотрены перспективы их дальнейшего развития на основе интеллектуальных SMART-конструкций.

На примере отсеков-демонстраторов перспективных пассажирских самолётов оценена эффективность использования про-бионических композитных конструкций для снижения веса планера, повышения надежности в эксплуатации и возможности дальнейшего улучшения летно-технических характеристик.

Отдельные результаты получены в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024).

Литература

[1] FP7 ALaSCA project // URL: http://cordis.europa.eu/result/rcn/149775_en.

[2] НЦМУ Сверхзвук // URL: https://tsagi.ru/institute/ISC_Supersonic.

[3] А.А. Бабичев, В.В. Васильев, А.Ф. Разин, А.А. Склезнев, А.Н. Шаныгин, Д.Ю. Фомин, И.В. Марескин Исследование сопротивления композитных сетчатых конструкций ударному повреждению // Конструкции из композиционных материалов. 2021. № 3. С. 3-6. https://doi.org/10.52190/2073-2562_2021_3_3.

[4] S.L. Chernyshev, E.A. Dubovikov, A.A. Ionov, I.O. Kondakov, A.N. Shanygin, M.Ch. Zichenkov Basic principles for creating light, efficient and safe structures for the next generation supersonic transport. Acta Astronautica 2023;204:728–737. https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2022.10.035.

КОНСТИТУТИВНЫЕ МНОГОУРОВНЕВЫЕ ФИЗИЧЕСКИ-ОРИЕНТИРОВАННЫЕ МОДЕЛИ: ПРЕИМУЩЕСТВА, ПРОБЛЕМЫ, ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ

Трусов П.В.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
tpv@pstu.ru

Разработка новых и совершенствование существующих технологий создания изделий из металлов и сплавов методами термомеханической обработки в настоящее время начинается с разработки математических моделей («цифровых двойников»). Важнейшим элементом последних являются конститутивные модели (определяющие соотношения) для описания поведения рассматриваемых материалов в широких диапазонах изменения воздействий (скоростей деформаций, температуры, градиентов перемещений и т.д.). В практике работы технологов широко распространенными являются макрофеноменологические определяющие соотношения (ОС) [1, 2], используемые в большинстве коммерческих пакетов. Однако данные ОС не позволяют описывать изменяющуюся в ходе процессов обработки мезо- и микроструктуру материалов, которые в значительной степени определяют физико-механические свойства металлов и сплавов и эксплуатационные характеристики изделий из них. В связи с этим начиная с 70-х годов XX века интенсивно развиваются физически-ориентированные многоуровневые конститутивные модели (КМ) [3–5].

В предлагаемом докладе подробно рассматриваются структура и соотношения трехуровневой (макро-, мезо-1 и мезо-2 уровни) физически-ориентированной КМ; особое внимание уделяется подмодели для описания взаимодействия дислокаций с границами зерен, субзерен. Приведены основные физические механизмы реализации процессов термомеханической обработки сплавов: движение и взаимодействие дислокаций друг с другом и другими дефектами кристаллической решетки (в том числе – с точечными дефектами), динамическая рекристаллизация, твердотельные фазовые превращения. Поскольку значительная часть технологий обработки металлов и сплавов осуществляется в режимах интенсивных неупругих деформаций, отдельно рассматривается вопрос о разложении движения на квазитвердое и деформационное. Приведена краткая справка о технологических процессах, в которых требуется применение многоуровневых КМ; отмечаются особенности постановок краевых задач исследования указанных процессов. Обсуждаются основные достоинства и недостатки физически-ориентированных КМ, в том числе – сложности алгоритмов их реализации, низкая вычислительная эффективность; предложен комбинированный подход, основанный на совместном применении макрофеноменологических и многоуровневых КМ. Отмечается возможность применения разработанной модели для определения технологических режимов создания функциональных материалов-изделий. Представлены некоторые результаты исследования процессов неупругого деформирования поликристаллических заготовок (сложного нагружения, влияния свободных границ, прерывистой пластичности). Показано, что разработанная трехуровневая КМ позволяет с достаточной точностью описывать некоторые установленные в макроэкспериментах эффекты.

Литература

[1] Ильюшин А.А. Пластичность. Ч.1. Упруго-пластические деформации – М.: Логос, 2004. – 388 с.

[2] Качанов Л.М. Основы теории пластичности – М.: Наука, 1969. – 420 с.

[3] Horstemeyer M.F. Multiscale modeling: A review // In «Practical Aspects of Computational Chemistry». J. Leszczynski and M.K. Shukla (eds.). – Springer Science + Business Media B.V., 2009. – P.87–135.

[4] Roters F. Advanced material models for the crystal plasticity finite element method: Development of a general CPFEM framework. – RWTH Aachen: Aachen, 2011. – 226 p.

[5] Трусов П. В., Швейкин А. И. Многоуровневые модели моно- и поликристаллических материалов: теория, алгоритмы, примеры применения. — Новосибирск: Издательство СО РАН, 2019. — 605 с.

ДИНАМИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ КОСМИЧЕСКИХ МГД СИСТЕМ

Фрик П.Г.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
frick@icmm.ru

Многие космические тела (планеты, звезды, пульсары, аккреционные диски, галактики и даже галактические кластеры) обладают крупномасштабными магнитными полями, возникающими в результате турбулентных течений проводящей жидкости (плазмы), то есть процессов, называемых магнитогидродинамическим (МГД) динамо. Будучи результатом очень сложного нелинейного процесса, эти магнитные поля имеют многомасштабную пространственную структуру и демонстрируют столь же сложную временную динамику. Непосредственно влияют на жизнь человечества магнитные поля Солнца и Земли, имеющие совершенно различную временную динамику. Солнечное динамо является квазипериодическим МГД процессом и задает 11-летний цикл активности Солнца. Магнитное поле Земли за время прямых наблюдений менялось слабо, хотя магнитные полюса непрерывно смещаются, уходя не слишком далеко от географических полюсов. Однако, палеомагнитные исследования свидетельствуют о том, что за время существования твердой Земли магнитное поле нашей планеты меняло свое направление около двух тысяч раз. Процесс переброса поля происходит по геологическим меркам очень быстро и называется инверсией, а временной интервал между двумя последующими инверсиями называют хроном. Продолжительность отдельных хронов меняется в широких пределах, от тысяч лет до 50 миллионов лет. Последовательность инверсий представляется случайной и каких-либо признанных подходов к прогнозу времени следующей инверсии на сегодня нет.

В докладе представлены новые результаты, полученные в рамках простейших динамических моделей и позволяющие понять долговременную вариабельность магнитных полей небесных тел. В первой части доклада на основе модифицированной модели Ю.Паркера солнечного динамо показано, как простая динамическая модель может воспроизвести основную структуру временного спектра солнечной активности, а не только основной цикл активности [1,2]. Во второй части доклада рассмотрен вязкий аналог модели двухдискового динамо Т.Рикитаке – первой модели, предложенной для воспроизведения случайной последовательности инверсий геомагнитного поля. Показано, что есть узкая область в пространстве параметров, в которой реализуются режимы редкоинверсного хаоса, отличающиеся очень длительными хронами [3]. Выявлена закономерность эволюции возмущений поля в пределах отдельного хрона, позволяющая предсказать время следующей инверсии магнитного поля [4].

Литература

[1] Frick P., Okatev R., Sokoloff D. Spectral properties of low-order dynamo systems // Russian Journal of Nonlinear Dynamics. – 2022. – V.18. N.2. – p.289-296..

[2] Okatev R., Sokoloff D., Frick P. Can the observable solar activity spectrum be reproduced by a simple dynamo model? // Geophysical and Astrophysical Fluid Dynamics. – 2023. – V.117. N.6. – p.437-454.

[3] Frick P., Pleshkov R. Rare-reversal chaos in two-disk dynamo models // Physical Review E, – 2024. – V.110. N.6. – 064203.

[4] Frick P., Pleshkov R. Rare-reversal chaos and predictability of next reversal in a simple dynamo model // Chaos. – 2025. – V.35. N.12. – doi: 10.1063/5.0295771

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

КОНТИНУАЛЬНОЕ ОПИСАНИЕ КОЛЛЕКТИВНОЙ ДИНАМИКИ СЕТЕЙ НЕЙРОНОВ С РАЗРЕЖЕННОЙ СИСТЕМОЙ СВЯЗЕЙ

Агеева М.В.[1], Голдобин Д.С.[1]

[1]*Институт механики сплошных сред Уро РАН, Пермь*
ageeva_mv00@mail.ru, denis.goldobin@gmail.com

К настоящему моменту задача описания возникновения гамма-ритмов в нейронных сетях головного мозга млекопитающих остается открытой. Традиционный подход к описанию динамики активности нейрона, связанный с использованием «диффузионного» приближения, уместен в ситуации «густых» сетей синаптических связей, однако оказывается неприменим там, где сеть разрежена. Таким образом, требуется разработка специального математического формализма, пригодного для описания эффектов, ненаблюдаемых в рамках диффузионного приближения.

Для однородной популяции нейронов в рамках модели среднего поля динамика популяции может быть описана с помощью функции плотности вероятности мембранного потенциала $P(V,t)$, временная эволюция которого описывается уравнением непрерывности

$$\frac{\partial P(V,t)}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial V}\Big[\left(I_0 + V^2\right)P(V,t)\Big] + K\nu\big[P(V+a,t) - P(V,t)\big]. \qquad (1)$$

Введем фазу колебаний:

$$\psi = 2\arctan\frac{V}{\sqrt{I_0}}, \qquad P(V) = \omega(\psi)\frac{2\sqrt{I_0}}{I_0 + V}. \qquad (2)$$

Осуществляя переход в Фурье-пространство

$$\omega(\psi,t) = \frac{1}{2\pi}\sum_{m=-\infty}^{+\infty} z_n e^{-in\psi},$$

и, с учетом (1) и (2), получим уравнение для динамики параметров порядка:

$$\dot{z}_n = i2n\sqrt{I_0}z_n + K\nu\left[\sum_{m=-\infty}^{+\infty} I_{nm}z_m - z_n\right].$$

Перейдем от параметров порядка Курамото к круговым кумулянтам $\{\kappa_n\}$ (КК). Некоторые задачи ранее уже были решены в рамках этого формализма, и адекватного описания системы удавалось достигать за счет только первых двух КК:

$$\dot{\kappa}_1 = i2\kappa_1 + K\tilde{\nu}\left[\frac{\zeta_1(1+\kappa_1)^2}{1-\zeta_1\kappa_1} + \frac{\zeta_1(1+\zeta_1)^2}{(1-\zeta_1\kappa_1)^3}\kappa_2\right],$$

$$\dot{\kappa}_2 = i4\kappa_2 + K\tilde{\nu}\left[\frac{\zeta_1^2(1+\kappa_1)^4}{(1-\zeta_1\kappa_1)^2} - \kappa_2\left(1 - \frac{2(1+\zeta_1)^2}{(1-\zeta_1\kappa_1)^2} + \frac{4(1+\zeta_1)^3}{(1-\zeta_1\kappa_1)^3} - \frac{3(1+\zeta_1)^4}{(1-\zeta_1\kappa_1)^4}\right)\right].$$

Литература

[1] Ageeva M. V., Goldobin D. S. Low-dimensional dynamics of a sparse balanced synaptic network of quadratic integrate-and-fire neurons // The European Physical Journal. Special Topics. – 2025.

О МЕТОДИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМАХ ИДЕНТИФИКАЦИИ И ВЕРИФИКАЦИИ УРАВНЕНИЙ СОСТОЯНИЯ МДТТ

Адамов А.А.

Институт механики сплошных сред УрО РАН
adamov@icmm.ru

В настоящее время растет существенный разрыв между возможностями численного анализа прикладных краевых задач для элементов конструкций и сооружений в различных МКЭ-системах (ANSYS, ABAQUS, др.) с обеспечением этих расчетов трёхмерными уравнениями состояния механики деформируемого твердого тела (МДТТ), идентифицированными для конкретных материалов в различных конкретных условиях их применения. Особенно актуальна эта проблема для неупругих материалов, обладающих различной реологией.

При разработке программ экспериментальной идентификации 3D-моделей МДТТ в заданной области работы исследуемого материала стараются обеспечить: 1. однородность реализуемого в представительных образцах материала напряженно-деформированного состояния (НДС); 2. измерение и регистрацию истории изменения всех факторов воздействия, ненулевых компонент тензоров напряжений и деформаций; 3. минимальную дисперсию и статистическую устойчивость результатов испытаний; 4. подтверждение корректности результатов измерения и обработки полученных данных.

Данная работа посвящена анализу различных методик испытаний, требующих внятного физического и математического аргументирования используемых методов, гипотез и допущений.

Рассмотрены методические примеры: оценка применимости моделей линейной вязкоупругости, идентифицированным по экспериментальным данным в ограниченном диапазоне времен наблюдения и частот воздействия [1]; идентификации модели слабосжимаемого эластомера по результатам испытаний образцов на ДМА-анализаторе при растяжении и сдвиге; определения объёмной сжимаемости полимеров по результатам испытаний на свободное и стесненное сжатие; некоррректности использования проявлений масштабного эффекта при идентификации модели изотропного континуума Коссера [2] и варианта градиентной теории упругости; экспериментального обоснования и верификации определяющих уравнений разномодульной теории упругости [3].

Литература

[1] Адамов А.А. Статистический подход к идентификации функций влияния в теории линейной вязкоупругости //Высокомолек. соед. - Сер.А. - 2002. - Т. 44, № 6. - с. 1-6.

[2] Адамов, А.А. О гипотезе однородности, масштабных параметрах длины и краевом эффекте для изотропного континуума Коссера //Механика композиционных материалов и конструкций. – 2010. – Т. 16, № 3. – с. 329-346.

[3] Адамов, А.А. Методические проблемы экспериментального обоснования и верификации определяющих уравнений разномодульной теории упругости //Прикладная механика и техническая физика. – 2020. – Т. 61, № 6(364). – с. 82-90.

ВЛИЯНИЕ НЕОДНОРОДНОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ПОДЛОЖКИ НА ПРОДОЛЬНЫЕ КОЛЕБАНИЯ КАПЛИ В ОГРАНИЧЕННОМ ОБЪЕМЕ

Алабужев А.А.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь
alabuzhev@icmm.ru

Множество экспериментов показывают, что неоднородность поверхности подложки оказывает существенное влияние как на течение жидкости, так и на движение линии контакта трех сред [1–3]. Неоднородность может быть как естественно-го, так и искусственного происхождения, и представлять собой либо рельеф поверхности – шероховатость (бугорки, бороздки, каверны и пр.), либо разные материалы, различающиеся, например, по свойствам смачивания. В работе [1] упоминалось, что шероховатость поверхности подложки приводит к явлению гистерезису краевого угла и дальнейшая шлифовка поверхности приводит к исчезновению этого явления.

В данной работе рассматривается влияние свойств подложек на динамику капли в вибрационном поле. Исследуются собственные и вынужденные колебания капли жидкости, окруженной другой жидкостью в цилиндрическом сосуде конечного объёма. В равновесном состоянии капля имеет форму цилиндра и ограничена в осевом направлении двумя параллельными твердыми поверхностями. Учитывается динамика линии контакта трех сред (капля–жидкость–твердая поверхность): скорость движения контактной линии пропорциональная отклонению краевого угла от его равновесного значения. Коэффициент пропорциональности (параметр смачивания) является функцией координат поверхности подложки, что позволяет рассматривать эту поверхность как неоднородную [4,5]. На сосуд действует вибрационная сила, которая направлена вдоль оси симметрии сосуда. Такие вибрации воз-блуждают только осесимметричные колебания капли, но из-за неоднородности будут возбуждаться азимутальные моды, спектр которых определяется видом неоднородности. Исследована зависимость частот и декрементов затухания собственных колебаний от параметров задачи. Показано, что неоднородность качественно меняет эти зависимости по сравнению с случаем однородной поверхности. При исследовании вынужденных колебаний обнаружены хорошо заметные резонансные эффекты. Показано, что присутствуют резонансные частоты азимутальных мод.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (бюджетная тема No 121031700169-1)

Литература

[1] Dussan V E.B. On the spreading of liquids on solid surfaces: static and dynamic contact lines // Ann. Rev. Fluid Mech. – 1979. – vol. 11. – p. 371–400.

[2] де Жен П.Ж. Смачивание: статика и динамика // УФН. – 1987. –т. 151. Вып. 4. – с. 619-681.

[3] Erbil H.Y. The debate on the dependence of ap-parent contact angles on drop contact area or three-phase contact line: A review // Surface Science Reports. – 2014. – vol. 69. – p. 325-365.

[4] Алабужев А. А. Поведение цилиндрического пузырька под действием вибраций // Вычисл. мех. сплош. сред. – 2014. – т.7, № 2. – с. 151-161.

[5] Pyankova M. A., Alabuzhev A. A. Influence of the properties of the plate surface on the oscillations of the cramped drop // Phys. Fluids. –2022. –v. 34. – 092015.

ИЗГИБ КРУГЛОЙ МИКРО-ПЛАСТИНЫ

Аптуков В.Н. [1]

[1]*Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь*
aptukov@psu.ru

Упругую деформацию микрообъектов принято описывать в рамках градиентных теорий упругости, основной особенностью которых является учет не только деформаций, но и их пространственных производных в определяющих соотношениях [1]. Микрообъекты, в частности, микро-пластины находят применение в различных микро- или нано-электромеханических системах, композиционных материалах [2] и др. [3]. Практическое применение градиентных моделей затруднительно из-за усложненной математической постановки, наличия дополнительных параметров физических уравнений, требующих идентификации, что также является нетривиальной задачей. В связи с этим применяются упрощенные уравнения градиентной теории упругости, в частности, однопараметрическая модель Айфантиса [4]. Уравнение изгиба круглой микро-пластины для принятых гипотез Кирхгофа и модели Айфантиса имеет вид [5]

$$D\nabla^4 w(r,\theta) - Dg^2\nabla^6 w(r,\theta) - q(r,\theta) = 0$$

где g – градиентный параметр; w – прогиб микро-пластины.
В настоящей работе получено общее решение уравнения изгиба в аналитической форме и корни характеристического уравнения в зависимости от градиентного параметра. Получены зависимости прогиба свободно опертой и жестко-защемленной микро-пластины при действии сосредоточенной силы в ее центре. Результаты могут использоваться при экспериментальной идентификации градиентного параметра для круглой микро-пластинки конкретных размеров.

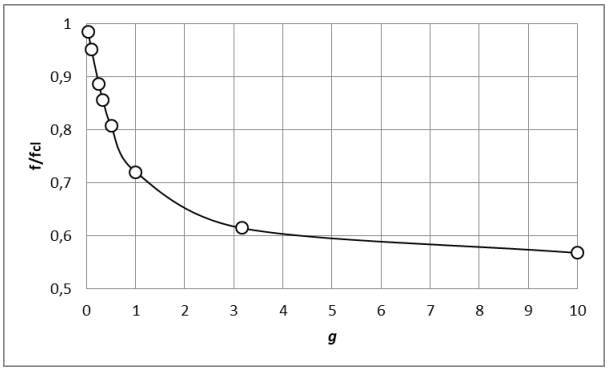


Рис. 1. Зависимость отношений максимальных прогибов для градиентного и классического вариантов теории упругости от величины градиентного параметра

Литература

[1] Mindlin R. D. and Eshel N. N. On first strain-gradient theories in linear elasticity // Int. J. Solids Struct. – 1968. – V 4. – pp. 109–124.
[2] Fruchart D., Skryabina N., Aptukov V. Why mechanical texture improves magnesium hydrogenation kinetics? // International Journal of Hydrogen Energy. – 2025. – V 149. – pp. 150061.
[3] Аптуков В.Н., Скрябина Н.Е., Фрушар Д. Анализ упругих деформаций, индуцированных гидридным превращением в магнии, в рамках градиентной теории упругости // Вестник ПНИПУ. Механика. – 2025. - № 3. – С. 19–28.
[4] Altan B.S., Aifantis E.C. On Some Aspects in the Special Theory of Gradient Elasticity // Journal of the Mechanical Behavior of Materials. – 1997. – V. 8. – N 3. – pp. 231–282.
[5] Papargyri-Beskou S. and Beskos D. E. Static, stability and dynamic analysis of gradient elastic flexural Kirchhoff plates // Arch. Appl. Mech. – 2008. – V 78. – pp. 625–635.

О ВЛИЯНИИ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ПОВЕДЕНИЕ АНИЗОТРОПНЫХ КОМПОЗИТОВ С ТРЕЩИНАМИ

Бабешко В.А. [1], Евдокимова О.В. [2], Бабешко О.М. [1], Телятников И.С. [2], Евдокимов В.С. [1], Плужник А.В. [2], Лозовой В.В. [2]

[1]*Кубанский государственный университет, Краснодар*
[2]*Южный научный центр,Ростов-на-Дону*
babeshko41@mail.ru, evljrivjdf.olga@mail.ru, babeshko49@mail.ru, ilux_t@list.ru, evdok_vova@mail.ru, ramblersochi@rambler.ru, niva_kgu@mail.ru,

В работе впервые строгим механико-математическим подходом исследуется вопрос о поведении анизотропного композитного материала, содержащего трещины Гриффитса при нестационарных воздействиях. С этой целью рассматривается динамическая смешанная задача о нестационарном воздействии на берега полубесконечной трещины Гриффитса в композитной среде. Предполагается, что трещина расположена в полупространстве параллельно ее границе. Принято, что трещиноватая среда описывается соответствующими дифференциальными уравнениями с постоянными коэффициентами. Механические воздействия на берега трещины описываются функцией, непрерывно зависящей от параметра времени и геометрического параметра координатной системы, что позволяет учитывать реальное нестационарное воздействие на трещину, вызванную внешними факторами.

Предполагается, что воздействие осуществляется на протяжении полубесконечного интервала времени, начиная с нулевых начальных условий.

Традиционно подобные динамические смешанные задачи рассматриваются в условиях гармонического воздействия во времени, и решаются применением разложения временной зависимости искомых функций в ряд или интеграл Фурье. После этого рассматривается смешанная задача с исключенными функциями, содержащими параметр времени. Однако известно, что такие ряды Фурье не эффективно описывают процессы, сопровождающиеся нарушением гладкости функций, в частности, при наличии в них особенностей. Такие задача решалась последовательно, вначале в геометрических параметрах, затем исследовалась временная зависимость. Это не позволяло вскрывать тонкие особенности зависимости решений от параметра времени. В настоящем докладе этот недостаток устраняется. Рассмотрен случай трехмерной задачи, в которой равноправно входят геометрический и временной параметры. Смешанная задача приводится к двумерному интегральному уравнению Винера-Хопфа, для решения которого недавно разработан строгий математический метод [1]. Полученное решение, зависящее от геометрических и временного параметров, позволило выявить ранее не описанный эффект всплеска в начальный момент коэффициента интенсивности напряжений в вершине трещины. Установлено, что зависящий от времени коэффициент интенсивности напряжений в вершине трещины в результате нестационарного воздействия может неограниченно расти в начальный момент, разрушая трещину. Результат объясняет ранее не описанный, строго доказанный математически, факт разрушения анизотропных композитов, содержащих трещины и дефекты, описываемые уравнениями трещин Гриффитса.

Работа выполнена по Госзаданию ЮНЦ РАН на 2026 год, проект, госрегистрация 125011200152-6.

Литература

[1] Babeshko V.A., Evdokimova O.V., Evdokimova V.S, Babeshko O.M. The mechanical concept of earthquakes in mountainous, fractured territories. Acta Mechanica (2025) hpps//doi.org/10.1007/s00707-025-04470-y].

ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛИ ВОЗВРАТА К ОПИСАНИЮ МЕХАНИЗМОВ ОБРАЗОВАНИЯ ЗАРОДЫШЕЙ РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИИ В СПЛАВЕ INCONEL 718

Балдин М.Н. [1], Кондратьев Н.С.[1], Безверхий Д.С.[1]

[1]*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь*
mnbaldin@pstu.ru, kondratev@pstu.ru, bezverkhyds@yandex.ru

Технологические процессы обработки металлов и сплавов давлением часто являются многостадийными, где интенсивная пластическая деформация сопровождается последующей термической обработкой [1]. С точки зрения эволюции зеренной структуры наиболее существенные изменения происходят в результате рекристаллизации [2]. Интенсивность рекристаллизации существенным образом зависит от процессов образования зародышей рекристаллизации. В рамках данной работы исследуются два основных механизма формирования зародышей рекристаллизации в сплаве Inconel 718: основанный на миграции исходных участков большеугловой границы (англ. strain induced boundary migration (SIBM)) и основанный на формировании зародышей рекристаллизации вблизи крупных частиц вторичных фаз (англ. particle stimulated nucleation (PSN)) [3]. Укрупнение субзёрен способствует формированию зародышей рекристаллизации как по механизму SIBM, так и PSN. Возможными механизмами укрупнения субзерен являются процессы возврата, включающие в себя коалесценцию субзёрен и миграцию малоугловых границ [3].

Ранее авторами работы был предложен способ учета процессов коалесценции субзерен и миграции малоугловых границ в рамках модифицированной многоуровневой статистической модели неупругого деформирования [4, 5]. Для описания локальных взаимодействий соседних субзерен, учёта их размеров и формы задавалась полиэдрическая субзеренная структура.

В рамках настоящей работы было проведено исследование влияния процессов возврата (коалесценции субзёрен и миграции малоугловых границ) на формирование зародышей рекристаллизации с учётом механизмов SIBM и PSN. При описании процессов учитывалось расположение субзёрен вблизи большеугловых границ зёрен и вблизи частиц дельта фазы. Частицы вторичной фазы вводились в модель явным образом на уровне представительного объёма субзёрен. В результате применения модели были получены оценки для числа появившихся зародышей рекристаллизации и объёмной доли рекристаллизованного материала на начальном этапе процесса отжига.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-00460, https://rscf.ru/project/25-29-00460/.

Литература

[1] Zhao J., Jiang Z. Thermomechanical processing of advanced high strength steels //Progress in Materials Science. – 2018. – Т. 94. – С. 174-242.

[2] Zhang J. et al. Dynamic recrystallization mechanisms of 2195 aluminum alloy during medium/high temperature compression deformation //Materials Science and Engineering: A. – 2021. – Т. 804. – С. 140650.

[3] Rollett A., Rohrer G.S., Humphreys J. Recrystallization and related annealing phenomena. – Oxford: Elsevier, 2017. – 734 p.

[4] Kondratev N. et al. Subgrain coalescence simulation by means of an advanced statistical model of inelastic deformation //Materials. – 2022. – Т. 15. – №. 15. – С. 5406.

[5] Kondratev, N.S.; Bezverkhy, D.S.; Baldin, M.N. Modeling subgrain structure evolution during heat treatment. *Contin. Mech. Thermodyn.* 2026; *in progress*.

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТАДИЙНОСТИ ПОВРЕЖДЕННОСТИ МЕТОДАМИ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ И РЕНТГЕНОВСКОЙ ТОМОГРАФИИ

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

Институт механики сплошных сред Уральского отделения РАН, Пермь
mbannikov@icmm.ru

Прогнозирование разрушения полимерных композиционных материалов (ПКМ) является сложной научно-технической задачей, поскольку прочность материала определяется не единичным дефектом, а коллективным поведением ансамбля повреждений. Цель данной работы — установление стадийности перехода от накопления микроповреждений к макроразрушению при циклическом нагружении на основе анализа интегральных структурных характеристик материала.

В работе применен комплексный подход к мониторингу повреждений, сочетающий метод цифровой корреляции изображений (DIC), регистрацию сигналов акустической эмиссии (АЭ) в процессе испытаний и последующую микротомографию зон концентрации напряжений. Эксперименты проводились в условиях блочного циклического нагружения. Анализ полей деформации, полученных методом DIC, позволил идентифицировать критические стадии перехода материала к разрушению. Для пороговой сегментации и кластерного анализа дефектов применялись байесовские модели гауссовских смесей, которые показали, что механическое нагружение приводит к формированию статистически различных кластеров мелких и крупных пор [1-2].

Экспериментально подтверждено, что сигналы АЭ регистрируются уже в упругой области нагружения, фиксируя начало обратимых структурных изменений. Параметры сигналов (амплитуда, частота, длительность) коррелируют с природой источников повреждений. Показано, что различные механизмы разрушения (разрыв волокон, трещинообразование в матрице, расслоение) соответствуют характерным амплитудно-частотным характеристикам, что позволяет проводить идентификацию типа дефекта в реальном времени.

Предлагаемая методика неразрушающего контроля, основанная на количественном анализе акустических свойств материала, может быть адаптирована для серийных испытаний изделий из ПКМ с использованием минимального числа каналов регистрации. Это позволяет значительно сократить время контрольных мероприятий при сохранении высокой достоверности оценки технического состояния материала.

Литература

1. Ignatova, A.M., Balakhnin, A.N., Bannikov, M.V., Kuper, K.E., Nikitiuk, A.S. & Naimark, O.B. (2022) Technique for obtaining an integral characteristic of the structure of a loaded composite material based on microtomographic research data. Procedia Structural Integrity. 41, 550–556. DOI: https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.05.063
2. Bannikov, M., Bayandin, Y., Nikityuk, A., Uvarov, S., & Naimark, O. (2025). Experimental field analysis of damage-failure transition in composite material with a stress concentrator under cyclic loading (application of DIC and X-ray tomography techniques). Fracture and Structural Integrity, 20(75), 238–249. https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.75.17

Работа выполнена в рамках проекта РНФ № 25-29-01424

РАСЧЕТ ЦИКЛИЧЕСКОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ПОДВЕСКИ АВИАЦИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ НАГРУЗОК ТИПОВОГО ПОЛЕТНОГО ЦИКЛА

Басанов Е.А., Келлер И.Э.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
evgen.basanov@gmail.com, kie@icmm.ru

Обеспечение циклической долговечности узлов подвески авиационных двигателей является критической задачей, так как внешние нагрузки носят случайный характер. Существуют методы схематизации процессов нагружения, такие как метод полных циклов (МПЦ), метод «дождя» (RainFlow), которые показывают различные результаты при расчетах, поэтому актуальным в настоящее время является верификация применимости таких методов для конкретных материалов и конструкций, в частности для сплава ЭП-517-Ш в подвеске авиационного двигателя [1].

В работе установлены закономерности влияния методов схематизации случайных процессов нагружения на оценку усталостной долговечности элементов подвески. Для этого были решены задачи по реализации алгоритмов обработки спектра методами МПЦ, RainFlow, а также модифицированным методом полных циклов (ММПЦ) [2]. Проведен конечно-элементный анализ (КЭА) напряженного состояния в пакете ANSYS для различных посадочных зазоров, определены параметры долговечности, а также проведена верификация полученных результатов при циклических испытаниях натурных образцов.

В ходе исследования в среде Excel VBA были разработаны программы, реализующие три метода схематизации типового полетного цикла. Сравнительный анализ показал, что ММПЦ воспроизводит эталонный алгоритм RainFlow с погрешностью не более 3%, при меньшей вычислительной сложности, в то время как классический МПЦ демонстрирует погрешность до 10%. Расчеты в среде ANSYS выявили высокую чувствительность напряженного состояния к величине посадочных зазоров: при неблагоприятных посадках эквивалентные напряжения в проушинах возрастают на 9-11%, что приводит к снижению прогнозного ресурса более чес в два раза. Долговечность оценивалась по билинейной кривой малоцикловой-многоцикловой усталости (М-МЦУ) и по формуле Менсона [3].

Верификация разработанной методики проводилась путем циклических испытаний натурных образцов усиленной тяги со втулкой при максимальной эксплуатационной нагрузке 17600 кгс. Экспериментальная наработка образцов (70463 и 127972 циклов) подтвердила консервативность расчетного прогноза (46584 цикла для неблагоприятных посадок), что доказывает достаточность заложенных коэффициентов запаса и адекватность выбранной модели.

Таким образом, в работе обоснован модифицированный метод полных циклов – как оптимальный алгоритм для инженерных расчетов подвески авиационного двигателя, при этом представленная в работе методика автоматизированных вычислительных шаблонов в среде Excel, позволяет оперативно оценивать влияние посадочных зазоров на ресурс узлов авиадвигателя, а также корректировать допуски на этапе проектирования, что является экономичным и влияет на повышение долговечности ответственных деталей.

Литература

[1] ГОСТ 25.101-83 Методы схематизации случайных процессов нагружения элементов машин и конструкции и статического представления результатов. – М., 1983. 25с.

[2] Вронский Г.В Модифицированный метода полных циклов и схематизация многомерных процессов нагружения //Ученые записки ЦАГИ. – Москва, 2015. – 25с.

[3] Ю.А. Ножницкий, «Нормы прочности авиационных газотурбинных двигателей гражданской авиации» / Р.А. Дульнев, В.К. Куевда, Ю.А. Ножницкий – Москва: ЦИАМ, 2004. – 254с.

ОЦЕНКА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В МЕТАЛЛАХ В ПРОЦЕССЕ ЛАЗЕРНОЙ УДАРНОЙ ПРОКОВКИ

Бахматов С.М.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь
bahmatovs2002@gmail.com

Лазерная ударная проковка является эффективным бесконтактным методом поверхностного упрочнения металлических конструкций. Воздействие короткого высокоэнергетического лазерного импульса индуцирует в материале ударную волну, вызывающую пластические деформации и формирование в поверхностном слое сжимающих остаточных напряжений, что существенно повышает усталостную долговечность и износостойкость изделий [1, 2]. Численное моделирование данного процесса в полной динамической упругопластической постановке является трудоемкой задачей, требующей значительных вычислительных ресурсов, что ограничивает его применение в инженерной практике. В работе представлены алгоритм и верификация упрощенной методики расчета поля остаточных напряжений, основанной на гипотезе о возможности исключения динамического этапа расчета полей пластического деформирования.

Идея упрощенного расчета базируется на замене известного поля пластических деформаций эквивалентным полем температурных деформаций [3]. Тензор пластических деформаций, полученный из динамического решения, аппроксимируется тензором ортотропного температурного расширения.

Верификация методики выполнялась для образца из титанового сплава ВТ6 в форме пластины. На первом этапе в модуле пакета LS-DYNA решалась динамическая задача о воздействии единичного лазерного импульса (модель материала Джонсона-Кука) и определялось поле пластических деформаций. Анализ профиля упругопластической волны подтвердил возникновение пластических деформаций: максимальные сжимающие напряжения превысили динамический предел упругости материала (1500 МПа). На основе полученного поля пластических деформаций объем области упрочнения был разбит на 8 секторов. Для каждого сектора были усреднены компоненты пластических деформаций и рассчитаны соответствующие компоненты ортотропного коэффициентов температурного расширения. Финальный этап — статический расчет в модуле ANSYS Static Structural, где путем нагрева секторизованной области на $\Delta T=0.001°C$ смоделировано поле остаточных напряжений.

Сравнительный анализ полей остаточных напряжений, полученных двумя методами, показал, что предложенная упрощенная методика позволяет корректно оценить качественный характер распределения напряжений как на поверхности, так и по глубине образца, также наблюдается удовлетворительное количественное соответствие результатов вблизи обработанной поверхности. Однако, некоторые несоответствия полей напряжений объясняются укрупненным разбиением области упрочнений, которые в дальнейших исследованиях необходимо увеличить на большее количество секторов при расчете.

Литература

[1] Gachegova E. et al. The Influence of Absorbing Coating Material on the Efficiency of Laser Shock Peening // Metals. 2024. Vol. 14. Art. 1045.

[2] Fabbro R. et al. Physical study of laser-produced plasma in confined geometry // J. Appl. Phys. 1990. Vol. 68. P. 775–784.

[3] Joon T. S., Korsunsky A. M. Evaluation of residual stresses and strains using the Eigenstrain Reconstruction Method // Int. J. Solids Struct. 2010. Vol. 47, No. 13. P. 1678–1686.

МНОГОУРОВНЕВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИИ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ПОВЕДЕНИЯ АЛЮМИНИЕВО-МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ ПРИ ГОРЯЧЕМ ДЕФОРМИРОВАНИИ

Безверхий Д.С., Балдин М.Н., Кондратьев Н.С., Шарифуллина Э.Р., Гошкодер А.А.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
dsbezverkhijj@pstu.ru, mnbaldin@pstu.ru, kondratev@pstu.ru, ersharifullina@pstu.ru, goshkoder.a@mail.ru

Алюминиево-магниевые сплавы широко применяются в авиационной, автомобильной и машиностроительной отраслях промышленности [1]. Для изготовления заготовок изделий и конструкций применяются различные методы обработки давлением: прокатка, штамповка, осадка, волочение и другие. Формирование требуемых прочностных свойств изделий при горячей обработке давлением неотделимо от состояния микроструктуры материала, ключевыми механизмами эволюции которой являются возврат и рекристаллизация [1, 2]. Современным подходом для адекватного и корректного прогнозирования микроструктуры и свойств изделий является разработка и применение физически обоснованных многоуровневых моделей, учитывающих основные механизмы перестроения микроструктуры на различных масштабах [3, 4].

В работе представлена модификация статистической многоуровневой модели для описания процессов рекристаллизации и возврата, протекающих при горячей деформации алюминиево-магниевых сплавов. В модели учитываются два конкурирующих механизма образования новых зерен: классическое зарождение на границах зерен по механизму Бэйли–Хирша и зарождение на крупных частицах вторичных фаз. Мелкие частицы вторичных фаз оказывают тормозящее влияние на миграцию границ зерен (пиннинг-эффект). Для анализа эволюции морфологии зерен разработана геометрическая подмодель, аппроксимирующая форму зерна эллипсоидом, поверхность которого представляется набором плоских фасеток. Данная подмодель позволяет прогнозировать эволюцию формы зерна от вытянутой к равноосной в процессе рекристаллизации и оценить его сферичность. В работе осуществлено моделирование одноосного сжатия поликристалла алюминиево-магниевого сплава 5182. Результаты моделирования имеют количественное соответствие с экспериментальными данными по диаграммам напряженно-деформированного состояния, доле рекристаллизованного материала, распределению размеров зерен и эволюции кристаллографических текстур.

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

Литература

[1] Maizza G. et al., Continuous dynamic recrystallization (CDRX) model for aluminum alloys //Journal of materials science. – 2018. – т. 53, № 6. – с. 4563-4573.

[2] Sakai T. et al., Dynamic and post-dynamic recrystallization under hot, cold and severe plastic deformation conditions //Progress in materials science. – 2014. – т. 60. – с. 130-207.

[3] Huang K.E., Logé R.E., A review of dynamic recrystallization phenomena in metallic materials // Materials & Design. – 2016. – т. 111. – с. 548-574.

[4] Trusov P.V. et al., Multilevel models in physical mesomechanics of metals and alloys: results and prospects //Physical Mesomechanics. – 2021. – т. 24, №. 4. – с. 391-417.

ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА В УСЛОВИЯХ ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ

Беляева А. В.[1], Сухановский А. Н.[1], Легенький Н. М.[1]
[1] *Институт механики сплошных сред УрО РАН*
legenkii.n@icmm.ru

Диоксид углерода (CO_2) является основным парниковым газом, причем его концентрация значительно возросла по сравнению с доиндустриальным периодом и продолжает увеличиваться с каждым годом [1]. В условиях городской среды основными источниками углекислого газа являются автомобильный транспорт, промышленность и системы отопления [2-3]. Для исследования распределения и переноса углекислого газа можно рассматривать его как распределенную примесь. Городская геометрия является важным фактором, определяющим появления застойных зон примеси, и коридоров для активного проветривания [4]. Ключевой задачей в изучении процесса переноса примесей является представление о пространственном распределении ее концентрации. Проведение натурных измерений на масштабе города сопряжено со значительными трудностями. В качестве альтернативы предлагается использовать лабораторный эксперимент, позволяющий проводить контролируемые и воспроизводимые исследования. Так, в [5-6] было выполнено лабораторное моделирование процесса распространения тяжелой примеси на трехмерном макете части города Перми. Реализованный подход позволил установить, что рельеф местности и расположение зданий являются ключевыми факторами, которые определяют поле концентрации. В частности, было обнаружено формирование застойных зон, что качественно согласуется с результатами, полученными в [7]. В данной работе представлены результаты натурных измерений в различных районах г. Пермь, специально выбранных для изучения влияния таких факторов, как высота рельефа, плотность застройки и интенсивность движения автотранспорта на распространение CO_2, включая зону, рассматриваемую в [5-6]. Измерения проводились для двух режимов времени, которые соответствовали предполагаемым периодам с максимальной и минимальной концентрацией. По итогам проведенного исследования были получены полевые данные, отражающие реальное распределение CO_2 в пределах г. Перми. Результаты, полученные в ходе исследования, могут быть полезны для оценки применимости лабораторных и математических моделей, используемых для изучения экологической комфортности городов.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 124012300246-9)

Литература

[1] Makarova M. et al. Trends of key greenhouse gases as measured in 2009–2022 at the FTIR station of St. Petersburg State University //Remote Sensing. – 2024. – Т. 16. – №. 11. – С. 1996.
[2] Rice A., Bostrom G. Measurements of carbon dioxide in an Oregon metropolitan region //Atmospheric Environment. – 2011. – Т. 45. – №. 5. – С. 1138-1144.
[3] Lan L. et al. Assessment of urban CO2 measurement and source at-tribution in Munich based on TDLAS-WMS and trajectory analysis //Atmosphere. – 2020. – Т. 11. – №. 1. – С. 58.
[4] Lietzke B., Vogt R. Variability of CO2 concentrations and flux-es in and above an urban street canyon //Atmospheric environment. – 2013. – Т. 74. – С. 60-72.
[5] Евграфова А. В., Сухановский А. Н. Конвективный перенос условной примеси в пределах городской геометрии //Вестник Пермского университета. Серия: Физика. – 2023. – №. 2. – С. 14-21.
[6] Evgrafova A., Sukhanovskii A. Laboratory modeling of pollution dispersion in an urban area with complex surface relief // Modeling Earth Systems and Environment, (2026) Vol.12, Article number 86
[7] Gratani L., Varone L. Daily and seasonal variation of CO2 in the city of Rome in relationship with the traffic volume //Atmospheric Environment. – 2005. – Т. 39. – №. 14. – С. 2619-2624.

ЛАБОРАТОРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНВЕКТИВНОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ В УСЛОВИЯХ ГОРОДСКОЙ ЗАСТРОЙКИ

Беляева А. В. [1], Сухановский А. Н. [1], Попова Е. Н.[1], Легенький Н. М.[1]

[1]*Институт механики сплошных сред ПФИЦ УрО РАН, Пермь*
bav@icmm.ru

Городская застройка оказывает существенное влияние на локальную атмосферную циркуляцию, изменяя микроклиматические условия и процессы рассеивания загрязняющих веществ. Для изучения воздушных потоков над урбанизированными территориями применяются различные подходы, включая эксперименты в аэродинамических трубах [1-2] и прямое численное моделирование [3]. Однако, каждый из этих методов сопряжен с определенными ограничениями, которые обусловлены как высокой вычислительной сложностью, так и значительными затратами ресурсов при проведении лабораторных исследований. В качестве альтернативы традиционным методам в настоящем исследовании предложено лабораторное моделирование с использованием макета города. Структура и характеристики турбулентных течений на масштабе города определяются эффективными значениями числа Рейнольдса, которые из-за высоких значений турбулентной вязкости относительно небольшие (порядка 10^3). Предполагается, что структура ламинарных и турбулентных течений в близкой геометрии будут качественно подобны при близких значениях чисел Рейнольдса в лабораторной модели и эффективных чисел Рейнольдса в реальных условиях. Подробно данный подход описан и обоснован в [4-5]. В качестве модели был использован детализированный макет части города Пермь (масштаб 1:4000). В лабораторном эксперименте исследовалось влияние городской застройки на крупномасштабное конвективное течение, создаваемое протяженным линейным нагревателем. Такая схема позволяет моделировать внешнюю циркуляцию в условиях слабого западного ветра, наиболее типичного для Перми. Сравнение с гладкой поверхностью показало, что городской рельеф подавляет крупномасштабную циркуляцию, которая локализуется преимущественно над застройкой, и создает выраженную пространственную неоднородность потока. Корреляционный анализ выявил значимую связь между горизонтальной скоростью течения и высотой рельефа (коэффициент 0.49–0.53), тогда как корреляция с высотой зданий отсутствует.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 124012300246-9)

Литература

[1] Zaki, S.A., Hagishima, A., Tanimoto, J., and Ikegaya, N., Aerodynamic Parameters of Urban Building Arrays with Random Geometries// Boundary-Layer Meteoro. – 2012. – V. 138. - pp. 99–120.

[2] Carpentieri, M. and Robins, A.G., Influence of Urban Morphology on Air Flow over Building Arrays // J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. – 2015. – V. 145. pp. 61–74.

[3] Zonato, A., Martilli, A., Santiago, J.L., Zardi, D., and Giovannini, L., On a New One-Dimensional k–ε Turbulence Closure for Building-Induced Drag //Q. J. R. Meteorol. Soc. – 2023. – V. 149. – №. 754. - pp. 1674–1689.

[4] Evgrafova, A. and Sukhanovskii, A., Convective Transfer of a Conditional Admixture within Urban Geometry // Bull. Perm Univ. Phys. – 2023. – №. 2. –pp. 14–21.

[5] Evgrafova, A. and Sukhanovskii, A., Influence of Terrain Features on Heat Transfer Processes within the Urban Area // Interfac. Phenom. Heat Transf. –2025. –V. 13. – №. 4. –pp. 15–29

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ЭЛАСТИЧНОГО ПОДВИЖНОГО СОЕДИНЕНИЯ ИЗ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИМЕРНЫХ МАТРИЦ

Беспалов М.В.[1,2], Зайцев А.В.[1], Ощепкова М.Ю.[2]

[1]*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь,*
[2]*ПАО «Научно-производственное объединение «Искра», Пермь*
krakenlol90@gmail.com

Высокая прочность, малый удельный вес, коррозионная стойкость и возможность создания изделий сложной геометрии делают композиты на основе полимерных матриц одними из самых востребованных материалов. Благодаря этим свойствам угле-, органо- и стеклопластики находят широкое применение в авиастроении, автомобилестроении, аэрокосмической отрасли и других отраслях высокотехнологичной индустрии. Решение актуальных задач обратного инжиниринга и оптимизации конструкций связано с заменой максимально возможного количества металлических элементов в существующих и выполняющих свою функциональную роль конструкциях на композитные.

Снижение массы подвижного соединения (эластичного опорного шарнира) конструкции возможно при замене штатных металлических ребер жесткости на элементы, изготовленные из композитов на основе полимерных матриц. Проведен сравнительный анализ экспериментальных результатов на двухосное растяжение тканей полотняного (саржа 1/1 с равными рапортами по основе и утку) и саржевого (2×2) плетения на основе стеклянных, арамидных и углеродных нитей), используемых в качестве армирующего наполнителя для создаваемых композитов. По результатам этого анализа для дальнейших исследований обоснованно выбраны углеродные ткани из высокопрочных волокон.

С целью улучшения адгезионного взаимодействия на границе волокно-матрица предложен метод химической активации наполнителя водным раствором роданида железа $Fe(CNS)_3$. Экспериментально установлена оптимальная концентрация (5 % масс.) раствора, обеспечивающая максимальное возможное проникновение матрицы в нити тканого наполнителя. Разработана методика подготовки образцов и проведены сравнительные испытания углепластика на основе эпоксидного связующего ЭДТ-10 и углеродной ткани полотняного и саржевого плетения (высокопрочные нити).

Результаты механических испытаний на одноосное растяжение и трехточечный изгиб подтвердили эффективность предварительной пропитки тканого армирующего наполнителя раствором роданида железа $Fe(CNS)_3$. Так, например, прочность при одноосном растяжении и трехточечном изгибе возросла в среднем на 18–20 % по сравнению с контрольными образцами, изготовленными из материалов с «традиционными» условиями пропитки эпоксидным связующим ЭДТ-10. Кроме того, результаты проведенного анализа микроструктуры материалов показали снижение открытой пористости. Однако проблема снижения внутренней закрытой пористости (наличие замкнутых областей в месте соприкосновения искривленных нитей основы и утка, которые недоступны для проникновения связующего) так и осталась нерешенной. Это, в свою очередь, не позволило достичь требуемый уровень прочностных свойств. Недостаточные коэффициенты запаса пока не позволили провести полноценную замену стальных ребер жесткости в силовых элементах шарнира на элементы, изготовленные из композитов на основе полимерных матриц. Возможный вариант решения этой проблемы – применение высокомодульных углеродных тканых наполнителей на основе ПАН-прекурсоров.

ТЕРМОМЕХАНИКА ТЕРМОПЛАСТИЧНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ АНТИФРИКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

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

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
anstasia_pankova@mail.ru, anna_kamenskih@mail.ru, ura.4132@yandex.ru

Термопластичные полимерные и полимерно-композиционные материалы широко применяются в машиностроении, строительстве, биомедицине, авиации, топливно-энергетическом комплексе, недропользовании и других отраслях. К ним относятся политетрафторэтилен (ПТФЭ), сверхвысокомолекулярные полиэтилены (СВМПЭ), модифицированные и композиционные материалы на их основе. Одним из широко распространенных материалов является ПТФЭ, который занимает лидирующие позиции (около 60 % мирового рынка). СВМПЭ также активно применяется в науке и технике (на текущий момент рынок СВМПЭ насчитывает 1,87 миллиарда долларов по данным «Grand View Research», к 2030 году прогнозируется рост на 11,3 %) [1, 2]. Прогресс в области материаловедения позволил сформировать достаточно большой набор альтернатив ПТФЭ и СВМПЭ для использования в качестве антифрикционных покрытий и прослоек. Из них выделяют материалы линейки Арфлон (ООО «Научно-производственное предприятие «Арфлон», Москва, Россия) и материал Суперфлувис SF-1 (ОАО «Гродненский механический завод», г. Гродно, Республика Беларусь).

В рамках текущего исследования выполнена серия экспериментов в рамках динамического механического анализа прямоугольных образцов из промышленных заготовок слоев скольжения опорных частей мостов по схеме трехточечного изгиба. Определена область линейной вязкоупругости материалов, получены зависимости модуля накопления, модуля потерь и тангенса угла механических потерь в диапазоне температур эксплуатации мостовых сооружения от −40 до +80 °C. Исследования выполнены на базе лаборатории пластмасс ПНИПУ.

В рамках первого приближения для описания поведения материала выбрана модель Максвелла, которая реализована с использованием рядов Prony [3]. Выполнен сравнительный анализ поведения сферической опорной части Л-100 ООО «АльфаТех» г. Пермь при использовании в качестве сферической антифрикционной прослойки материалов линейки Арфлон AR-200, AR-202, AR-204 и Суперфлувис SF-1 в сравнении с широко используемыми материалами ПТФЭ, СВМПЭ и композита на основе ПТФЭ МАК (Ф4БР40М2). Установлены функциональные зависимости параметров контакта и напряженно-деформированного состояния от температуры при статическом и периодическом нагружении.

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

Литература

[1] Alaraby M., Abass D., Velázquez A., Hernández A., Marcos R. Polytetrafluoroethylene microplastic properties, pollution, toxicity and analysis: a review // Environmental Chemistry Letters. – 2025. https://doi.org/10.1007/s10311-025-01885-w

[2] Padhy V., Kandasubramanian, B. Polymer nanocomposites of ultra-high molecular weight polyethylene. Polymer Bulletin. – 2024. – Vol. 81. – P. 15259-15292. https://doi.org/10.1007/s00289-024-05439-y

[3] Bogdanova A.P., Kamenskikh A.A., Muhametshin A.R., Nosov Y.O. Numerical Modeling of Thermomechanics of Antifriction Polymers in Viscoelastic and Elastic-Viscoplastic Formulations // Applied Mechanics. – 2026. – Vol. 7. – Art. 2. https://doi.org/10.3390/applmech7010002

ВОЗНИКНОВЕНИЕ ВИХРЕВЫХ СТРУКТУР В Т-ОБРАЗНОЙ ЯЧЕЙКЕ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПРОТИВОПОЛОЖНО НАПРАВЛЕННЫХ ВРАЩАЮЩИХСЯ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

Бондаренко А.А.[1,2], Колесниченко И.В. [1]

[1]*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*
[2]*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь*
bondarenko.a@icmm.ru, kiv@icmm.ru

Движение жидкого металла, вызванное вращающимся магнитным полем, широко исследовано в цилиндрических ячейках. Аналитические исследования [1] показали, что критерием перехода в турбулентность в бесконечных по высоте ячейках может служить появление вихрей Тейлора-Гертлера [2], являющихся центробежной неустойчивостью пограничного слоя. Однако в ограниченных по высоте ячейках ситуация меняется, так как возникающий из-за трения о торцевые стенки аксиальный градиент центробежной силы приводит к появлению вторичного меридионального течения, называемого Экмановской подкачкой. Данное течение переносит вихри Тейлора-Гертлера к пограничных слоям, где происходит их диссипация

Однако при более сложном воздействии могут быть получены и более сложные режимы течений. В частности, в узком диапазоне отношения бегущего и вращающегося магнитных полей создан короткоживущий торнадоподобный вихрь [3]. В работе [4] комбинация вращающихся в противоположных направлениях магнитных полей позволила экспериментально и численно пронаблюдать многообразие режимов, в том числе парные поверхностные волны и долгоживущий торнадоподобный вихрь. Цель настоящей работы состоит в логическом продолжении данного исследования, а именно изучении роли неустойчивости Кельвина-Гельмгольца в формировании сложных крупномасштабных вихревых структур.

Рассматривается заполненная жидким металлом ячейка, состоящая из двух соосно расположенных цилиндров, при этом радиус верхнего больше радиуса нижнего. Вокруг каждой из частей ячейки расположен индуктор вращающегося магнитного поля. Электродинамическая часть задачи решается в гармонической постановке методом конечных элементов в пакете ElmerFEM. При помощи библиотеки EOFLibrary осуществляется перенос электромагнитого воздействия в пакет OpenFOAM, где методом конечных объемов проводится решение уже гидродинамической части. Исследовано как формирование неустойчивостей, так и их взаимодействие. Получены нейтральные кривые неустойчивостей Кельвина-Гельмгольца и Тейлора-Гертлера, а также характерные частоты пульсаций скорости.

Исследование выполнено в рамках государственного задания, регистрационный номер темы 124012300246-9.

Литература

[1] Richardson A.T., On the stability of a magnetically driven rotating fluid flow // J. Fluid Mech. – 1974. – т. 63. №3. – с. 593-605.

[2] Saric W.S., Görtler vortices // Annu. Rev. Fluid Mech. – 1994. – т. 26. – с. 379-409.

[3] Vogt T., Grants I., Eckert S., Gerbeth G., Spin up of a magnetically driven tornado-like vortex // J. Fluid. Mech. – 2013. – т. 736. – с. 641-662.

[4] Losev G., Mamykin A., Kolesnichenko I., Rich vortex dynamics of liquid metal in T-shaped cylindrical cell undre counter-rotating magnetic field action // J. Fluid. Mech. – 2025 – т. 1023. – с. A42.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОРИЕНТАЦИИ КОРОТКОГО УГЛЕРОДНОГО ВОЛОКНА В СЛАБОНАПОЛНЕННЫХ АБС-ПЛАСТИКАХ ПРИ ЛИТЬЕ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

Ботин А.В. [1], Лебедева Е.А. [1], Иванова Е.В. [1], Пантелеев И.А.[2], Астафьева С.А.[1]

[1]*«Институт технической химии Уральского отделения Российской академии наук» - филиал ПФИЦ УрО РАН, Пермь*
[2]*«Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук» - филиал ПФИЦ УрО РАН, Пермь*

raphunihhh@gmail.com, itch.elena@mail.ru, kornilicina.lena@mail.ru, pia@icmm.ru, astafeva.s@itcras.ru

В последние годы моделирование процессов формирования структуры полимерных композиционных материалов при литье под давлением становится важным инструментом прогнозирования их эксплуатационных характеристик. Особое значение приобретает анализ ориентационной структуры коротких волокон, определяющей анизотропию механических и функциональных свойств изделий [1].

В работе выполнено численное исследование формирования ориентационной структуры коротких углеродных волокон в слабонаполненных композициях на основе АБС-пластика при литье под давлением. В отличие от большинства исследований, посвящённых системам со средним и высоким содержанием наполнителя, рассмотрен диапазон концентраций 3–15 мас. % при фиксированных технологических параметрах процесса.

Моделирование заполнения литьевой формы выполнено с использованием моделей ориентации типа Folgar–Tucker, Moldflow Rotational Diffusion и т.д [2]. Ориентация волокон описывается тензором второго порядка с пятью независимыми компонентами. Диагональная компонента a_{11}, отражающая вероятность ориентации волокон вдоль потока (от 0 до 1), является наиболее чувствительной к параметрам течения и используется для визуализации результатов моделирования. Проведён анализ изменения компоненты a_{11} тензора ориентации волокон при варьировании их массовой концентрации (3 %, 6 %, 9 %, 12 %, 15 %). В качестве исходных данных для моделирования были использованы дисперсность углеродного волокна и данные реологии расплава композита.

Показано, что увеличение концентрации приводит к перераспределению компоненты a_{11} тензора ориентации по толщине изделия. Сокращение расстояний между волокнами при увеличении их концентрации от 3 до 15 мас. % приводит к росту числа механических и гидродинамических контактов. Это ограничивает свободное вращение частиц в сдвиговом потоке, что приводит к более равномерному распределению волокон в объеме полимера. Достоверность численных результатов подтверждена экспериментально путем сопоставления прогнозируемой структуры с данными рентгеновской компьютерной микротомографии реальных образцов слабонаполненного АБС-пластика.

Работа выполнена в рамках государственного задания; номер государственной регистрации темы 124022100088-6. Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Исследования материалов и вещества» ПФИЦ УрО РАН.

Литература

[1] Гущин И.А., Электрофизические характеристики углепластика для оценки его молниестойкости // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. – 2024. – № 1. – с. 20-26.

[2] Kugler S.K., Kech A., Cruz C., Osswald T., Fiber Orientation Predictions–A Review of Existing Models // J. Comp. Sci. – 2020. – т. 4, № 4. – с. 69.

РАЗРАБОТКА СВЕРХПРОЧНЫХ ПЛАСТИН ИЗ МОДИФИЦИРОВАННЫХ МНОГОСЛОЙНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ МНОГОКРАТНОГО УДЕРЖАНИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО УДАРА

Бохоева Л.А. [1], Рогов В.Е. [1], Чермошенцева А.С.[2]

[1]*Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, г. Улан-Удэ*
[2]*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва*

bohoeva@yandex.ru, rogov54v@mail.ru, asch-13@ya.ru

Оптимальные эксплуатационные свойства сверхпрочных пластин можно получить при условии применения составных элементов из разных слоистых композиционных материалов. Составные элементы многослойных пластин могут иметь различные сочетания слоёв из материалов: металла, керамики, тканей, органопластиков с волокнами ароматических полиамидов, СВМПЭ, стекло- или угле-пластиков [1].

Принцип проектирования составных слоев сверхпрочных пластин заключается в обеспечении снижения воздействия ударника на основные слои пластины до такого уровня, при котором остаточной энергии удара уже будет недостаточно для пробития оставшихся слоев пластины. Особенности поглощения энергии высокоскоростного удара различными материалами позволяет разделить защитную пластину на составные (функциональные) слои, выполняющие специфические задачи: торможение высокоскоростных ударов без осколков, деформацию ударников и его разрушение в слоях с высокой вязкостью разрушения, высокий уровень поглощения остаточной энергии высокоскоростного удара. В работе разработана новая технология изготовления многослойных пластин, которая включает решение задачи оптимизации, моделирование, изготовление и испытания изделий (реальные и виртуальные). Для решения задачи оптимизации определена целевая функция, которая представляет математическую зависимость критерия оптимальности от параметров, таких как твердость, жесткость, трещиностойкость, плотность и цена материала, твердость и скорость сердечника современных ударников. Задача оптимизации решена методом линейного программирования. Диссипация кинетической энергии при высокоскоростном ударе более вероятна в многослойных пластинах за счёт увеличения зоны межслойного дефекта. Исследования дефектов показали, что площадь межслойного разрушения имеет место в модифицированных слоистых композиционных материалах с биодобавками, которые отличаются от конструкционных композитов эластичной матрицей и меньшей адгезией между волокном и матрицей. В качестве биодобавок использован биоактивный материал – коллаген (сухой и виде геля), полученный в ВСГУТУ из отходов шкур животных. Биоактивный материал имеет кисло-молочную композицию или молочную кислоту и относиться к фибриллярным белкам, поэтому введённые биодобавки в хрупкую эпоксидную смолу придают материалу новые упругопластичные свойства. Разработана оптимальная последовательность укладки составных композитных элементов защитной пластины для снижения веса, полной остановки ударника [2]. Прочность пластины увеличивается на 10-15% за счет оптимального армирования многослойных элементов в зависимости от угла укладки волокон в слое и на 10% за счет увеличения зоны межслойного дефекта.

Впервые разработаны виртуальные испытания (цифровой двойник) пластин на основе реальных полевых испытаний на сверхскоростной удар.

Литература

[1] Бохоева Л.А., Бочектуева Е.Б., Титов В.А., Алексеева В.В., Иванов Р.П., Таргашин К.В. Моделирование бронепластин из многослойных композиционных материалов// В сборнике: Проблемы механики современных машин. Сборник статей IX Международной конференции. Улан-Удэ, 2025. С. 114-118.

[2] Бохоева Л.А., Рогов В.Е., Балданов А.Б., Особенности межслойного разрушения композиционных материалов при ударном нагружении с переменным углом укладки слоев// Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures. 2024. №2, С. 50-60.

РЕОРИЕНТАЦИИ КРУПНОМАСШТАБНОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ В КОНВЕКТИВНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

Васильев А.Ю., Степанов Р.А., Сухановский А.Н., Фрик П.Г.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

vasiliev.a@icmm.ru

Для турбулентной конвекции Релея-Бенара в замкнутых полостях характерно наличие крупномасштабной циркуляции (КМЦ) [1,2], которая представляет собой когерентную вихревую структуру, занимающую всю полость. Экспериментальные и численные исследования показали, что динамика КМЦ чрезвычайно разнообразна. Обнаружены реориентации КМЦ, которые могут происходить по двум сценариям: случайные блуждания без существенных изменений её интенсивности; сильные изменения положения её плоскости после временного прекращения КМЦ. Большое внимание уделяется объяснению природы реориентаций и разработке моделей, описывающих динамику КМЦ. В основе моделей [3] построенных с учетом физических воздействий различной природы, для трехмерной геометрии, заложено вращение жидкости с сохранением структуры потока, которое приводит к вращению плоскости КМЦ. В качестве источника такого вращения рассматриваются усредненные эффекты турбулентных пульсаций и сила Кориолиса. Однако при анализе результатов лабораторных и численных экспериментов вопрос о вращении жидкости в полости практически не обсуждался. Впервые роль вращения жидкости в процессе реориентации КМЦ рассматривалась при изучении поведения КМЦ в кубической полости [4]. Было показано, что в ходе реориентации появляется азимутальное движение жидкости, которое не связано с вращение плоскости КМЦ.

В данном исследовании мы возвращаемся к вопросу о том, как вращение плоскости КМЦ связано с азимутальным вращением жидкости. В отличие от [4] исследуется турбулентная конвекция в цилиндрической полости, которая не имеет выделенных направлений. Проведено численное моделирование турбулентной конвекции Релея-Бенара в цилиндрической полости с единичным аспектным отношением. Результаты показали, что ни один из сценариев реориентации не сопровождается появлением глобального азимутального углового момента жидкости.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 124012300246-9)

Литература

[1] Ahlers G., Grossmann S., Lohse D. Heat transfer and large scale dynamics in turbulent Rayleigh-Bénard convection // Reviews of modern physics. – 2009. – V. 81. – №. 2. – P. 503-537.

[2] Vasiliev A. et al. High Rayleigh number convection in a cubic cell with adiabatic sidewalls //International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2016. – V. 102. – P. 201-212.

[3] Brown E., Ahlers G. Large-scale circulation model for turbulent Rayleigh-Bénard convection //Physical review letters. – 2007. – Т. 98. – №. 13. – P. 134501.

[4] Vasiliev A. et al. Transient flows and reorientations of large-scale convection in a cubic cell //International Communications in Heat and Mass Transfer. – 2019. – V. 108. – P. 104319.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СВОБОДНЫХ КОЛЕБАНИЙ ДВУНАПРАВЛЕННЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНО ГРАДИЕНТНЫХ БАЛОК МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Вассерман И.Н. [1],

[1] *Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*
igorw@icmm.ru

Функционально градиентные материалы (FGM) представляют собой класс композитов, свойства которых могут изменяться непрерывно и гладко по крайней мере в одном пространственном направлении. Изменения свойств могут быть обусловлены составом, пористостью, микроструктурой. Эти материалы позволяют сочетать оптимальным образом свойства компонентов. В то же время, в отличие от слоистых композитов, они лучше сопротивляются расслоению, зарождению и развитию трещин [1,2].

Рассмотрена задача о свободных колебаниях функционально градиентных балок прямоугольного и кругового поперечного сечения. Модуль Юнга, модуль сдвига и массовая плотность материала непрерывно меняются как по высоте (радиусу) балки, так и по ее длине. К двунаправленным функционально градиентным балкам были применены как классическая теория Бернулли, так и теория третьего порядка Редди. С помощью вариационного принципа Гамильтона и эрмитовой конечноэлементной аппроксимации получено частотное уравнение в матричном виде. В качестве примера рассмотрена консольная балка из двунаправленного функционально градиентного материала. Получено практически полное совпадение частот собственных поперечных колебаний, полученных с помощью аналитического [3] и численного метода по упрощенной теории Бернулли, то есть когда инерция вращения сечений и перекрестная связь продольной силы с изгибающим моментом не учитываются. Учет этих факторов для коротких балок ведет к существенному снижению частот. При несимметричном распределении материала происходит взаимодействие продольных и поперечных колебаний. Это взаимодействие следует отличать от тесно связанного с эйлеровой неустойчивостью влияния продольной нагрузки на частоту свободных поперечных колебаний. Использование моделей высшего порядка также приводит к снижению вычисляемых собственных частот. Рассматривалась также консольная балка полого кругового сечения. Для однородных по длине балок численное решение сравнивалось с имеющимся в литературе аналитическим [4] Расхождение для первых трех частот не превышает 0.3%.

Работа выполнена в рамках государственного задания, регистрационный номер темы 124020700047-3.

Литература

[1] Meguid, S. A. , Wang, X. D. , and Jiang, L. Y. , , On the Dynamic Propagation of a Finite Crack in Functionally Graded Materials, //Engineering Fracture Mechanics. 2002. Vol. 69, No 14–16 , P. 1753–1768.

[2] Fedorov A.Yu., Matveenko V.P. Investigation of stress behavior in the vicinity of singular points of elastic bodies made of functionally graded materials // ASME J. of Appl. Mech.. 2018. Vol. 85, No. 6. Article. No. 061008.

[3] Wang Z.-h., Wang X.-h., Xu G.-d., Cheng S., Zeng T., Free vibration of two-directional functionally graded beams, // Composite Structures, 2016 , Vol. 135, P. 191−198

[4] Ma W.-L., Cheng C., Chen X., Li X.-F., Free vibration of radially graded hollow cylinders subject to axial force via a higher-order shear deformation beam theory, // Composite Structures, 2021,Vol.255, Article. No.112957

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ЛАЗЕРНОЙ УДАРНОЙ ОБРАБОТКИ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ6 С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛЕЙ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ

Вережак М.В. [1], Бартоломей М.Л. [1], Вшивков А.Н. [1], Гачегова Е.А. [1], Плехов О.А. [2]

[1] Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
[2] Пермский федеральный исследовательский центр УрО РАН, Пермь
verezack@icmm.ru

Лазерная ударная обработка (ЛУО) является эффективным методом повышения усталостной прочности деталей [1-3] из титановых сплавов за счет создания полей остаточных сжимающих напряжений. Ключевой проблемой применения данной технологии является сложность подбора оптимальных параметров облучения [4] (перекрытие пятен, количество проходов, плотность энергии), обеспечивающих требуемые характеристики упрочненного слоя.

Цель данной работы является разработка и верификация методики определения оптимальных режимов ЛУО для сплава ВТ6 (Ti-6Al-4V), основанной на нейросетевом подходе для прогнозирования остаточных напряжений и глубины упрочненного слоя.

Для обучения нейронной сети сформирована комбинированная база данных, включающая экспериментальные измерения (метод сверления отверстий) и результаты верифицированного конечно-элементного моделирования процесса ЛУО. В качестве входных параметров модели использовались: перекрытие лазерных пятен, количество проходов и плотность энергии. Модель прогнозировала поверхностные и максимальные сжимающие напряжения, а также глубину модифицированного слоя.

Оптимальная структура полносвязной нейронной сети прямого распространения была определена эмпирически. Наилучшую точность предсказания продемонстрировала сеть с 4 скрытыми слоями по 10 нейронов в каждом и с функцией активации $sin(z)$ в скрытых слоях.

Разработанная искусственная нейронная сеть может быть использована для интерполяции зависимости между обучающими точками, а также для поиска оптимальных параметров или допустимых диапазонов параметров процесса обработки. Полученная модель позволяет эффективно выбирать необходимые параметры лазерного облучения в соответствии с заданными ограничениями значений и глубиной остаточных напряжений.

Литература

[1]. Plekhov,O., Vshivkov, A., Gachegova, E., Iziumova, A., Bartolomei, M. (2025). Laser Shock Peening of Titanium Alloy for Improved Fatigue Resistance. *Procedia Structural Integrity*, *71*, 10-17.

[2]. Zhang X. C. et al. Improvement of fatigue life of Ti–6Al–4V alloy by laser shock peening //Materials Science and Engineering: A. – 2010. – Т. 527. – №. 15. – С. 3411-3415.

[3]. Luo X., Dang N., Wang X. The effect of laser shock peening, shot peening and their combination on the microstructure and fatigue properties of Ti-6Al-4V titanium alloy //International Journal of Fatigue. – 2021. – Т. 153. – С. 106465.

[4]. Verezhak M. et al. Application of deep learning for technological parameter optimization of laser shock peening of Ti-6Al-4V alloy //Fracture and Structural Integrity. – 2024. – Т. 18. – №. 70. – С. 121-132.

ТЕОРИЯ ЗАКРИТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ И МЕХАНИКА РАЗРУШЕНИЯ

Вильдеман В.Э.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
wildemann@pstu.ru

Разнообразные многоуровневые и многостадийные процессы трансформации структуры конструкционных и природных материалов при деформировании с позиций макрофеноменологического описания приводят с некоторого момента к появлению ниспадающих участков на диаграммах нагружения или деформирования. Закритическая стадия характеризуется разупрочнением, проявляющемся в уменьшении напряжений при прогрессирующих деформациях. Физические причины разупрочнения различных материалов могут существенно отличаться, но, как правило, связаны с возникновением и развитием систем дефектов, разрушением структурных элементов. Полученные аналитические и численные решения задач демонстрируют закономерности механического поведения материалов и элементов конструкций, а также особенности формирования условий динамического разрушения. В качестве основы теоретического обоснования моделей закритического деформирования сформулированы и доказаны теоремы механики для деформируемых тел с учетом разупрочнения материала в локальных зонах. Кроме того, теория закритического деформирования естественным образом приводит к пересмотру концепции предельного состояния. Сформулирована концепция нелокальной теории прочности, заключающаяся в оценке прочности материальной частицы (элементарного объема материала) тела на основе анализа устойчивости закритического деформирования с учетом свойств всего тела и передающих нагрузки внешних элементов как единой нагружающей системы. Условия разрушения определяются непосредственно из решения краевой задачи неупругого деформирования с учетом свойств нагружающей системы с помощью локальных или нелокальных граничных условий третьего рода. Продемонстрированы естественные аналогии между механикой разрушения, явным образом описывающей поведение тел с макротрещинами, и механикой закритического деформирования. По сути, механика закритического деформирования с фиксацией макроразрушения как результата потери устойчивости этого процесса, является континуальной механикой разрушения [1-5].

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00765-П (https://rscf.ru/project/22-19-00765/).

Литература

[1] Вильдеман В.Э., Соколкин Ю.В., Ташкинов А.А. Механика неупругого деформирования и разрушения композиционных материалов. М.: Наука, 1997. 288 с.

[2] Вильдеман В.Э. О решениях упругопластических задач с граничными условиями контактного типа для тел с зонами разупрочнения // ПММ. — 1998. — Т. 62, вып. 2. — С. 304–312.

[3] Вильдеман В.Э., Ломакин Е.В., Третьяков М.П. Закритическое деформирование сталей при плоском напряженном состоянии // Известия РАН. Механика твердого тела. — 2014. — № 1. — С. 26-36.

[4] Вильдеман В.Э., Ломакин Е.В., Третьяков М.П., Третьякова Т.В., Лобанов Д.С. Экспериментальные исследования закритического деформирования и разрушения конструкционных материалов. — Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2018. — 156 с.

[5] Вильдеман В.Э., Мугатаров А.И. Моделирование процесса равновесного роста трещины в композитном образце с позиций механики закритического деформирования // Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки. – 2022. – Т. 26, № 1. – С. 48-61.

НОВАЯ МОДЕЛЬ ПРЕДЕЛЬНОЙ ПЛАСТИЧНОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Вичужанин Д.И. [1]

[1]*Институт машиноведения им. Э.С. Горкунова УрО РАН, Екатеринбург*
mmm@imach.uran.ru

Характеристикой предельной пластичности материала является степень деформации сдвига Λ_P, накопленная к моменту разрушения в условиях монотонной деформации [1]. Данный параметр является важной составной частью несвязанных феноменологических моделей поврежденности. В большинстве случаев модели предельной пластичности являются функциями коэффициента напряженного состояния k (отношение среднего нормального напряжения к интенсивности касательных напряжений) и коэффициента Лоде-Надаи μ_σ, либо коэффициента трехосности (triaxiality coefficient) и угла Лоде. Отечественными и зарубежными авторами предложено значительное количество моделей предельной пластичности материалов. Однако, все они имеют различного рода недостатки, не позволяющие адекватно описывать реальные пластические свойства материалов. Например, в работах [2] и [3] предложены модели, являющиеся симметричными относительно $\mu_\sigma = 0$. В работе [4] функция предельной пластичности имеет седловую точку. В связи с этим использовать данные модели в общем случае напряженно-деформированного состояния затруднительно.

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

Литература

[1] Смирнов С.В., Швейкин В.П. Пластичность и деформируемость углеродистых сталей при обработке давлением – Екатеринбург: УрО РАН, 2009. – 256 с.

[2] Gruben G., Hopperstad O.S., Borvik T., Evaluation of uncoupled ductile fracture criteria for the dual-phase steel Docol 600DL // International Journal of Mechanical Sciences. – 2012. – Vol. 62. – p. 133-143.

[3] Li W., Jing Y., A Simple Calibrated Ductile Fracture Model and Its Application in Failure Analysis of Steel Connections // Buildings. – 2022. – Vol. 12, 1358.

[4] Bai Y., Wierzbicki T., A new model of metal plasticity and fracture with pressure and Lode dependence // International Journal of Plasticity. – 2008. – Vol. 24(6). – p. 1071-1096.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ МЕЖФАЗНОЙ ГРАНИЦЫ ПРИ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ВИБРАЦИЯХ МЕТОДОМ РЕШЕТОЧНЫХ УРАВНЕНИЙ БОЛЬЦМАНА

Володин И.В. [1], Алабужев А.А. [1, 2]

[1]*Институт Механики Сплошных Сред, УрО РАН, Пермь*
[2]*Пермский государственный университет, Пермь*
ivanwolodin@gmail.com, alabuzhev@mail.ru

В работе представлены результаты численного моделирования двухфазных течений с протяженной деформируемой межфазной границей методом решеточных уравнений Больцмана (Lattice Boltzmann Method, LBM) [1-3]. Исследовано влияние вертикального вибрационного воздействия на развитие волновых режимов в системе несмешивающихся жидкостей в изотермической постановке в гравитационном поле.

Рассматривается двумерная двухкомпонентная система, ограниченная твердыми непроницаемыми стенками. Движение среды индуцируется исключительно вертикальными гармоническими вибрациями. Численные расчеты выполнены для широкого диапазона сотношения плотностей ($\rho_r = 6 \div 1000$) и кинематических вязкостей ($\nu_r = 1/3 \div 10$).

Показано, что при определенных значениях безразмерных параметров (чисел Бонда и Вебера) вертикальные вибрации приводят к подавлению основной моды неустойчивости Рэлея – Тейлора и уменьшению характерной длины возмущений. Тем самым продемонстрирована возможность моделирования динамической стабилизации межфазной границы за счет внешнего вибрационного воздействия при помощи LBM.

Смоделированы гравитационно-капиллярные волны, индуцированные вертикальными вибрациями. Установлено, что увеличение числа Вебера при фиксированной частоте приводит к существенному росту амплитуды волн. Пространственный период формирующихся волновых структур количественно согласуется с аналитической дисперсионной зависимостью.

Проведено численное моделирование трехслойной системы с параметрами, близкими к экспериментальным. Показана возможность вибрационной стабилизации жидких слоев и многослойных структур. При отсутствии вибраций тяжелая фракция оседает, однако даже слабое вибрационное воздействие изменяет динамику системы и может приводить к устойчивым периодическим режимам.

Полученные результаты демонстрируют эффективность предложенной модификации фазово-полевого LBM (Phase-Field LBM) для задач межфазной гидродинамики при вертикальном вибрационном воздействии.

Работа И.В. поддержана бюджетной темой № 124021600038-9.

Литература

[1] Krüger T., Kusumaatmaja H., Kuzmin A., Shardt O., Silva G., Viggen E. M. The Lattice Boltzmann Method: Principles and Practice. – Cham: Springer International Publishing, 2017.

[2] Succi S. The Lattice Boltzmann Equation: For Complex States of Flowing Matter. – Oxford, UK: Oxford University Press, 2018.

[3] Liang H., Xu J., Chen J., Wang H., Chai Z., Shi B. Phase-field-based lattice Boltzmann modeling of large-density-ratio two-phase flows // Physical Review E. – 2018. – Vol. 97, No. 3. – 033309.

МНОГОУРОВНЕВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГОРЯЧЕГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ СПЛАВА 1565Ч: ИДЕНТИФИКАЦИЯ, ВЕРИФИКАЦИЯ, ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ МОДЕЛИ

Вшивкова А.А., Швейкин А.И., Романов К.А.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
aavshivkova@pstu.ru, shveykin@pstu.ru, k.a.kriv@mail.ru

Перспективным к созданию конститутивных моделей материала, позволяющим прогнозировать изменение его структуры и свойств, является многоуровневый подход на основе физических теорий пластичности [1, 2]. В таких моделях используется несколько уровней для описания поведения материала на уровне отдельных зерен и однородного представительного объема. Кроме того, в моделях физических теорий пластичности вводится ряд внутренних переменных, связанных с состоянием структуры (например, размер зерна, ориентации решеток зерен), для которых с учетом представлений о действующих физических механизмах ее перестроения формулируются эволюционные уравнения.

В рамках работы для описания представительного объема алюминиево-магниевого сплава 1565ч была применена ранее разработанная двухуровневая статистическая модель [3]. Модель включает в т.ч. уравнения для описания ротации решеток зерен и внутризеренного дислокационного скольжения. В последних учтены процессы динамического возврата, воспроизводства и аннигиляции дислокаций, сопротивление скольжению дислокаций со стороны границ зерен и кристаллической решетки. Идентификация параметров проводилась по данным о нагружении при температурах 623 К, 673 К, 763 К и скорости деформирования 0.1 с-1 [4]. Верификация была выполнена по диаграмме нагружения для температуры 763 К и скорости деформации 1 с-1 и усилена анализом текстуры. Кроме того, был проведен численный анализ устойчивости к возмущению воздействий и параметров модели. При этом описанная в [5] методика исследования была дополнена учетом возмущений температуры и разбиением параметров модели на группы, соответствующие различным физическим механизмам.

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

Литература

[1] Панин В. Е., Основы физической мезомеханики //Физическая мезомеханика – 1998. – т. 1, № 1. – с. 5–22.

[2] Trusov P. V., Shveykin A. I., Kondratyev N. S., Yants A. Y., Multilevel models in physical mesomechanics of metals and alloys: results and prospects //Physical Mesomechanics. – 2021. – т. 24, №4. – с. 391–417.

[3] Shveykin A. I., Vshivkova A. A., Trusov P. V., Two-level constitutive model of metal with a comprehensive account of temperature and strain rate changes //Physical Mesomechanics. – 2024. – т. 27, №4. – с. 370–386.

[4] Rushchits S., Aryshenskii E., Kawalla R., Serebryany V., Investigation of Texture Structure and Mechanical Properties Evolution during Hot Deformation of 1565 Aluminum Alloy //Materials Science Forum. – 2016. – т. 854. – с. 73–78.

[5] Shveykin A., Trusov P., Romanov K., Stability of Crystal Plasticity Constitutive Models: Observations in Numerical Studies and Analytical Justification //Metals. – 2024. – т.14, № 8. – с. 947.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛИКРИСТАЛЛОВ В КРАЕВЫХ ЗАДАЧАХ НА ОСНОВЕ ПРЯМЫХ ФИЗИЧЕСКИ ОРИЕНТИРОВАННЫХ ПОДХОДОВ

Вяткин Я.В., Трусов П.В.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
viatkiniv@gmail.com, tpv@pstu.ru

Современные методы обработки материалов требуют совершенствования технологических процессов, основанных на интенсивном неупругом деформировании [1]. Эффективный анализ и проектирование таких процессов невозможны без адекватных математических моделей, учитывающих изменение внутренней структуры материала, которая определяет его физико-механические и эксплуатационные характеристики. Наиболее перспективным направлением является многоуровневое моделирование, опирающееся на физические теории пластичности [2]. Особого внимания заслуживают прямые физически ориентированные модели, описывающие эволюцию микроструктуры поликристаллов на основе явного рассмотрения дислокационных механизмов [3]. Такие модели позволяют решать нелинейные краевые задачи с учетом контактных взаимодействий, точно отражая внутренние физические процессы. Особое внимание уделяется подходам к описанию интенсивных пластических деформаций и процессов механической обработки металлов и сплавов, включая поверхностные эффекты.

Значительный интерес представляет анализ влияния кристаллогеометрических факторов на поведение поликристаллов. Ориентация границ зерен существенно сказывается на макроскопических характеристиках. Это влияние особенно выражено в миниатюрных и тонкостенных конструкциях, где внешние и внутренние границы зерен играют ключевую роль в активации и развитии механизмов пластичности. Прямое моделирование поликристаллических агрегатов открывает широкие возможности для детального изучения этих явлений, включая процессы образования новых свободных поверхностей и анализ их свойств, в частности шероховатости, что особенно важно при исследовании процессов механической обработки.

В работе рассматривается модель, учитывающая дислокационное скольжение по кристаллографическим системам, вращение решеток кристаллитов и нелинейное анизотропное упрочнение. Выполнено численное моделирование деформирования поликристаллических образцов. Приведены результаты решения начально-краевых задач с использованием оригинальных программных средств. Развиваемые подходы включают рассмотрение динамических нелинейных контактных задач с применением различных численных методов (метод конечных элементов, метод сглаженных частиц и т.п.), что позволяет глубже исследовать эволюцию поверхностей при интенсивной деформации.

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

Литература

[1] Engel U., Eckstein R. Microforming – from basic research to its realization // Journal of Materials Processing Technology. – 2002. – Vol. 125-126. – P. 35-44.

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

[3] Вяткин Я.В., Трусов П.В. Прямая физически-ориентированная упруговязкопластическая модель: применение для исследования влияния свободной поверхности на неупругое деформирование монокристаллических образцов // Проблемы прочности и пластичности. – 2024. – Том 86, № 4. – С. 505-524.

ОЦЕНКА ПРИМЕНИМОСТИ СУРРОГАТНЫХ МОДЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОТКЛИКА МАТЕРИАЛОВ

Гладких П.А., Швейкин А.И.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
gladkikh.p@yandex.ru, shveykin@pstu.ru

Развитие аэрокосмической, двигателестроительной и судостроительной отраслей требует материалов с высокой прочностью, термостойкостью, износо- и коррозионной стойкостью. Поскольку эти свойства зависят от структуры на разных масштабных уровнях, растет интерес к функциональным и градиентным материалам, в которых структура и свойства оптимизированы в различных зонах изделия для эксплуатации в неоднородных средах. Однако зачастую поиск параметров термомеханической обработки для получения таких материалов основан на многочисленных натурных экспериментах, что делает процесс ресурсоемким.

Решением является разработка и применение при проектировании многоуровневых конститутивных моделей металлов на основе физических теорий пластичности [1]: вводятся внутренние переменные (размер/ориентация зерен, дефекты, фазовое распределение) и применяются эволюционные уравнения для взаимодействия границ, рекристаллизации, роста зерен и глобального деформирования. Данный вид моделей позволяет прогнозировать влияние структурных изменений на макроскопические свойства (например, повышение предела текучести при уменьшении размера зерен), тем самым сокращая количество экспериментов и ускоряя разработку. Однако прямое применение полных моделей в проектировании деталей затруднено из-за значительной вычислительной нагрузки: требуется много памяти и времени, что делает поиск оптимальных технологических параметров практически невозможным.

Одним из возможных путей решения обозначенной проблемы являются суррогатные модели [2] – математические аппроксимации выходов полной модели. Суррогаты воспроизводят ключевые характеристики при существенно меньших вычислительных затратах и контролируемой погрешности в заданном диапазоне параметров, что позволяет быстро решать краевые задачи, проводить многочисленные симуляции и оптимизировать структуру материала для определения наиболее эффективных условий термомеханической обработки. В работе исследуется применимость суррогатных моделей на основе моделей машинного обучения, в частности рекуррентных нейросетей, в задачах прогнозирования отклика материала (эволюции структуры, тензора напряжений), получены результаты применения ряда моделей.

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

Литература

[1] Baldin M.N. et al., A Combined Approach to Solving Applied Metal Forming Problems // Crystals. – 2025. – т. 15, № 2. – с. 101
[2] Bonatti C., Mohr D. On the importance of self-consistency in recurrent neural network models representing elasto-plastic solids // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. – 2022. – т. 158. – с. 104697

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВАЛА ВЕНТИЛЯТОРА АВИАЦИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С УЧЕТОМ ВАРИАТИВНОСТИ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ

Глухов В.А., Кузнецова Е. В.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь,
Mr.Glykhov@yandex.ru, kuznetsovae@pstu.ru

Численное моделирование является стандартом проектирования авиадвигателей, однако математическая идеализация модели не всегда учитывает дефекты производства и фактические отклонения в геометрии [1]. Вал вентилятора является ответственной деталью ротора, а потому при расчете необходимо максимально приблизить схему и модель к эксплуатационным условиям [2]. Передача вращения на валу вентилятора между диском вентилятора и валом турбины низкого давления обеспечивается конструктивными узлами, где используется фланцевое и шлицевое соединение, соответственно. Для обеспечения позиционирования вала конструктивно предусмотрены подшипники, устанавливаемые в соответствующие пазы. Для оптимизации вычислительных ресурсов, были разработаны геометрические модели: упрощённая модель полного вала и осесимметричный сегмент вала контура низкого давления, учитывающий циклическую симметрию конструктивных элементов. Алгоритмы задания граничных условий, которые используются в данной работе для задания крутящего момента, имеют существенные отличия в модулях ANSYS [3, 4].

В работе реализованы два варианта закрепления и нагружения моделей вала. В первом варианте для приложения момента в области шлица моделирование проводится в среде ANSYS Workbench, а областью закрепления вала является наружная плоскость фланца. Во втором варианте областью закрепления вала является поверхность шлица, а крутящий момент приложен в области фланца. Далее в среде APDL реализована задача для расчёта сегмента вала, где учтены варианты закрепления аналогичные целому валу. Проведенное сравнение значений эквивалентных напряжений показало максимальное отклонение при различных граничных условиях на одном сечении до 5%. При аналогичном сравнении аналитического метода с пакетом программ максимальное отклонение составило не более 1%, что является приемлемой погрешностью в пределах методики расчётов.

Таким образом, анализ полученных результатов показал, что различные способы задания нагрузки несущественно влияют на распределение эквивалентных напряжений, а максимальные значения определяются в допустимых пределах отклонений. Предложенный в работе алгоритм сочетания двух пакетов программ для учета граничных условий при моделировании соединительных узлов вала при решении осесимметричной задачи является адекватным и оправдан относительно экономичности и оптимизации вычислительных ресурсов.

Литература

[1] Конюхов А.В. Основы анализа конструкций в Ansys. – Казань: Изд-во Казанск. гос. ун-т, 2001. – 102 с.
[2] Иноземцев А.А, Нихамкин М.А., Сандрацкий В.Л. Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок. – Пермь: Издательство «Авиадвигатель» 2008. – т. 1.
[3] Буряка В.А. Инженерный анализ в ANSYS Workbench: Учебное пособие. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2010. – 271 с.
[4] Верхотуркин Е.Ю., Пащенко В.Н., Пясецкий В.Б Интерфейс и генерирование сетки в ANSYS Workbench. Учебное пособие. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013. – 63 с.

НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОЕ ДИФФУЗИОННОЕ ФОРМИРОВАНИЕ ГОРИЗОНТОВ СЛАБОРАСТВОРИМЫХ ВЕЩЕСТВ В ЗЕМНОЙ КОРЕ

Голдобин Д.С.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
denis.goldobin@gmail.com

Разрабатывается теория формирования горизонтов нерастворённой фазы (газовых пузырьков и гидратов) слаборастворимых веществ в водонасыщенных пористых средах под воздействием геотермального градиента температуры и поля тяжести. Исследование учитывает нефиковскую диффузию, включающую термодиффузию (эффект Соре) и гравитационную стратификацию — на геологических масштабах величина соответствующих потоков сопоставима с величиной потока, обусловленного градиентом концентрации. Теоретическая основа работы базируется на анализе конкуренции между увеличением гидростатического давления и геотермальным ростом температуры, что приводит к формированию немонотонных профилей растворимости [1, 2]. Это создаёт условия для образования устойчивых зон аккумуляции, где дивергенция диффузионного потока служит источником массы нерастворённой фазы — газа или гидрата.

Представлена классификация стационарных режимов на плоскости параметров высота водного столба – безразмерный параметр, характеризующий величину нефиковских вкладов в диффузионный поток. Определены условия формирования различных режимов аккумуляции. Исследовано влияние слоистой неоднородности пористости и извилистости каналов пор: описан эффект расслоения области формирования нерастворенной фазы на несколько тонких горизонтов. Особое внимание уделено изучению систем с зонами термодинамической устойчивости газовых гидратов. Показано, что гидратные отложения формируются исключительно в верхней части области их термодинамической устойчивости и могут быть пространственно отделены от нижележащих пузырьковых горизонтов.

Практическая значимость исследования заключается в разработке единого подхода к формированию горизонтов в осадочных системах, обусловленному диффузионной сегрегацией под действием естественных градиентов. Теория применима к широкому спектру слаборастворимых газов, жидкостей и твёрдых веществ. Перспективы применения результатов охватывают интерпретацию полевых наблюдений и прогнозирование распределения газовых скоплений в природных условиях, включая системы с газовыми гидратами и слоистой структурой пористой среды.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (тема № 124021600038-9).

Литература

[1] Goldobin D. S., Brilliantov N. V. Diffusive Counter Dispersion of Mass in Bubbly Media // Physical Review E. – 2011. – Vol. 84, No. 5. – 056328.

[2] Goldobin D. S., Brilliantov N. V., Levesley J., Lovell M. A., Rochelle C. A., Jackson P. D., Haywood A. M., Hunter S. J., Rees J. G. Non-Fickian diffusion and the accumulation of methane bubbles in deep-water sediments // European Physical Journal E. – 2014. – Vol. 37. – 45.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ МЕХАНИЧЕСКОГО РАВНОВЕСИЯ СЛОЯ ПАВ, СЖИМАЕМОГО ОДНОРОДНЫМ ПОТОКОМ

Гордеева А.И. [1], Шмыров А.В. [2]

[1]*Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь*

[2]*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

Shmyrov@icmm.ru

Давно известно, что мономолекулярные плёнки ПАВ на границах раздела подвижных фаз существенно влияют на динамику этих фаз. Это влияние может быть количественным, как в случае увеличения на несколько порядков критического числа в задаче Рэллея-Бенара, так и качественным, с возникновением в двумерной плёнке ПАВ новых диссипативных структур, приводящих к потере симметрии основного течения в жидкой фазе [1-4]. Попытки теоретического исследования условий возникновения и характера таких структур на протяжении нескольких десятилетий не дали желаемого результата, а именно создания математической модели, воспроизводящей все имеющиеся экспериментальные наблюдения. По нашему мнению связано это с тем, что межфазная граница традиционно рассматривается в гидродинамике всего лишь как геометрическая граница жидкого объёма, играющая пассивную роль «поставщика» граничных условий.

Однако в физической химии давно известно, что слои ПАВ на межфазных границах следует рассматривать как двумерные континуумы, характеризующиеся своим набором фазовых состояний, двумерным давлением, диффузией и целым набором реологических параметров. Такое разнообразие свойств объясняется разнообразием химического строения молекул ПАВ и, как следствие, нюансами их взаимодействия между собой в составе мономолекулярного слоя, В частности известно, что многие ПАВ ведут себя как двумерные ньютоновские жидкости на границе раздела двух трёхмерных подвижных фаз. В случае границы раздела газ-жидкость, следует считать, что 2D жидкий континуум и 3D жидкая фаза образуют своеобразную двуслойную гидродинамическую систему с суммарной размерностью 5D.

Теоретических исследований подобной системы с точки зрения развития гидродинамической неустойчивости до настоящего временни не проводилось, но несколько лет назад авторами был предложен безразмерный параметр, ответственный за формирование диссипативных структур, наблюдаемых в эксперименте [5]. В настоящей работе представлены экспериментальные результаты исследования порога развития диссипативных вихревых структур в слое ПАВ и проверки предложенного параметра.

Литература

[1] Mizev A., Shmyrova A. Effect of an insoluble surfactant film on the stability of the concentration-driven Marangoni flow // J. Fluid Dyn. – 2014. – Vol. 49. N. 1. – P. 26–36.

[2] Roché M., et.al. Marangoni flow of soluble amphiphiles // Phys. Rev. Lett. – 2014. – Vol. 112. – P. 208302.

[3] Shmyrova A., Shmyrov A. Instability of a homogeneous flow from a lumped source in the presence of special boundary conditions on a free surface // EPJ Web of Conferences. – 2019. – Vol. 213. – P. 02074.

[4] Шмырова А. И., Шмыров А. В. Механизмы формирования вихревых структур на границе раздела жидкость-газ в присутствии адсорбционного слоя. // Вестник Пермского университета. Физика. – 2020. – № 3. – С 31-38.

[5] Mizev, A., Shmyrov, A., Shmyrova, A. On the shear-driven surfactant layer instability // Journal of Fluid Mechanics. 2022. Vol. 939. N. A24.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЗДАНИЯ В ПРОЦЕССЕ ТАЯНИЯ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ В ЕГО ОСНОВАНИИ

Гусев Г.Н., Стась Е.А.

[1]*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*
gusev.g@icmm.ru

В процессе растепления многолетнемерзлых грунтов криолитозоны, которое связано с изменением климата в Арктических регионах планеты, механические характеристики такого основания существенным образом меняются. Эти процессы приводят к развитию непроектных деформированных состояний строительных сооружений, которые оперты своими фундаментными конструкциями на кровлю оттаивающих грунтов [1]. Скорости оттаивания многолетнемерзлых грунтов достаточно велики, и за последние 50 лет горизонт кровли криолитозоны опустился на величину до 10 метров по ряду регионов РФ [2]. Задача анализа деформационных процессов в системе «здание – свайный фундамент – оттаивающее грунтовое основание» является крайне актуальной на сегодняшний день.

Исследование посвящено анализу напряженно-деформированных состояний строительных сооружений, которые своими фундаментными конструкциями были оперты на вечномерзлые грунты в Арктической зоне Российской Федерации. Проведена серия численных экспериментов, которая моделирует процессы таяния кровли грунтов криолитозоны и развитие именно непроектных деформированных состояний в вышестоящих строительных сооружениях. В конечно-элементных моделях учитываются особенности инженерно-геологического и геокриологического строения грунтов, сезонная стратификация по температуре и времени [3]. Важным аспектом в моделировании процессов деформирования строительных сооружений является учет физически-нелинейных свойств материалов несущих элементов, что позволяет оценивать эволюцию дефектов и прогнозировать потерю несущей способности сооружения. Одной из важнейших задач исследования является определение потенциальных сценариев перераспределения усилий в несущих элементах фундаментных конструкций, что в свою очередь является начальным условием для разработки методов усиления и закрепления активной толщи грунтового основания различными методами. Результаты исследований проведены в рамках проекта ГБ тематики №124040500016-9.

Литература

[1] Gusev G., Yepin V., Tsvetkov R., Modeling of deformed state of a group of buildings in conditions of thawing permafrost soils // 12th Annual Conference of Society for Structural Integrity and Life, Belgrade, 2025. – P. 458-463.

[2] Фалалеева А.А., Шелков Я.Ю., Чеверев В.Г., Брушков А.В. Оценка изменения несущей способности мерзлых грунтов при возможном изменении температуры и оттаивании вечной мерзлоты в арктической зоне Российской Федерации к середине XXI века. Вестник московского университета, серия 4, Геология, Т.5, 2023. – С. 105-116.

[3] Белозеров А.Г., Семенов Е. В., Бабакин С. Б., Моделирование процесса оттаивания грунта на базе экспериментальных данных // Вестник Международной академии холода. – 2021. – № 2. – С. 73-78.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СВАЙНЫХ ФУНДАМЕНТОВ В УСЛОВИЯХ ТАЯНИЯ ГРУНТОВ КРИОЛИТОЗОНЫ

Гусев Г.Н., Цветков Р.В., Епин В.В., Сологуб Ф.Д.

[1]*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

gusev.g@icmm.ru

Изменение климата, которое связано с глобальным потеплением приводит к относительно быстрому росту средней температуры воздуха на планете. Наиболее заметно это проявляется в Арктике, что вызывает деградацию механических свойств грунтов вечной мерзлоты. Горизонт границы криолитозоны с каждым годом неуклонно снижается по высоте, что приводит к изменению механических свойств многолетнемерзлых грунтов, на которые опираются свайные фундаменты инженерных и строительных сооружений. Для большинства объектов сваи на этапе строительства были оперты на кровлю мерзлых грунтов, являясь сваями-стойками. Модули упругости вечномерзлых грунтов имеют величины сопоставимые с модулями упругости скальных оснований. Именно этот факт позволял проектировать и строить различные сооружения не особо заботясь о величинах неравномерных вертикальных перемещений в основании сооружений. Однако в процессе таяния характеристики такого основания существенным образом меняются в сторону ослабления. Все это требует разработки подходов для предотвращения развития катастрофических явлений в строительных сооружениях, которые покоятся на таких основаниях [1].

Работа посвящена исследованию квазистатических и динамических характеристик свай в составе фундаментов сооружений для разработки и внедрения систем постоянного деформационного мониторинга [2]. Для изучения влияния деформационных процессов в основании сооружений были произведены численные эксперименты, в ходе которых анализировались динамическая и квазистатическая реакция свай в составе фундаментов. Эксперименты позволили выявить закономерные изменения деформированного состояния свай, а также изменения вибрационного отклика на заданное или фоновое воздействие в случаях оттаивания или замораживания грунтов в основании сооружения. Анализ результатов расчетов позволил показать, что наблюдается заметное снижение собственных частот в системе при оттаивании грунта криолитозоны, а также существенное перераспределение деформаций между сваями в составе всего фундамента. Результаты исследований проведены в рамках проекта по созданию систем деформационного мониторинга для строительных сооружений в условиях Арктики (тема №124040500016-9).

Литература

[1] Гусев Г. Н., Епин В. В., Цветков Р. В., Сологуб Ф. Д., Деформационный мониторинг здания на многолетнемерзлых грунтах // Вестник ПФИЦ. – 2025. – № 4. – с. 80-86

[2] Цветков Р.В, Гусев Г.Н., Исследование изменения собственных частот сваи при оттаивании окружающего грунта // Успехи кибернетики. – 2024. – Т. 5, № 4. – С. 110-115.

ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА В УСЛОВИЯХ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР

Гусев Г.Н., Цветков Р.В., Епин В.В., Сологуб Ф.Д.

[1]*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*
flower@icmm.ru

Исторически для большей части территории России характерен умеренно и резко континентальный климат с холодной зимой и регулярными морозами. Значительная её часть находится на вечной мерзлоте, на которой расположены здания, сооружения и элементы инфраструктуры. Оттаивание вечномерзлых грунтов, происходящее из-за потепления климата, может оказывать влияние на деформирование и повреждение конструкций, безопасная эксплуатация которых имеет важное значение. Поэтому актуальной задачей является организация деформационного мониторинга таких объектов, находящихся в суровых климатических условиях. Измерительные компоненты систем мониторинга (датчики) должны иметь высокую чувствительность, чтобы фиксировать отклик конструкции при изменении свойств грунтов основания, связанные с процессами заморозки-разморозки, но при этом обеспечивать работоспособность при экстремальных перепадах температур.

В рамках проекта (тема №124040500016-9) в 2025г была произведена разработка и установка адаптированных к низким температурам компонент системы мониторинга на административном здании в г. Якутск. На данном сооружении, как и большинстве типовых зданий города, отсутствует подвальное помещение для уменьшения теплового контакта дома с грунтом. Под зданием, опирающимся на свайный фундамент, находится свободное пространство, в котором размещена одна из основных измерительных систем, контролирующих вертикальные перемещения объекта. Датчики гидростатического нивелира в количестве 10 штук закреплены на оголовках свай на одном уровне и соединены между собой заполненными жидкостью трубками, расположенными по периметру здания [1]. Эти компоненты системы эксплуатирующиеся снаружи помещения, подвержены влиянию окружающей среды. Поэтому осуществлялись измерения как температуры воздуха, так и температуры внутри измерительных модулей. Также для дополнительного контроля на несущих стенах верхнего этажа внутри здания установлено несколько двух компонентных датчиков наклона.

В работе подробно представлены результаты измерений, полученных в зимний период с температурой воздуха достигающей -50°C, а также описаны особенности эксплуатации системы мониторинга в таких условиях. Подобное изменение температуры неизбежно приводит к изменению показаний датчиков, которые вызывается как откликом самой конструкции, так и откликом измерительной системы. На основе корреляционного анализа и сопоставления данных различных типов датчиков установлена связь между измеряемыми параметрами, позволяющая оценивать характер изменения данных величин. Также с помощью конечно-элементной модели сооружения здания проведен анализ деформационного поведения при различных граничных условиях в виде меняющихся полей температур и изменения свойств основания.

Литература

[1] Гусев Г. Н., Епин В. В., Цветков Р. В., Сологуб Ф. Д., Деформационный мониторинг здания на многолетнемерзлых грунтах // Вестник ПФИЦ. – 2025. – № 4. – с. 80-86.

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СТАЛЬНОЙ ЗАГОТОВКИ ПРИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ ВИНТОВЫМ ОБЖАТИЕМ

Дементьев В.Б.[1], Волков К.Г.[2], Ганзий Ю.В.[3]
[1,2,3] *Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН, Ижевск*
demen@udman.ru, vkirill@udman.ru, ganziy@udman.ru

Введение. Технология винтового обжатия (ВО) в режиме высокотемпературной термомеханической обработки (ВТМО) заключается в горячей пластической деформации стальной осесимметричной заготовки тремя неприводными роликами, оси которых расположены под углом β' к продольной оси заготовки, и последующем охлаждении водо-воздушной смесью в спрейерном устройстве. В исследованиях [1] отмечается, что данный вид обработки позволяет получать повышенный комплекс механических свойств и качественных показателей проката. Однако, механизм формирования подобного комплекса свойств остается до конца не изученным. Ранее, для определения деформаций по сечениям заготовки были выполнены исследования на модельных образцах [2], однако данный процесс является трудоемким. Отсюда появляется необходимость в моделировании процесса ВТМО ВО с целью определения напряженно-деформированного состояния стальной заготовки в зависимости от заданных режимов обработки.

Постановка задачи. Для определения НДС заготовки использовался программный комплекс DEFORM-3D, который позволяет выполнять трехмерное моделирование процессов обработки давлением. В качестве исходных данных выступали материал заготовки – сталь 30ХГСА; температура индукционного нагрева поверхности заготовки – $T_{\text{наг}}$ = 980 °С; степень обжатия – ε = 20 %; три варианта угла разворота деформирующих роликов $\beta'_1 = 3{,}3°$; $\beta'_2 = 1{,}6°$; $\beta'_3 = 5{,}4°$; подача заготовки S = 5,5 мм/об, диаметр заготовки d = 27,5 мм; диаметр деформирующих роликов $D_{\text{р}}$ = 112,5 мм.

Результаты. Моделирование процесса показало, что в зависимости от отношения углов разворота роликов и подачи заготовки β/β'_i изменяется характер напряженно-деформированного состояния обрабатываемого материала. При этом, на глубине, равной половине радиуса заготовки, наблюдается всестороннее сжатие, а на глубине от половины радиуса до продольной оси характер напрямую зависит от β/β'_i. При β/β'_i = 1 деформации и напряжения в центре заготовки, практически, равны нулю, при β/β'_i > 1 наблюдаются сжимающие напряжения во всех направлениях по всему сечению, при β/β'_i < 1 радиальные и тангенциальные напряжения являются сжимающими, а осевые переходят от сжимающих к растягивающим на глубине половины радиуса заготовки. Полученные результаты подтверждаются результатами эксперимента [2]. В свою очередь, наиболее благоприятным вариантом обработки является случай β/β'_i = 1, при котором наблюдается повышение всего комплекса механических свойств материала на 7-15%.

Заключение. В работе определено, что при ВТМО ВО напряженно-деформированное состояние материала, полученное при равенстве угла разворота роликов и угла подачи, формирует анизотропию структуры, способствующую получению повышенного комплекса физико-механических свойств.

Литература

1. Contribution to improving of machine parts mechanical properties by thermomechanical hardening / V. B. Dementyev, Z. Sagova, A. I. Korshunov [et al.] // MM Science Journal. – 2024. – Vol. 2024, No. 5. – P. 7800-7804.

2. Дементьев В.Б. Экспериментальное исследование деформации при винтовом обжатии с помощью объемной координатной сетки // VIII Международный научный симпозиум «Проблемы прочности, пластичности и устойчивости в механике деформируемого твердого тела. – Тверь, 2015. – с. 145 – 148.

К ВОПРОСУ ОБ ОБОСНОВАНИИ УРАВНЕНИЯ ПЕРЕНОСА ПАРОВ КРЕМНИЯ В ХОДЕ ПАРОФАЗНОГО СИЛИЦИРОВАНИЯ

Демин В.А. [1], Демина Т.В. [1,2], Коновалов В.В. [2], Любимова Т.П. [1,2]

[1]*Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь*
[2]*Пермский федеральный исследовательский центр, Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*
demin@psu.ru, demina-tatyana@yandex.ru

Уравнение массопереноса паров кремния в разреженной газовой среде применительно к технологическому процессу парофазного силицирования имеет вид [1]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} - D_c \left(\nabla C\right)^2 = D\Delta C \,. \qquad (1)$$

Здесь C – массовая концентрация паров кремния в разреженной среде аргона, D – коэффициент диффузии, D_c – так называемый параметр конвективного транспорта:

$$D_c = \kappa RT\rho_{\text{к}}/\eta\mu_{\text{к}} \,. \qquad (2)$$

Сюда входят: R – универсальная газовая постоянная, T – абсолютная температура, κ – проницаемость несущей среды, η – динамическая вязкость паров кремния, $\rho_{\text{к}}$ и $\mu_{\text{к}}$ – плотность газообразного кремния и его молярная масса, соответственно.

С точки зрения математики это нелинейное дифференциальное уравнение в частных производных, которое описывает диффузию паров кремния через несущую среду аргона в условиях среднего вакуума. Строгое физико-математическое обоснование этого уравнения приводится в [2]. Однако уравнение до сих пор вызывает дискуссии, т.к. имеется некоторая неудовлетворенность, а все ли значимые механизмы, отвечающие в действительности за реализацию процесса, учтены в ходе вывода. В предельном случае, когда $D_c = 0$, уравнение (1) описывает массоперенос кремния путем классической диффузии. При $D_c \neq 0$ нелинейное слагаемое становится существенным и при условии полного поглощения кремния на изделии приводит к формированию в реторте специфического выпуклого концентрационного профиля, что свидетельствует о существенной интенсификации транспорта кремния от зеркала расплава к изделию.

Сравнение расчетов с экспериментальными данными показывает, что классическая диффузия не в состоянии объяснить наблюдаемый в опыте интенсивный массоперенос кремния. В то же время для материальных параметров, соответствующих реальным условиям технологического процесса, параметр конвективного переноса (2) принимает такое значение, что нелинейное слагаемое в уравнении (1) становится главным, в результате чего градиент концентрации на поверхности изделия увеличивается примерно на порядок. Оценки показывают**,** нелинейное слагаемое в (1), учитывающее дополнительный конвективный массоперенос в рассматриваемой системе позволяет согласовать расчетное время силицирования изделия с экспериментальным значением.

Работа поддержана бюджетной темой № 124021600038-9.

Литература

[1] Демин В.А., Демина Т.В., Марышев Б.С. Физико-математическая модель переноса газообразного кремния в ходе высокотемпературного силицирования углеродных композитных материалов // Вестник Пермского университета. Физика. 2022. № 3, с. 48-55.

[2] Демин В.А., Демина Т.В. Трехмерное численное моделирование процесса переноса паров кремния в ходе насыщения пористой углеродной матрицы // Теплофизика высоких температур. Т. 62, № 6, 2024. С. 874-883. DOI: 10.31857/ S0040364424060102.

ТРЕХМЕРНОЕ ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЕРЕНОСА ПАРОВ КРЕМНИЯ В УСЛОВИЯХ СРЕДНЕГО ВАКУУМА С ПОМОЩЬЮ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ПАКЕТА CRYSTARPACK

Демин В.А. [1], Демина Т.В. [1,2], Коновалов В.В. [2], Любимова Т.П. [1,2]

[1]*Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь*
[2]*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*
demin@psu.ru, konovalov@icmm.ru

В работе используется модифицированное уравнение нелинейной диффузии [1]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} - D_c \left(\nabla C\right)^2 = D\Delta C \,. \qquad (1)$$

Здесь C – массовая концентрация паров кремния в разреженной среде аргона, D – коэффициент диффузии, D_c – так называемый параметр конвективного транспорта.

Моделируется система в реалистичной геометрии, а именно для цилиндрической реторты с полым цилиндрическим изделием в центре и несколькими тиглями конечных размеров порядка 14 см×23 см, расположенных на дне. Учитывается симметрия, а поэтому расчеты проводятся для сегмента (угол 90°) с периодическими граничными условиями. Конфигурация включает два тигля в таком сегменте.

В расчетах используется авторский высокоуровневый вычислительный пакет CrystarPack [2], который реализует в настоящем случае метод конечных разностей. Применялась неявная схема второго порядка точности, как по времени, так и по пространству. Размерность расчетной сетки варьировалась от 50×50×25 до 100×100×50 узлов. Прочие параметры численного решения: радиусы домена $R_1 = 20$ см и $R_2 = 90$ см, высота реторты $H = 40$ см, а также $D = 0,7\,\text{м}^2/\text{с}$, $D_c = 58\,\text{м}^2/\text{с}$ и $C_m = 0,08$. Величина C_m задает концентрацию кремния над тиглем.

В начальный момент времени над тиглями формируется четкий концентрационный фронт, который быстро (уже при 0,01 с) размывается, и в системе устанавливается сходящийся к оси симметрии поток, обладающий практически идеальной цилиндрической симметрией, несмотря на дискретное расположение источников.

Основной практический результат – значения градиента концентрации (производной) на поверхности изделия. Данные расчетов подтверждают, что модифицированная модель с конвективным переносом дает значения производной на порядок выше, чем модель чистой диффузии, что объясняет наблюдаемую на практике эффективность процесса парофазного силицирования без необходимости чрезмерного приближения тиглей к изделию.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024) задача № 2.10.2.

Литература

[1] Демин В.А., Демина Т.В. Трехмерное численное моделирование процесса переноса паров кремния в ходе насыщения пористой углеродной матрицы // Теплофизика высоких температур. Т. 62, № 6, 2024. С. 874-883. DOI: 10.31857/ S0040364424060102.

[2] Konovalov V.V. Development of CrystarPack numerical package for solving computational fluid dynamics problems // Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing. Vol. 2317, 2022. P. 012003. DOI: 10.1088/1742-6596/2317/1/012003

О ВЛИЯНИИ ВНЕШНЕГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ПРОЦЕСС ПРОТОННОГО ОБМЕНА

Демин В.А. [1], Петухов М.И. [1]

[1]*Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь*
demin@psu.ru, geniusmaxp@yandex.ru

В работе представлены результаты теоретического исследования влияния внешнего электрического поля на процесс формирования планарных волноводов на основе кристалла ниобата лития. В ходе протонирования кристалл приводится в контакт с расплавом бензойной кислоты при относительно высоких температурах, из-за чего на его поверхности появляются условия для активной диссоциативной адсорбции [1,2]. В результате обогащения кристалла ионами водорода с межфазной поверхности в расплав проникают ионы лития и бензоат-ионы. Данные продукты реакции образуют пограничный слой, являющийся источником примеси бензоата лития в расплаве [3].

Результаты расчетов показывают, что интенсивность протонного обмена зависит главным образом от температуры расплава и не столь сильно корректируется внешним электрическим полем. Присутствие данного поля в первую очередь приводит к активным миграционным процессам в кислоте. В зависимости от направления вектора напряженности электрического поля, положительные и отрицательные ионы разнонаправленно стремятся либо “прижаться” к поверхности кристалла, либо отдалиться от него, накапливаясь вблизи непроницаемой стенки реактора. Таким образом, при относительно больших напряженностях у стенки реактора формируется дополнительный пограничный слой. В работе показано, что перестройка профилей концентрации ионов приводит к тому, что количество молекул бензоата лития, появляющегося в расплаве в единицу времени меняется по линейному относительно напряженности поля закону.

Работа выполнена в рамках госзадания Министерства науки и высшего образования РФ № 121101300016-2.

Литература

[1] Jackel J. L., Rice C. E., Veselka J. J. Proton exchange for high-index waveguides in LiNbO3 // Appl. Phys. Lett. 1982. Vol. 41. P. 607–608.

[2] Кичигин В. И., Петухов И. В., Корнилицын А. Р., Мушинский С. С. Влияние влажности бензойной кислоты на электропроводность ее расплавов // Конденсированные среды и межфазные границы. 2022. Т. 24. № 3. С. 315-320.

[3] Demin V. A., Petukhov M. I. Diffusion and electromigration of ions – products of the proton exchange reaction in a benzoic acid melt // Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics. 2025. 18(1). P. 100-108.

ЭЛЕКТРОВЯЗКОУПРУГИЙ ДЕМПФЕР ПРОДОЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ

Демус М.А. [1]

[1]*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

demus.m@icmm.ru

Одной из функций smart-материалов является управление динамическим поведением конструкций. В настоящей работе рассматривается вариант smart-материалов, обеспечивающий демпфирование динамических нагрузок, в котором пьезоэлементы, встроенные в базовый материал, соединены с внешними электрическими цепями, состоящими в общем случае из резисторов, емкостей и индуктивностей. В последние годы появились различные варианты материалов, которые обладают одновременно вязкими и электропроводящими свойствами: электропроводящие полимеры, полимерные конструкционные материалы, графеновые композиты. Эти материалы в связи с их электропроводящими свойствами при наличии электродированных участков поверхностей могут выполнять роль резисторов. Для таких материалов предлагается рассмотреть вариант smart-системы, в которой пьезоэлемент встроен в базовый материал, обладающий вязкими и электропроводящими свойствами, и сопряжен с электродированными участками поверхности. В этом варианте основной материал реализует два диссипативных механизма за счет вязких свойств и резисторов. Оценка диссипативных свойств материала проводится на основе результатов решения задач о собственных и вынужденных установившихся колебаниях. Для математической постановки этих задач используется вариационное уравнение, приведенное в работе [1]. Для описания вязкого поведения материала используется комплексный модуль упругости. Результатом решения задачи о собственных колебаниях являются комплексные собственные частоты, в которых действительная часть определяет собственную частоту, а мнимая часть – скорость затухания колебаний. Результатом решения задачи о вынужденных установившихся колебаниях являются амплитудно-частотные характеристики (АЧХ). В рассматриваемых задачах максимальное демпфирование рассматриваемой моды колебаний будет определяться величиной резистора, который обеспечивает максимальную скорость затухания колебаний или минимальную резонансную амплитуду. Для получения такого резистора необходимо, с учетом электропроводящих свойств материала, найти из решения задачи электростатики соответствующую конфигурацию электродированных поверхностей.

Целью настоящей работы является оценка перспектив построения амортизаторов на основе рассматриваемого класса smart-систем. В качестве примера рассматривается цилиндрический амортизатор из материала с вязкими и электропроводящими свойствами, в который встроены слои из пьезоэлектрических материалов, электродированные участки которых соединены с электродированными участками поверхности основного материала. Для различных вариантов компоновки рассматриваемой системы пьезоэлементами и свойств базового материала приводятся АЧХ и полученных на их основе величинах резистора, обеспечивающих максимальное демпфирование колебаний.

Литература

[1] Матвеенко В.П., Ошмарин Д.А., Юрлова Н.А. Использование электропроводящих композиционных материалов для дополнительного демпфирования смарт-систем на основе пьезоэлементов // ПМТФ. – 2021. – т. 62, № 5. – с. 45-57.

«УНИВЕРСАЛЬНЫЕ» МОДЕЛИ СПЛОШНЫХ СРЕД С КОНЕЧНЫМИ ДЕФОРМАЦИЯМИ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В НЕЛИНЕЙНЫХ ЗАДАЧАХ МЕХАНИКИ КОМПОЗИТОВ

Димитриенко Ю.И.

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва
dimit@bmstu.ru

Доклад представляет собой обзор научных исследований, выполненных непосредственно автором и его сотрудниками, в области разработки так называемых «универсальных» моделей сплошных сред с конечными деформациями, разработанных Ю.И. Димитриенко [1-3]. Изложена теория энергетических и квазиэнергетических пар тензоров напряжений-деформаций. Рассмотрены некоторые важнейшие свойства этих пар.

Представлена теория нелинейных анизотропных тензорных функций, на основе энергетических и квазиэнергетических пар тензоров. Изложены разработанные классы моделей упругих, вязкоупругих и упруго-пластических изотропных и анизотропных сред на основе энергетических и квази-энергетических пар тензоров.

Представлены постановки нелинейных задач механики анизотропных сред с использованием «универсальных» моделей сплошных сред с конечными деформациями.

Изложены результаты применения метода асимптотического осреднения для композитов с конечными деформациями и периодической структурой с использованием «универсальных» моделей сплошных сред.

Представлена информация о разработанном программном комплексе CAE-класса ПК «Манипула», а также о модуле этого комплекса, посвященном решению задач нелинейной механики композитов. Приведены также некоторые примеры решения некоторых прикладных задач.

Литература

[1] Димитриенко Ю.И. Нелинейная механика сплошной среды.-М.:Физматлит.009. –610 с.

[2] Dimitrienko Yu.I. Nonlinear Continuum Mechanics and Large Inelastic Deformations. Springer.2010 – 722 p.

[3] Димитриенко Ю.И. Основы механики твердого тела/ Механика сплошной среды.Т.4.-Изд-во МГТУ им.Н.Э.Баумана. 2013. –624 с.

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОКСИДОВ LiMO$_2$ СО СТРУКТУРОЙ ХАЛЬКОПИРИТА

Дугинова Е.Б. [1], Басалаев Ю.М. [1,2]

[1]*Кузбасский государственный технический университет, Кемерово*
[2]*Российский государственный аграрный университет, Москва*
duginovaeb@kuzstu.ru, ymbas@mail.ru

Развитие современных технологий открывает возможности для синтеза и исследования новых тетрагональных соединений LiMO$_2$ (M = B, Al, Ga, In, Tl). Интерес к ним обусловлен широким спектром практических применений – в частности, в качестве фотокатализаторов, материалов для подложек и оптических компонентов. Обзор экспериментальных и теоретических работ для соединений LiMO$_2$, представленный в работе [1], показал, что структура халькопирита им не свойственна, за исключением кристалла LiBO$_2$, у которого имеется фаза высокого давления [2]. В настоящей работе впервые в рамках теории функционала плотности изучены механические свойства гипотетических кристаллов LiMO$_2$ (M = B, Al, Ga, In, Tl) со структурой халькопирита, позволяющие оценить не только их устойчивость и прочность, но и установить рядовые зависимости электронных и механических свойств, обусловленные заменой атомов в ряду B→Al→Ga→In→Tl. Упругие свойства исследовались с помощью методики, представленной нами в работе [3] для сульфидов в той же структуре. Поскольку вычисленные упругие постоянные удовлетворяют условиям Борна [4], то все исследуемые кристаллы LiMO$_2$ являются устойчивыми. В целом наблюдается общая тенденция уменьшения упругих постоянных с ростом атомного номера элементов M. Наряду с условием Борна проверялось выполнение условия для давления Коши [5]. Все представленные соединения, кроме LiBO$_2$, имеют положительное значение давления Коши, что указывает на их пластичность. В свою очередь LiBO$_2$ (p_a = -37.08 ГПа и p_b = -58.47 ГПа) относится к хрупким материалам. Критерий Пью [6] дополняет информацию о хрупкости и пластичности материалов. Все рассматриваемые кристаллы, кроме LiBO$_2$, можно отнести к прочным и пластичным материалам. LiBO$_2$ не является прочным соединением в данной структуре, что можно связать с высокой плотностью упаковки решетки соединения и наличием сильного тетрагонального сжатия вдоль главной оси кристалла ($\gamma = c/a \approx 1.55 << 2$) [1]. Полученные результаты компьютерного моделирования показали, что соединения LiMO$_2$ в структуре халькопирита могут быть синтезированы и имеют научный и практический интерес.

Литература

[1] Дугинова Е. Б., Басалаев Ю. М., Маринова С. А., Басалаева О. Г., Электронное строение кристаллов LiMO$_2$ (M = B, Al, Ga, In, Tl) // ФПСМ. – 2025. – т. 22, № 3. – с. 290-299.

[2] Marezio M., Remeika J.P., Polymorphism of LiMO$_2$ Compounds and High-Pressure Single-Crystal Synthesis of LiBO$_2$ // J. Chem. Phys. – 1966. – V. 44, №9. p.3348-3353.

[3] Basalaev Yu. M., Duginova E. B., Marinova S. A., First-principles study of properties of hypothetical chalcopyrite-structured disulfides // Solid State Commun. – 2026. – Vol. 409. – p. 116264.

[4] Born M., Huang K., Dynamical Theory of Crystal Lattices // Am. J. Phys. – 1955. – Vol. 23. – p. 474.

[5] Wu Y., Duan Y., Wang X., Peng M., Shen Li, Qi H., Elastic anisotropy and thermal properties of Zr-Al-N ternary nitrides using first-principles explorations // Materials Today Communications. – 2022. – Vol. 33. – p. 104651.

[6] Pugh S. F., XCII. Relations between the elastic moduli and the plastic properties of polycrystalline pure metals // Lond. Edinb. Dublin Philos. Mag. J. Sci. – 1954. – Vol. 45. – p. 823.

ПРИЛОЖЕНИЕ МОДЕЛИ ХЕМОМЕХАНИКИ К ОПИСАНИЮ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ КОРРОЗИИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВОВ

Дудин Д.С. [1], Келлер И.Э. [1]

[1]*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*
dudin.d@icmm.ru, kie@icmm.ru

Элементы газотурбинных установок работают при экстремальных термических и механических нагрузках в агрессивной среде продуктов сгорания топлива, содержащей кислород и примеси серы [1]. В таких условиях развиваются процессы окисления и сульфидно-оксидной коррозии, что приводит к деградации физико-механических свойств поверхностного слоя материала. На поверхности формируются соединения с агрессивными компонентами газовой среды, микротрещины, зоны пористости и происходит вымывание легирующих элементов из приповерхностного слоя [2]. Эти процессы способствуют зарождению макротрещин с последующим разрушением материала при действии эксплуатационных нагрузок. Для адекватного описания кинетики и механики коррозионных процессов необходимы верифицированные многопараметрические модели, учитывающие взаимную диффузию компонентов, химические реакции, развитие деформаций и напряжений.
Сформулирована модель связанных процессов взаимной диффузии и химических реакций в многокомпонентой среде с конечными вязкоупругопластическими деформациями, которая затем была применена к описанию высокотемпературной оксидной и сульфидно-оксидной коррозии жаропрочных сплавов $Ni_{70}Cr_{30}$ и $Fe_{76}Cr_{24}$. Разработан комбинированный подход к разложению диффузионного и деформационного движения, который сочетает маркерную диффузионную систему отсчёта и материальную конвективную скорость при описании связанных процессов механодиффузии и обладает определенными преимуществами перед материальным подходом [3]. Показано, что модель описывает продвижение оксидного фронта в сплаве $Ni_{70}Cr_{30}$ при температуре 900 °C. Также модель описывает формирование слоистой структуры поверхности сплава $Fe_{76}Cr_{24}$ при 750 °C, состоящей из оксида железа, оксида и сульфида хрома, и истощение легирующими элементами подслоя материала, что наблюдается в эксперименте [2]. Получены поля распределения напряжений, соответствующие этим структурам, в разные моменты времени и показана необходимость учёта конечности деформаций, вязкопластических свойств продуктов коррозии. Наблюдаемые сжимающие остаточные напряжения в коррозионном слое с максимальными значениями порядка 2 ГПа оказывают значительное влияние на скорость взаимной диффузии и химических реакций.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024).

Литература

[1] Nikitin V. I., Rybnikov A. I. Sulfide-oxide corrosion of the materials and coatings of gas turbine blades // Therm. Eng. – 2011. – т. 58, № 2. – с. 109-118.

[2] Ning Z., Zhou Q., Liu Z., Li N., Luo Q., Wen D. Effect of imposed stresses on high temperature corrosion behavior of T91 // Corrosion Sci. – 2021. – т. 189. – с. 109595.

[3] Дудин Д. С., Келлер И. Э. Описание высокотемпературной оксидной коррозии нихрома связанной моделью хемомеханики // Известия РАН. МТТ. – 2026. – № 1. – с. 256-292.

ПРИМЕНЕНИЕ НОВОГО МЕТОДА ОЦЕНКИ ЧИСЕЛ РЕЙНОЛЬДСА В ТУРБУЛЕНТНОМ ПОТОКЕ НА ПРИМЕРЕ ДАННЫХ СПУТНИКОВОЙ МИССИИ PARKER SOLAR PROBE

Дуканов И. А.[1,2], Юшков Е. В.[1,3], Соколов Д. Д.[1,2], Фрик П. Г.[4]

[1]*Физический факультет МГУ им. М. В. Ломоносова, г. Москва, Россия*
[2]*ИЗМИРАН, г. Троицк, Россия*
[3]*ИКИ РАН, г. Москва, Россия*
[4]*ИМСС УрО РАН, г. Пермь, Россия*
idukanov@icloud.com

Магнитное и кинетическое числа Рейнольдса (Rm, Re) характеризуют взаимоотношение между диссипацией и нелинейными эффектами течения, определяя развитие турбулентного каскада, длину инерционного интервала турбулентного спектра, скорость диссипации. Задача реконструкции чисел Рейнольдса признана классической задачей астрофизики и, в частности, физики солнечного ветра. Однако для плазмы солнечного ветра вопрос оценки чисел Рейнольдса выглядит весьма проблематично, потому что, с одной стороны, существует множество работ, в которых эти числа уже анализировались (см. [1]), с другой стороны, разброс существующих оценок покрывает при этом много порядков, а это наводит на мысль о проблеме в используемых методах.

Самым распространенным методом оценки чисел Рейнольдса является опосредованный способ, основанный на связи корреляционного и тейлоровского масштабов. Мы будем говорить преимущественно не о числах, а о магнитном числе Рейнольдса, предполагая в рамках доклада равенство Re и Rm, то есть близость к единице магнитного числа Прандтля (см. [2]). Тейлоровский масштаб вычисляется по автокорреляционной функции магнитного поля методом Ричардсона. Этот подход подразумевает экстраполяцию автокорреляционной функции в область идеального приборного разрешения. Основная проблема состоит в том, что в существующих спутниковых миссиях разрешающая способность всех магнитометров недостаточна для однозначного определения тейлоровского масштаба – это и является причиной сильного разброса в оценке Re и Rm.

В докладе мы показываем проблемы этого метода с помощью оболочечного МГД-моделирования [3] на численно рассчитанной эволюции спектров солнечного ветра из начальных данных, собранных вблизи Солнца миссией Parker Solar Probe (см. [4]). Кроме этого, мы предлагаем новый метод оценки, основанный на взаимосвязи этих чисел с расположением точки перегиба автокорреляционной функции. Затем мы применяем его к реальным данным и даем первую существенно уточненную оценку чисел Рейнольдса в солнечном ветре, проводя сравнение с существующими ранее оценками.

Работа поддержана стипендией фонда “Базис” (договор № 25-2-1-104-1 – ФФ СТ25).

[1] Wrench D. et al. What is the Reynolds Number of the Solar Wind? – The Astrophysical Journal. – 2024. – Т. 961. – №. 2. – С. 182.

[2] Pérez-de-Tejada H. Empirical values of the transport coefficients of the solar wind: Conditions in the Venus ionosheath – The Astrophysical Journal. – 2004. – Т. 618. – №. 2. – С. L145.

[3] Abushzada I. et al. Turbulent dynamo in the shell model and the Kazantsev-Kraichnan approach – Physical Review E. – 2025. – Т. 112. – №. 1. – С. 015104.

[4] Raouafi N. E. et al. Parker solar probe: Four years of discoveries at solar cycle minimum – Space Science Reviews. – 2023. – Т. 219. – №. 1. – С. 8.

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СХЕМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ НЕЛИНЕЙНО-УПРУГИХ МАТЕРИАЛОВ

Егорова С.А.[1]

[1]*Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону*
sofegorova@sfedu.ru

Определение механических характеристик материалов и конструкций при больших деформациях остаётся ключевой задачей современной механики сплошной среды. Многие современные материалы, такие как конструкционные полимеры, композиты и биосовместимые мягкие ткани, демонстрируют нелинейное механическое поведение при значительных деформациях. Кроме того, быстрый прогресс в аэрокосмической отрасли, медицине и машиностроении требует точного определения механических свойств материалов в условиях, близких к реальным эксплуатационным нагрузкам. В этой связи создание надежной вычислительной схемы идентификации материальных констант становится критически важным для учета существенно нелинейных эффектов, возникающих в различных условиях нагружения.

В настоящей работе задача идентификации решается на примере вычисления упругих постоянных пятиконстантной модели Мурнагана, описывающей нелинейно-упругие свойства твердого тела. Заданными считаются диаграммы нагружения, полученные на основе статических испытаний по растяжению, кручению и изгибу образцов. Вместо реальных экспериментов используются их вычислительные модели: диаграммы нагружения для каждого типа испытания – зависимость удлинения стержня от величины растягивающей силы, зависимость угла поворота сечения скручиваемого вала от величины крутящего момента, а также зависимость изменения толщины бруса от величины изгибающего момента – для заданных значений материальных параметров строятся с использованием полуобратного метода нелинейной теории упругости. Это позволяет строить аналитические решения и снижать размерность задачи. Однако, метод не является универсальным для тел сложной геометрии и применим лишь к ограниченному набору внешних воздействий. Постановки задач, более адекватно описывающих реальные экспериментальные методики, требуют применения средств конечно-элементного анализа. В качестве средства КЭ-моделирования в данной работе используется FEniCSx – вычислительная платформа с открытым исходным кодом и интерфейсом для языка программирования Python. Проведено моделирование типовых механических экспериментов, определены классы задач, для которых использование полуобратного метода непригодно. В то же время результаты полуобратного метода показали свою эффективность в качестве начальных приближений и референсных решений.

Обратная задача восстановления материальных параметров основывается на решении задачи минимизации среднеквадратичного отклонения диаграммы нагружения образца, построенной для этих параметров, от «экспериментальной» диаграммы. Рельеф минимизируемой функции достаточно сложен, поэтому в качестве средства поиска минимума выбран генетический алгоритм, показывающий лучшие результаты оптимизации в отличие от градиентных методов. Сочетание конечно-элементного подхода и применение алгоритма оптимизации при решении задачи идентификации упругих констант приводит к удовлетворительным результатам, в том числе в случае искусственного зашумления входных данных для обратной задачи.

ОЦЕНКА ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ОСНОВАНИЯ ЗДАНИЯ ПО ДАННЫМ МОНИТОРИНГА НЕРАВНОМЕРНЫХ ОСАДОК

Епин В.В., Корепанов В.В.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
epin.v@icmm.ru

Напряженно-деформированное состояние зданий и сооружений, которые находятся в зоне подработки породных массивов при добычи полезных ископаемых, зависит от их положения относительно мульды сдвижения земной поверхности и параметров деформированного состояния активной толщи грунтов. Существуют различные методы контроля вертикальных перемещений как земной поверхности, так и строительных сооружений [1]. Вместе с тем, актуальной задачей на сегодняшний день является оценка горизонтальной составляющей деформаций как самого породного массива, так и покоящихся на нем строительных сооружений. Поскольку наиболее опасными сочетаниями для напряженно-деформированного состояния здания являются воздействия, которые связаны с одновременным растяжением и осаживанием породного массива в его основании. Контроль этих компонент является критически важной мерой обеспечения безопасной эксплуатации.

В работе предложен подход по оценке горизонтальных деформаций зданий, расположенных в зоне горных выработок, с использованием данных мониторинга его неравномерных осадок. Согласно данным измерений, в зоне подработки массива грунтов, величина горизонтальных деформаций поверхности пропорциональна его кривизне и характерному размеру мульды сдвижения (зоны оседания), а для Верхнекамского месторождения калийных солей эта зависимость верифицирована [2]. На основе представленных результатов многолетних измерений, полученных с помощью системы распределенных по площади здания гидронивелиров, проведена оценка изменения кривизны фундаментов строительного сооружения. Таким образом, эволюционные зависимости вертикальных перемещений за 12-летний цикл наблюдений позволяют проводить оценки изменения горизонтальных деформаций. Массив накопленных данных также позволяет осуществлять прогноз деформационных процессов.

Литература

[1] Гусев Г.Н., Епин В.В., Цветков Р.В., Результаты многолетних наблюдений неравномерных осадок зданий, находящихся на территории Верхнекамского калийного месторождения в г. Березники // Известия Уральского государственного горного университета. – 2022. – № 3(67). – С. 80-89.

[2] Барях А. А., Тенисон Л. О., Самоделкина Н. А. К определению горизонтальных деформаций подработанных территорий // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 11. – С. 5–18.

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД ВОКРУГ СКВАЖИН ПРИ ПРОХОДКЕ УГОЛЬНЫХ ПРОПЛАСТКОВ. ЭКСПЕРИМЕНТ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Еремин М.О. [1,2], Чирков А.О. [1], Пажин А. [1], Скрипкин А.Г. [2]

[1] *Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук*
[2] *ООО «РН-Геология Исследования Разработка», Пермь*
eremin@ispms.ru, chirkov@ispms.ru, pazhin@ispms.ru, SkripkinAG@rn-gir-tomsk.rosneft.ru

Представлены результаты лабораторных исследований образцов керна, отобранных из угольных пропластков нефтяных месторождений Западной Сибири. Глубина отбора образцов керна около 2500 м. Проведены комплексные исследования геомеханических свойств угольных отложений в пластовых условиях. Эксперименты на керне моделировали вскрытие угольных пластов буровой колонной под разными углами, осыпание стенок скважины при механическом воздействии. В результате исследований определены корреляционные зависимости прочностных свойств углей с содержанием глин.

В докладе также представлены результаты математического моделирования процесса бурения скважин при проходке угольных пропластков для различных значений коэффициента Пуассона. Выполнен учет колебаний эквивалентной циркуляционной плотности, а также истории нагружения пород, находящихся на фронте бурения. За основу математической модели принята упругопластическая модель Друккера-Прагера с неассоциированным законом пластического течения и упрочнением/разупрочнением породы в процессе деформирования. Дополнительно учтена возможность поглощения бурового раствора в формирующиеся трещины в процессе бурения на основе метода клеточных автоматов.

Получены закономерности разрушения угольных пропластков вокруг скважин. Пример разрушения представлен на рис. 1.

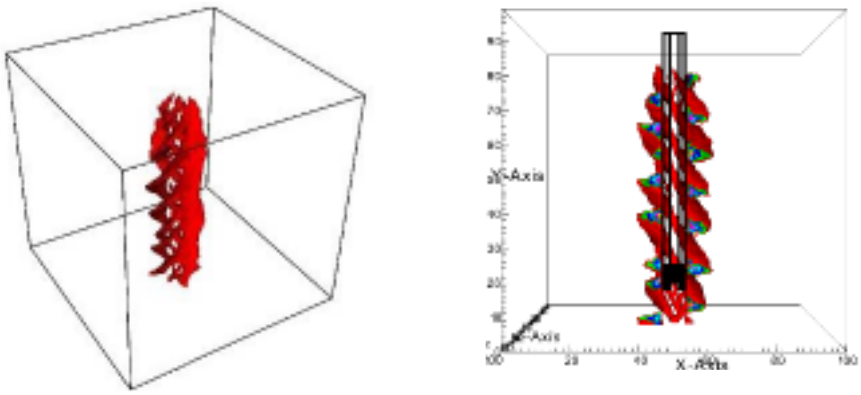


Рисунок 1 – Распределение накопленной неупругой деформации вокруг скважины, (отмасштабировано на максимальное значение неупругой деформации в расчетной области).

Исследование выполнено при поддержке гранта РНФ 25-21-00599.

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ СИСТЕМЫ «ВНЕКЛЕТОЧНЫЙ МАТРИКС МОЗГА-НЕЙРОН» ПРИ МЕХАНИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ В РАМКАХ ДИСКРЕТНОГО ПОХОДА

Еремина Г.М. [1], Смолин А.Ю. [2], Еремин М.О.[3]

Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук

[1]anikeeva@ispms.ru, [2]asmolin@ispms.ru, [3]eremin@ispms.ru,

По данным [1] нейродегенеративные заболевания мозга (НДЗ) могут составить к 2030 году 12.2% от всех заболеваний. Основным механизмом развития НДЗ является повреждение и гибель нейронов. Нейрон состоит из тела клетки, дендритов и одного аксона. Нейроны могут соединяться один с другим, формируя нервные сети. Нейроны растут и расширяют отростки во внеклеточном матриксе мозга (ВКМ) с модулем упругости ~700 Па и сами имеют модуль упругости порядка 1 кПа. При НДЗ на макроуровне происходит повышение жесткости матрикса – умеренная атрофия коры, на мезоуровне происходит нарушение структуры нейронов (отложение амилоидных бляшек и образование нейрофибриллярных клубков), разрыв связей в нервной сети [2]. Считается, что умеренное удлинение (до 50%) ствола нейронов (аксонов) способствует росту нейронной сети. Большое удлинение (более 50%) приводит к разрыву связей в нервной сети. Сжатие нейронов приводит к образованию нейрофибриллярных клубков [3]. Для стимуляции дифференцировки клеток мозга применяют методы лекарственной терапии и методы внешнего энергетического воздействия. Поэтому актуальным является исследование влияния уровня механической стимуляции на пораженные участки мозга с целью дифференцировки клеток мозга и активации роста сети нейронов.

Данная работа направлена на разработку модели системы «ВКМ-нейрон» в рамках метода подвижных клеточных автоматов. Была проведена валидация и верификация моделей ВКМ и системы «ВКМ-нейрон». Проведённый анализ показал, что разработанная модель достаточно точно описывают механическое поведение системы «ВКМ-нейрон».

Результаты моделирования энергетического воздействия на систему «ВКМ-нейрон» показали, что низкоинтенсивное воздействие с плотностью потока энергии в диапазоне от 0,025 − 0.2 мДж/мм^2 способствует удлинению аксона и как следствие образование новых нейронных сетей

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ в рамках научного проекта № 25-79-10114.

Литература

[1] Yuan T., Zhan W., Jamal A., Dini D. On the microstructurally driven heterogeneous response of brain white matter to drug infusion pressure // Biomechanics and modeling in mechanobiology. − 2022. − Vol. 21, iss. 4. − P. 1299–1316.

[2] Hall C. M., Moeendarbary E., Sheridan G. K. Mechanobiology of the brain in ageing and Alzheimer's disease // The European journal of neuroscience. − 2021. − Vol. 53, iss. 12. − P. 3851 – 3878.

[3] Selkoe D. J. Alzheimer disease: mechanistic understanding predicts novel therapies // Annals of internal medicine American College of Physicians, American Physiological Society. − 2004. − Vol. 140, iss.8. − P. 627–638.

ДИСПЕРСИЯ И ЗАТУХАНИЕ ПЛОСКИХ СДВИГОВЫХ ВОЛН, РАСПРОСТРАНЯЮЩИХСЯ В ПОРИСТЫХ ФЛЮИДОНАСЫЩЕННЫХ МАТЕРИАЛАХ

Ерофеев В.И. [1], Ерофеева И.В. [1], Лисенкова Е.Е. [1], Шекоян А.В. [2]

[1]*Институт проблем машиностроения РАН, Нижний Новгород*
[2]*Институт механики НАН РА, Ереван*
erof.vi@yandex.ru, erofeewa.ira2014@yandex.ru,
eelissen@yandex.ru, petrov@org2.ru

В [1, 2] рассматривалась пористая твердая насыщенная жидкостью среда. Размеры пор намного меньше макроскопических размеров среды и распространяющихся в ней возмущений. Для описания деформации такой двухфазной среды необходимо знать законы изменения тензоров деформации твердой и жидкой фаз, и пористость. Причем эти величины взаимосвязаны: изменение одной из них приводит к изменению других, так что уравнения, описывающие эти величины, также будут взаимосвязаны. Сформирована система уравнений динамики, описывающая линейные и нелинейные деформации пористой среды с учетом вязкости твердой и жидкой фаз, межфазным трением, отклонением от закона Пуазейля. В рамках полученных уравнений ранее изучались особенности распространения волн растяжения-сжатия (продольных волн), как линейных [3, 4], так и нелинейных [5–8]. Особенности же распространения сдвиговых волн, не менее важных для неразрушающего акустического контроля пористых материалов, остаются практически не изученными. Настоящая работа, в какой-то степени, заполняет этот пробел. Она посвящена теоретическому исследованию, в рамках математической модели, предложенной в [1, 2], дисперсии и затухания плоских сдвиговых волн, проявляющихся при их распространении в пористых жидконасыщенных материалах. Рассмотрено два частных случая: пористая упругая среда, насыщенная вязкой жидкостью и пористая вязкоупругая среда, насыщенная идеальной жидкостью.

Литература

[1] Багдоев А.Г., Ерофеев В.И., Шекоян А.В. Линейные и нелинейные волны в диспергирующих сплошных средах – М.: Физматлит, 2009. – 320 с.

[2] Begdoev A.G., Erofeyev V.I., Shekoyan A.V. Wave Dynamics of Generalized Continua. – Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2016. – 274 p.

[3] Айзикович С.М., Ерофеев В.И., Леонтьева А.В. Дисперсионные характеристики плоских продольных упругих волн, распространяющихся в пористой жидконасыщенной среде с полостями // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2016. – № 4. – С. 175-186.

[4] Erofeev V.I., Leonteva A.V. Dispersion of elastic waves propagation in a fluid-saturated porous medium with cavities // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 1945, № 012073. – P. 1-7.

[5] Айзикович С.М., Ерофеев В.И., Леонтьева А.В. Нелинейные плоские локализованные волны в пористой жидконасыщенной среде с полостями // Инженерно-физический журнал. – 2017. – Т. 90, № 6. – С. 1441-1450.

[6] Ерофеев В.И., Леонтьева А.В. Волны Римана и ударные волны в пористой жидконасыщенной геометрически нелинейной среде // Инженерно-физический журнал. – 2020. – Т. 93, № 5. – С. 1197-1203.

[7] Ерофеев В.И., Леонтьева А.В. Плоские продольные волны во флюидонасыщенной пористой среде с нелинейной связью между деформациями и перемещениями жидкой фазы // Вычислительная механика сплошных сред. – 2021. – Т. 14, № 1. – С. 5-11.

[8] Erofeev V.I., Leonteva A.V. Nonlinear wave dynamics of liquid-saturated porous media // Interfacial Phenomena and Heat Transfer. – 2023. – Vol. 11, № 3. – С. 41-57.

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СИГНАЛОВ ГИДРО- И СОНОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ ПРИ ИНТЕНСИВНОМ ТЕЧЕНИИ ЖИДКОСТИ В УЗКОМ КАНАЛЕ

Ефремов Д.В., Уваров С.В., Наймарк О.Б.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
efremov.d@icmm.ru, usv@icmm.ru, naimark@icmm.ru

Под гидролюминесценцией понимается эффект свечения жидкостей при интенсивном течении их в узком канале. Условно выделяют два явления: гидролюминесценция (ГЛ) и сонолюминесценция (СЛ). Эмиссия света при СЛ обусловлена кавитационными эффектами и является сложным многофакторным процессом [1]. Эмиссия света при ГЛ в жидкостях связывается с появлением множественных локализованных сдвигов и существенным образом зависит от наличия стенок канала [2].

Регистрация явлений ГЛ и СЛ осуществлялась на гидравлическом масле MOBIL DTE-25 в диапазоне градиентов давления $\nabla P \sim 0{,}7 \div 5$ ГПа/м с использованием оригинальной установки, включающей высокоскоростную видеокамеру Photron Fastcam SA-Z Model 2100 K, фотоумножитель Hamamatsu H6779, подключённый к осциллографу Tektronix DPO 7254 [2]. Обработка сигналов ГЛ и СЛ, полученных с помощью фотоумножителя, показала, что существует пороговое значение скорости деформации $\dot{\varepsilon} \sim 10^5$ с$^{-1}$ (Re ~ 1350, $\nabla P \sim 1{,}2$ ГПа/м), при котором наблюдается резкое увеличение интенсивности сигналов ГЛ и СЛ. Разработанные конструкции измерительных ячеек позволили разделить сигналы, характерные для проявлений ГЛ и СЛ.

Статистический анализ сигналов, полученных с помощью фотоумножителя, показал качественные отличия явления ГЛ от СЛ. Явление СЛ связано с кавитацией. Явление ГЛ связывается с формированием коллективных мод сдвига, аналогично сценариям формирования мод локализованного сдвига при пластической деформации твёрдых тел при достижении пороговых значений скорости деформации $\dot{\varepsilon} \sim 10^5$ с$^{-1}$. Такой переход к качественно новому механизму переноса импульса сопровождается резким изменением диссипативных свойств жидкости, проявлением которых является ГЛ [2].

Полученные результаты могут иметь практическое приложение при проектировании топливных форсунок, разработке методов и соответствующих лабораторных стендов для исследования кавитации [3, 4].

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение №075-15-2024-535 от 23.04.2024).

Литература

[1] Маргулис М.А. Сонолюминесценция // Успехи физических наук. – 2000. – Т. 170, № 3. – С. 263-287

[2] Naimark O.B., Uvarov S.V., Bannikova I.A., Efremov D.V., Bayandin Y.V., Dezhkunov N.V. Localized shear as a quasiplastic mechanism of momentum transfer in liquids // Letters on Materials. – 2023. – Vol. 13, No. 2. – P. 93-97. DOI: 10.22226/2410-3535-2023-2-93-97

[3] Ефремов Д.В., Уваров С.В., Дежкунов Н.В., Наймарк О.Б. Исследование стадийности развития кавитации в каналах по данным измерений гидро- и сонолюминесценции // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2024. Т. 90. № 6. С. 36-41. DOI: 10.26896/1028-6861-2024-90-6-36-41

[4] Ефремов Д.В., Уваров С.В., Наймарк О.Б. Экспериментальное исследование механизмов гидро- и сонолюминесценции и инициирования микровзрывного распыления топлива // Вестник Пермского университета. Физика. – 2025. – № 3. – С. 34-42. – DOI 10.17072/1994-3598-2025-3-34-42.

ЧИСЛЕННЫЙ ВИБРАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ ЗОНДОВОЙ СТАНЦИИ

Жуков Л.О., Лунегов И.В.

Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь
leonidgp@bk.ru, lunegov@psu.ru

Современное высокоточное оборудование, такое как зондовые станции, требует минимизации вибрационных воздействий для обеспечения стабильности работы. Целью работы являлось вычисление амплитуд и карт распределения вибрации конструкции зондовой станции для минимизации резонансных явлений.

Моделирование проводилось в программном комплексе COMSOL Multiphysics 6.2 методом конечных элементов. Конструкция представляет собой плиту из габбро-диабаза, моторизированный XY-позиционер с центральным столиком, верхнюю столешницу и П-консоль для размещения системы технического зрения (Рис. 1).

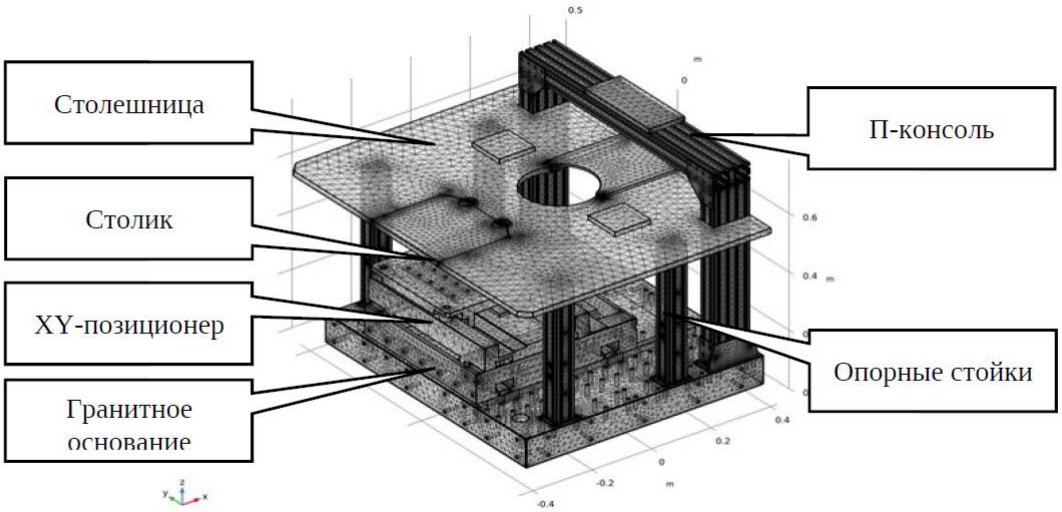


Рис. 1. Схема конечно-элементной сетки и общий вид зондовой станции

Экспериментальные измерения и расчеты проводились в диапазоне частот от 10 Гц до 450 Гц с шагом 2 Гц, что охватывает основной спектр вибраций пятифазных шаговых двигателей. Результаты показали наличие резонансных частот конструкции на 74 Гц, 284 Гц и 306 Гц. При этом амплитуды вибраций на рабочих поверхностях столиков остаются низкими. Максимальная амплитуда колебаний столешницы составляет 5.2 мкм на частоте 116 Гц, центрального столика - 3.2 мкм на частоте 74 Гц. Глобальный резонанс до 50 мкм локализован в областях ножек столешницы и стенок позиционера, не затрагивая рабочие зоны.

Проведенный анализ подтверждает достаточную жесткость конструкции зондовой станции для обеспечения стабильной работы в условиях эксплуатации.

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

Зайцев А. В., Коуров Р. Н., Фукалов А. А.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь,
a-zaitsev@mail.ru

Необходимость решения задач для горизонтальных анизотропных цилиндрических тел, находящихся в поле гравитационных сил, обусловлена различными приложениями в промышленном и дорожном строительстве (конструкции и сооружения неглубокого залегания, облицовки туннелей), ракето- и авиадвигателестроении. Получение новых аналитических решений важно для инженеров, занимающихся уточненным прочностным анализом, тестированием алгоритмов при численном решении более сложных задач, отработкой методик эксперимента с тяжелыми горизонтальными цилиндрами для экспериментальной идентификации материальных констант и функций анизотропных материалов.

Получено новое аналитическое решение задачи о равновесии полого толстостенного тяжелого ортотропного цилиндра со свободной от нагрузок незакрепленной внутренней поверхностью и находящихся под действием неравномерного внешнего бокового давления, моделирующего нахождение на опоре. При интегрировании неоднородной системы уравнений Ламе в цилиндрических и ортогональных координатах метод разделения переменных позволил понизить размерность задачи. Симметрия нагрузки относительно диаметральной вертикальной плоскости и геометрическая симметрия цилиндра предопределили поиск решения системы уравнений Ламе в виде тригонометрических рядов по окружной координате, с записью коэффициентов разложения с помощью обобщенных степенных рядов по радиальной координате. Площадь контактной поверхности цилиндра и грунта предполагалась известной и неизменной, а реакция основания – заданной в виде квадратичной функции (на части внешней поверхности тела, не имеющей общих точек с основанием принималась равной нулю), на которую налагалось условие равенства ее интегральной суммы весу конструкции. Это предположение позволило записать граничные условия для определения постоянных интегрирования частного решения. Система внешних сил при $i = 0$ и $i > 1$ является самоуравновешивающейся (выполняется за счет симметрии нагрузки и геометрической симметрии цилиндра). При $i = 1$ внешняя неоднородная нагрузка уравновешивается массовыми силами. Полученная система уравнений Ламе однородна при $i = 0$ и $i > 1$, неоднородна при $i = 1$. Вклад реакции основания учитывается слагаемыми $i > 1$ в разложении нагрузки по окружной координате.

Вклад неравномерно распределенной реакции основания учитывался 25 слагаемыми в разложении по окружной координате, которое гарантировало сходимость в среднеквадратичном смысле (по энергетической норме), которая была доказана. Вопросы поточечной сходимости и оценка ее скорости должна будет исследоваться дополнительно. Из полученных решений в частном случае следуют выражения для напряжений, деформаций и перемещений в точках полых анизотропных и тяжелых изотропных цилиндров с аналогичными граничными условиями. Проанализировано распределение напряжений в поперечных сечениях тяжелых ортотропных цилиндров, на основе многокритериального подхода, проведена оценка прочности по совокупности критериев. Обнаружены области, где разрушение по различным механизмам (растяжение, сжатие и сдвиг) может быть инициировано.

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

ДЕФОРМИРОВАНИЕ И РАЗРУШЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ФТОРОПЛАСТОВ, НАПОЛНЕННЫХ ГРАФЕНОВЫМ МАТЕРИАЛОМ

Зайцев А.В.[1], Лобанов П.А.[1], Банников М.В.[2], Уваров С.В.[2], Лукьянов Н.С.[1]

[1]*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь,*
[2]*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*
a-zaitsev@mail.ru, lobanov_pa_03@mail.ru

Современные полимерые играют ключевую роль в различных отраслях промышленности, авиастроении, электроники и медицины. Особый интерес представляют фторопласты с высокой химической стойкостью, низким коэффициентом трения и термостабильностью.

Разработана оригинальная семиэтапная программа, которая позволила исследовать механическое поведение функциональных фторопластов, наполненных графеновым материалом, при «жестком» и «мягком» циклическом и квазистатическом активном нагружении и разгрузке. На поверхности образца с реперными точками в его рабочей области размещались четыре датчика акустической эмиссии (АЭ) на расстоянии 15 мм между центрами. Противоположная поверхность образца использовалась для высокоскоростного ИК-сканирования для исследования эволюции поля температур. Нагружение образцов из «чистого» и функциональных фторопластов, наполненных графеновым материалом до концентрации 0,03; 0,3 и 3 % масс. (эксперименты проведены с 4 образцами для каждой концентрации), осуществлено по разработанной программе с непрерывной записью in situ сигналов АЭ, поля температур и измерения активного сопротивления на оборудовании ПФИЦ УрО РАН: система многоканальной регистрации АЭ Vallen AMSY-6, серво-гидравлическая испытательная машина Bi-00-100 и ИК-камера CEDIP Silver SC5000.

В результате проведенных испытаний для всех образцов функциональных фторопластов был обнаружен эффект J. Kaiser (АЭ эффект памяти), который проявлялся при возрастании амплитуды нагрузок во время реализации этапов циклического нагружения. Эта общая фундаментальная закономерность поведения материалов при циклическом нагружении, установленная для нового класса материалов – функциональных наполненных полимеров, свидетельствует о достоверности всех полученных экспериментальных результатов при деформировании по разработанной программе.

Получены новые экспериментальные результаты, иллюстрирующие значительное снижение тепловыделения при циклическом нагружении образцов из функциональных фторопластов с увеличением концентрации графенового материала. Особенно показательно уменьшение диссипации энергии (от 3 до 10 раз при 3 % наполнении). Получены новые оценки для теплоемкости и показана ее зависимость от частоты циклического нагружения. Получены новые результаты эволюции удельного сопротивления функциональных фторопластов, модифицированных графеновым материалом, при in situ нагружении по разработанной программе. Получены пороговые зависимости сопротивления, связанные с нарушением проводимости. Специально проведенные экспериментальные исследования показали, что у образца, который подвергался монотонному «жесткому» растяжению без предварительных этапов циклического нагружения, скорость роста сопротивления была выше, чем у образца, подвергнутого циклическому нагружению. Это происходит из-за разрушения адгезионных связей и проявлениями новых механизмов деформирования, которые ранее были обнаружены при помощи АЭ.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства высшего образования и науки РФ (рег. номер НИОКТР № 124020200116–1).

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

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

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь,
a-zaitsev@mail.ru, maksim-shobey@yandex.ru

Подшипник – один из ответственных, высоконагруженных узлов, выход из строя которого или некорректная работа приводит, как правило, к нештатной работе или остановке механизма. Оценка работоспособности высоконагруженных подшипников качения для авиационных двигателей состоит в определении их долговечности и безопасного ресурса. Долговечность подшипниковых опор оказывающих существенное влияние на ресурс двигателя, является.

Среди методов неразрушающего контроля, которые получили наибольшее распространение, можно выделить вибродиагностику. Этот метод предусматривает запись временного ряда с датчика виброускорений и его последующую обработку с помощью преобразования Фурье (ПФ). В результате получаем спектр мощности сигнала, по изменению которого можно следить in situ за работой подшипниковых опор. При обработке временного сигнала, снимаемого датчиком виброускорений, происходит наложение частот, индуцированных локальными дефектами, с рабочими. Поэтому ПФ часто применяют совместно с методами фазовых портретов, характеристических функций и др. Для сохранения информации о частоте и фазе после преобразования временного сигнала, а также получения возможности рассматривать только те масштабные уровни разложения, которые представляют интерес, в качестве способа его обработки виброускорения было использовано непрерывное вейвлет-преобразование.

Проведены натурные испытания роликового подшипника NU206W на специально сконструированном в лаборатории «Трибодиагностика и контактная прочность» Пермского национального исследовательского университета стенде ДМ–28 при частотах вращения 1070, 2060 и 3040 об/мин, и нагрузке 215 Н. Количество тел качения диаметром 7,5 мм было равно 13. На корпус исследуемого подшипника был установлен вибропреобразователь DV–1 21.0, входящий в состав системы вибромониторинга TIK RVM. Сигнал виброускорения продолжительностью 2 с снимался через 600 с после начала запуска установки при заранее прогретом масле и с приработанными деталями. Первые эксперименты были произведены с бездефектными подшипниками. Нанесение дефекта производилось на ранее испытанных бездефектных подшипниках после их демонтажа. Дефект представлял собой канавку прямоугольного профиля с глубиной 600 мкм и длиной 100 мм, нанесенную на внутреннее кольцо электрографическим маркером. После нанесения дефекта проведены повторные испытания при той же нагрузке, на тех же частотах вращения.

Проведен спектральный (Фурье-анализ) анализ сигналов виброускорения и анализ с помощью непрерывных вейвлет-преобразований: вторая (Mexican Hat) и 10-я производная Gaussian Function (вещественные), а также Paul, Gabor и Morlet (комплексные). В результате проведенного анализа построен «портрет виброускорений» бездефектного роликового подшипника, подтверждена частота вращения ротора, а также идентифицированы частоты, связанные с локализованным модельным дефектом на внутреннем кольце. Разработан экспресс-метод определения дефектов подшипников качения, основанный на вейвлет-анализе сигналов виброускорения.

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

Зайцев А.В.[1], Поснов А.С.[1], Химуля В.В.[2], Шевцов Н.И.[2], Карев В.И.[2], Коваленко Ю.Ф.[2]

[1]*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь,*
[2]*Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН, Москва*
a-zaitsev@mail.ru

Проведена обработка результатов испытаний кубических образцов высоко- и низкопористых нефтенасыщенных трансверсально-изотропных известняков, слагающих продуктивные пласты одного из месторождений Пермского края. Эксперименты проведены на Испытательной системе трехосного независимого нагружения (ИСТНН) лаборатории геомеханики ИПМех РАН. ИСТНН обеспечивает равномерное приложение нагрузок по всей площади поверхности образца в процессе деформирования, включая стадию разрушения, позволяет проводить «жесткое» и «мягкое» нагружение.

Плоскость изотропии задается напластованием, если оно может быть определено. Идентификация упругих модулей (две пары модулей Юнга и коэффициентов Пуассона) трансверсально-изотропного тела связана с необходимостью решения недоопределенной системы уравнений. Для решения проблемы недоопределенности предполагаем, что исходному трансверсально-изотропному телу ставится в соответствие фиктивное изотропное.

Применялось два способа определения модуля Юнга и коэффициента Пуассона фиктивного изотропного тела. В первом способе для исходной недоопределенной системы из трех уравнений (обобщенный закон Гука) записывались две системы, из решения которых находились две пары искомых модулей. Второй способ связан с решением двух уравнений, записанных в инвариантном виде. Эти уравнения содержат величины, инвариантные относительно преобразований, допустимых над изотропным телом, а коэффициентами связи являются модули сдвига и объемного сжатия. В отличие от первого способа удается определить единственную пару искомых модулей. Найденные модули Юнга и коэффициенты Пуассона фиктивного изотропного тела, подставленные в системы из трех уравнений обобщенного закона Гука, позволяют записать выражения для оставшихся трех упругих модулей трансверсально-изотропной горной породы. В первом способе будет четыре варианта определения искомых величин, а во втором – два. Проводилась проверка удовлетворения найденных независимых упругих модулей условиям положительности собственных значений оператора упругости (условие существования упругого трансверсально-изотропного тела). Пятая деформационная постоянная трансверсально-изотропной среды – продольный модуль сдвига не может быть найден из решения системы уравнений обобщенного закона Гука из-за отсутствия сдвига в программе нагружения для ИСТНН. Для ее определения можно воспользоваться ограничениями в форме неравенств для параметров анизотропии или разработать методику проведения эксперимента на кручение образца из геоматериала и последующую его расшифровку. Модуль сдвига в плоскости изотропии принимается равным модулю сдвига фиктивного изотропного тела.

Проведена оценка влияния предварительной экстракции на деформационные свойства карбонатных пород. Показано существенное влияние органической фазы на значения модулей Юнга и коэффициентов Пуассона для различных диапазонов давлений обжатия.

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

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОГО ОТКЛИКА АНИЗОТРОПНЫХ СКАФФОЛДОВ В УСЛОВИЯХ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С КОСТНОЙ ТКАНЬЮ

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

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь

verazatonskaa75@gmail.com, n.elenskaya@pstu.ru, PashchencoIA@pstu.ru, m.tashkinov@pstu.ru

Решетчатые структуры считаются подходящими для восстановления целостности костной ткани, поскольку их механические характеристики могут быть эффективно адаптированы к свойствам окружающих тканей за счёт регулирования. Один из наиболее перспективных подходов к проектированию таких объектов основывается на применении трижды периодических минимальных поверхностей (ТПМП), которые описываются аналитическим выражением и контролируются за счет управления его параметрами. Это, в свою очередь, позволяет проектировать структуры, механический отклик которых приближен к отклику замещаемого фрагмента костной ткани в том числе с учетом свойственной ей анизотропии.

Целью работы являлось исследование влияния анизотропной архитектуры скаффолдов для замещения костной ткани на основе ТПМП на их механические свойства. Задача заключалась в том, чтобы оценить механический отклик структур на сжатие с различной степенью анизотропии в условиях контактного взаимодействия с костной тканью, а также сопоставить полученные результаты с данными для периодического скаффолда.

Для определения механических свойств структур спроектированных на основе ТПМП под воздействием сжимающих нагрузок был использован метод конечных элементов. Задача решалась в линейно-упругой постановке до нагружения 1.25 МПа в условиях скользящего контакта с заданным коэффициентом трения в тангенциальном направлении.

Анализ механического отклика проводился на основе данных о распределении напряжений по объему скаффолда, в области контактного взаимодействия с костной тканью и в системе «скаффолд-кость» в целом. Влияние начального деформирования элементарной ячейки на анизотропию свойств оценивалось по механическому отклику на сжатие в трех направлениях и коэффициенту анизотропии. Проводился сравнительный анализ процентного соотношения площади контактного взаимодействия скаффолда с костной тканью, оценивалось влияние заданного коэффициента трения.

Полученные результаты свидетельствуют о возможности контролируемого формирования анизотропных свойств скаффолдов на основе ТПМП. Установлено, что осевое деформирование элементарной ячейки приводит к повышению жёсткости скаффолда, что требует учёта на этапе проектирования. Показано, что площадь контакта скаффолда с костной тканью проявляет высокую чувствительность как к топологии контактирующих поверхностей, так и к величине коэффициента статического трения. Представленные данные расширяют возможности целенаправленной адаптации физико-механических характеристик скаффолдов при разработке и производстве персонализированных имплантатов.

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

ВОЛНЫ РЭЛЕЯ В ИЗОТРОПНОМ ТЕРМОУПРУГОМ ПОЛУПРОСТРАНСТВЕ

Земсков А.В.[1,2]

[1]*Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет), Москва*

[2]*НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва*

azemskov1975@mail.ru

В работе исследуется процесс распространения волн Рэлея в изотропной полуплоскости с учетом взаимодействия температурных и механических полей. Математическая постановка задачи включает в себя связанную систему уравнений термоупругости в перемещениях [1]

$$\rho\ddot{\mathbf{u}} = (\lambda+\mu)\,\mathrm{graddiv}\,\mathbf{u} + \mu\Delta\mathbf{u} - \Lambda\,\mathrm{grad}\,\vartheta,\ \ \rho c_0\dot{\vartheta} = \kappa\Delta\vartheta - T_0\Lambda\,\mathrm{div}\,\dot{\mathbf{u}}, \tag{1}$$

где $\mathbf{u} = \{u_1, u_2\}$ – компоненты вектора перемещений; λ и μ – упругие постоянные Ламе; ρ – плотность; $\Lambda = \alpha(3\lambda + 2\mu)$ – температурная постоянная; α – коэффициент линейного теплового расширения; κ – коэффициент теплопроводности; $\vartheta = T - T_0$; T – актуальная температура среды; T_0 – начальная температура среды, c_0 – удельная теплоемкость.

Для нахождения Волн Рэлея рассматривается краевая задача, включающая уравнения (1) и следующие граничные условия, выражающие условие отсутствия нагрузок и тепловых потоков на границе полуплоскости

$$\sigma_2\big|_{x_2=0} = 0,\ \ \tau_{12}\big|_{x_2=0} = 0,\ \ q_2\big|_{x_2=0} = 0. \tag{2}$$

Здесь σ_2 – нормальное напряжение, τ_{12} – касательное напряжение, q_2 – нормальная составляющая вектора теплового потока, x_i – декартова координата, $x_2 = 0$ – граница полуплоскости.

Решение задачи (1), (2) ищется в виде бегущей волны [2]

$$u_j = U_j e^{i(\omega t - k_1 x_1) - k_2 x_2},\quad \vartheta = \Phi e^{i(\omega t - k_1 x_1) - k_2 x_2}. \tag{3}$$

где ω – частота волны Релея, подлежащая определению, $\mathbf{k} = \{k_1, k_2\}$ – волновой вектор, в котором k_1 – заданная величина, k_2 полежит определению.

В результате получено дисперсионное уравнение, связывающее частоту распространяющейся волны с компонентами волнового вектора, а также уравнение для определения частоты рэлеевской термоупругой волны, решение которого находится приближенно. Исследовано влияние механических характеристик материалов на амплитуды и частоты упругих и термоупругих волн Рэлея.

Литература

[1] Вестяк В.А., Земсков А.В., Тарлаковский Д.В., Федотенков Г.В. Математические основы термоупругости: Учебное пособие. – М.: Изд-во МАИ, 2021. – 92 с.: ил.

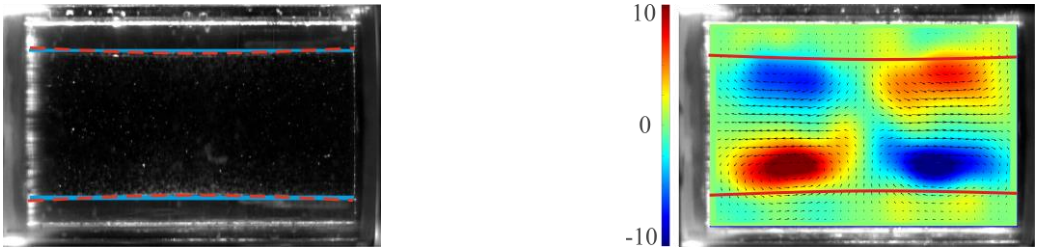
[2] Аменздаде Ю.А. Теория упругости: Учебник для университетов. – Баку: Азербайджанское государственное издательство учебно-педагогической литературы, 1968. – 250 с.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИНЕРЦИОННЫХ ВОЛН ВО ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ДВУХЖИДКОСТНОЙ СИСТЕМЕ

Зимасова А.Р. [1]

[1]*Пермский государственный гуманитарно-педагогический университет, Пермь*
zimasova_ar@pspu.ru,

Традиционно инерционные волны исследуются во вращающихся однофазных системах [1, 2]. Направление распространения таких волн определяется только частотой, совпадение которой с одной из частот собственных мод полости приводит к резонансному увеличению кинетической энергии колебаний жидкости [1]. Наличие границы раздела во вращающихся многофазных системах сильно обогащает спектр возможных волновых режимов. Так, в [3] обнаружены и изучены центробежные азимутальные волны на центрифугированной границе раздела несмешивающихся жидкостей разной плотности. Целью данной работы является экспериментальное изучение влияния внутренних инерционных волн на границу раздела жидкостей, находящихся в быстро вращающейся вокруг горизонтальной оси цилиндрической полости. Для возбуждения инерционных колебаний жидкостей скорость вращения полости модулируется по гармоническому закону. Обнаружено, что наиболее сильный инерционный отклик границы раздела наблюдается при совпадении частоты модуляции с одной из собственных частот осесимметричных инерционных мод. На Рис. 1*а)* представлена фотография границы раздела жидкостей, полученная в фазе максимального углового положения полости. Для сравнения синей сплошной линией обозначена граница при равномерном вращении, а красной пунктирной – её текущая форма. Можно заметить, что внутренний столб жидкости сильно деформируется: в центральной части формируется осесимметричная шейка, при этом вблизи торцов диаметральный размер внутренней жидкости увеличивается. На Рис. 1*б)* показано мгновенное поле скорости в той же фазе, полученное PIV – методом, где цветом показана завихренность. Видно, что направление движения потоков согласуется с формой границы раздела. В противоположной фазе ситуация противоположная. Процесс деформации границы периодически повторяется с частотой модуляции скорости.



а) *б)*

Рис. 1. Форма границы раздела при $\varepsilon = 0.09$ в фазе либраций $\Omega_{lib}t = 0$: *а)* фото эксперимента; *б)* мгновенное поле скорости

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда (проект 25-11-00358).

Литература

[1] Subbotin S. Steady circulation induced by inertial modes in a librating cylinder //Physical Review Fluids. – 2020. – Т. 5. – №. 1. – С. 014804.

[2] Гринспен Х. Теория вращающихся жидкостей. – Гидрометеоиздат, 1975.

[3] Kozlov N. V., Kozlova A. N., Shuvalova D. A., Dynamics of im-miscible liquids in a rotating horizontal cylinder // Phys. Fluids. – 2016. – Vol. 28. – P. 11.

БИКОНТИНУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВОДОРОДА И ТРУБЫ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

Зиновьева Т.В. [1], Беляев А.К. [1]

[1]*Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург*
ztv@ipme.ru, bak@ipme.ru

Моделирование влияния водорода на механическую прочность конструкций – актуальная научно-техническая проблема. В литературе описаны многочисленные аварии, спровоцированные воздействием водорода на металл, оно опасно тем, что не проявляется внешними признаками вплоть до разрушения конструкций.

Литературные обзоры по теме водородного охрупчивания сталей можно найти, например, в работах [1, 2]. Изменение механических свойств металла конструкции под воздействием водорода вызывает перераспределение напряжений в ней, что, в свою очередь, влияет на диффузию водорода. Разработка подходов, позволяющих учитывать эту взаимосвязь при расчетах на прочность реальных конструкций, остается актуальной.

Предложена математическая модель процесса деградации материала трубы под давлением и воздействием водорода. Рассматриваются два континуума – деформируемое тело и свободно-диффундирующий водород, который при выполнении некоторых условий присоединяется к атомам металла, становясь связанным. При этом он отнимает энергию у кристаллической решётки, что ведет к ухудшению механических свойств металла. Исследование было начато в работах [3, 4], но в отличие от построенных ранее моделей, здесь в уравнения введена скорость образования связанного водорода, что позволяет провести оценки длительности процессов насыщения металла и деградации его свойств.

Поскольку процесс взаимодействия водорода и металла очень медленный, он рассматривается как квазистационарный. Решена связанная задача теории упругости для трубы под давлением и диффузии свободного водорода в ней. Для этого разработан итерационный алгоритм расчёта состояния трубы, ослабляемой водородом, с течением времени. Проведены численные расчёты механических напряжений, концентраций свободного и связанного водорода в трубе, а также изменения модуля упругости металла в результате накопления повреждённости.

Расчёты показали, что некоторые сочетания заданных на внутренней стенке трубы концентрации водорода и давления могут привести к зарождению трещин и пор и стать причиной аварийного выхода трубы из эксплуатации.

Работа выполнена в рамках госзадания ИПМаш РАН FFNF-2024-0003 № 124041100005-4.

Литература

[1] Djukic M.B. et al. Towards a unified and practical industrial model for prediction of hydrogen embrittlement and damage in steels // Procedia Structural Integrity. – 2016. – Vol. 2. – pp. 604-611.

[2] Яковлев Ю.А., Полянский В.А., Седова Ю.С., Беляев А.К. Модели влияния водорода на механические свойства металлов и сплавов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2020. – № 3.– с. 136-160.

[3] Belyaev A. K., Polyanskiy V. A., Yakovlev Y. A. Stresses in a pipeline affected by hydrogen // Acta Mechanica. – 2012. – 223(8). – pp. 1611-1619.

[4] Зиновьева Т.В. Моделирование условий возникновения трещин в трубе под давлением водородосодержащей среды // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2023. – № 3. – с. 86-96.

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА СТАЛЕЙ, ЭКСПЛУАТИРУЮЩИХСЯ В УСЛОВИЯХ АРКТИКИ

Иванов А.Р. [1]

[1]*Институт физико-технических проблем Севера имени В.П. Ларионова СО РАН, Якутск*
spartak01@mail.ru

Одним из недостатков существующих методов расчета остаточного ресурса, является необходимость применения разрушающих методов и вырезки образцов для механических испытаний, и невозможность оперативной диагностики текущего состояния материала в полевых условиях. В статье представлена методика оценки остаточного ресурса магистральных газопроводов и резервуаров, эксплуатирующихся в условиях Арктики на основе разработанной методики оценки предельного состояния конструкционных материалов. Данная методика оценки остаточного ресурса не требует использования методов неразрушающего контроля и сложной аппаратуры.

Литература

[1] Лыглаев А.В., Большаков А.М., Иванов А.Р. Оценка предельного состояния металлоконструкций, эксплуатирующихся в условиях Крайнего Севера / Заводская лаборатория – апрель №7-2009, С.44-47.

[2] Иванов А.Р., Большаков А.М. Способ оценки потери пластичности по изменению микротвердости конструкционной стали / Патент на изобретение № 2382351 от 22.02.2010г.

[3] Иванов А.Р. Разработка методики оценки остаточного ресурса трубопроводов и резервуаров, работающих в условиях Крайнего Севера. Автореферат дисс. на соиск. уч. степени канд. техн. наук. – Новосибирск. –2011. –18 с.

[4] Ivanov A.R., Bolshakov A.M. and Lyglaev A.V. Estimation of ultimate state of metal structures exploited in the environment of the extreme north / Inorganic materials – Volume 46, №14-2010, 1564-1566, DOI: 10.1134/S0020168510140177.

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ И ФОРМЫ ВКЛЮЧЕНИЙ В ПРИПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ ЭЛАСТОМЕРНОГО НАНОКОМПОЗИТА

Изюмов Р.И. [1], Свистков А.Л. [1]

[1]*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*
izumov@icmm.ru, svistkov@icmm.ru

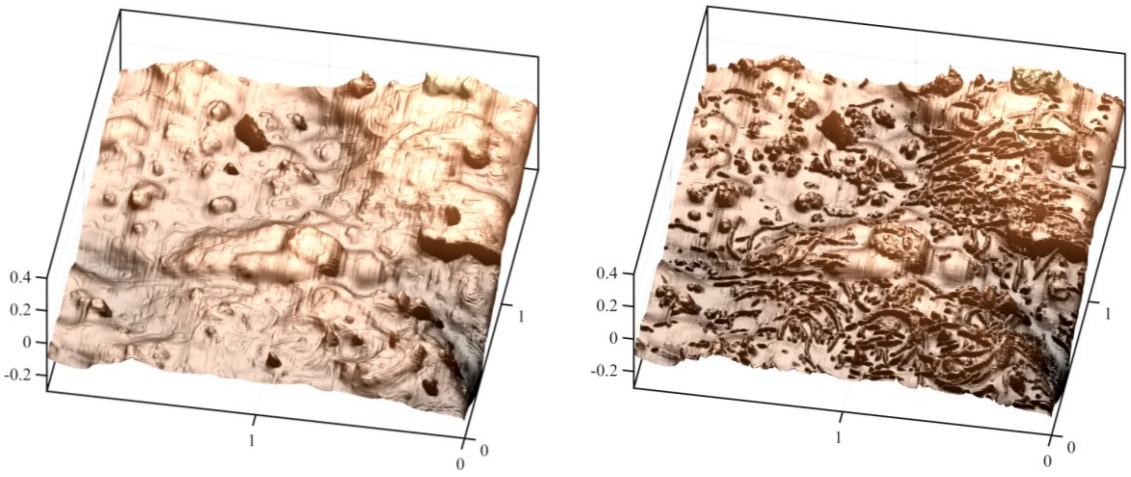
Разработана методика расшифровки результатов атомно-силовой микроскопии с целью восстановления подповерхностной структуры жёсткого наполнителя в мягком эластомерном связующем. Для этого были решены следующие задачи:

- Разработана новая модель взаимодействия тел на нанометровом масштабе. Модель применима для общего случая конечных деформаций и неоднородности материала образца с учётом влияния поверхностной энергии.

- Проведены численные эксперименты, по результатам которых с помощью новой модели получена связь глубины расположения жёстких включений с диссипацией энергии взаимодействия образца с зондом атомно-силового микроскопа (АСМ). На основе полученного соотношения и модельных силовых кривых разработан способ восстановления формы и расположения включений, находящихся под поверхностью образца.

- Получено соотношение, связывающее величину диссипации энергии зонда с фазовым сдвигом колебаний кантилевера в полуконтактном режиме работы АСМ. Эта связь позволяет применять описанный выше способ к экспериментально получаемому фазовому портрету поверхности образца и восстанавливать трёхмерную структуру распределения наполнителя в приповерхностном слое.

На рисунке 1 показан результат обработки данных, полученных в полуконтактном режиме АСМ. Материал – бутадиен-нитрильный каучук с наполнением технический углерод (33 м.ч.) и многостенные углеродные нанотрубки (7 м.ч.).



а б

Рис. 1. Иллюстрация метода. (а) – участок поверхности образца (2х2 мкм) по данным АСМ. (б) – трехмерная структура наполнителя в приповерхностном слое, полученная после обработки данных АСМ разработанным методом

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АНИЗОТРОПИИ ХАРАКТЕРИСТИК СОПРОТИВЛЕНИЯ МАЛОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ АДДИТИВНОЙ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ 316LSI

Ильиных А.В. [1]

[1] *Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь*
ilinih@yandex.ru

При изготовлении деталей с помощью аддитивных технологий в материалах возникает анизотропия механических свойств. Экспериментальное исследование механических свойств аддитивных конструкционных материалов проводят на образцах, вырезанных в разных направлениях из наплавленной заготовки. Заготовки из нержавеющей стали 316LSi были наплавлены в лаборатории методов создания и проектирования систем «материал-технология конструкция» ПНИПУ. Целью работы является экспериментальное исследование анизотропии механических характеристик при циклическом и статическом нагружении нержавеющей стали 316LSi, полученной методом проволочно-дуговой наплавки.

Экспериментальные исследования при статическом растяжении и малоцикловой усталости при жестком режиме нагружения проводились на базе Центра экспериментальной механики ПНИПУ. Для оценки анизотропии статических и циклических свойств рассматриваемой стали были проведены испытания на образцах, вырезанных из наплавленной заготовки в трех различных направлениях, связанных с особенностями послойного изготовления. Проведена оценка анизотропии комплекса механических свойств при статическом и циклическом нагружении. Показано, что у аддитивной стали 316LSi упругие свойства сильнее всего зависят от направления вырезки образцов [1].

Проанализировано влияние ориентации образцов на механическое поведение нержавеющей стали при малоцикловой усталости. Показано, что наименьшая циклическая долговечность при равных значениях амплитуды деформаций получилась на образцах, вырезанных в диагональном направлении по отношению к плоскости наплавленных слоев [1]. Полученные результаты хорошо согласуются с экспериментальными данными по стали аустенитного класса 308LSi [2]. Проведено сопоставление полученных кривых малоцикловой усталости с кривыми, параметры которых рассчитаны на основе уравнения Басквина-Мэнсона-Коффина и данных статических испытаний при растяжении. Показана принципиальная возможность прогнозирования характеристик малоцикловой усталости с использованием уравнения Басквина-Мэнсона-Коффина для различных направлений вырезки образцов.

Литература

[1] Ильиных А.В., Паньков А.М., Лыкова А.В., Аксенов А.Г., Трушников Д.Н. Исследование анизотропии характеристик малоцикловой усталости нержавеющей стали 316LSi, полученной методом проволочно-дуговой наплавки // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2026. – Т. 92, № 1. – с. 60-69.

[2] Трушников Д.Н., Келлер И.Э., Кривоносова Е.А., Ильиных А.В., Чудинов В.В., Аксенов А.Г., Хомутинин И.С. Исследование специальных свойств стали аустенитного класса, полученной аддитивными гибридными технологиями // Металлург. – 2025. – № 1. – с. 61-66.

ОБОБЩЁННАЯ МОДЕЛЬ ANAND ДЛЯ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ ПОЛИМЕРОВ И КОНСИСТЕНТНЫХ СМАЗОК

Каменских А.А., Носов Ю.О.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
anna_kamenskih@mail.ru, ura.4132@yandex.ru

Мостовые сооружения представляют собой критически важный элемент транспортно-логистических систем. Нарушение их работоспособности влечёт за собой существенные временные и экономические издержки, включая нарушение транспортных потоков и дополнительные затраты на восстановление инфраструктуры. Особое значение в обеспечении надёжности конструкции имеет опорная часть моста, которая непосредственно определяет временные интервалы безремонтной эксплуатации [1]. Анализ конструктивных решений показывает, что наиболее уязвимым звеном опорной части выступают применяемые неметаллические материалы, к числу которых относятся антифрикционные полимеры и консистентные смазки. Современные достижения в области вычислительной техники позволяют разрабатывать цифровые модели конструкций, способные прогнозировать их поведение в течение длительного эксплуатационного периода. Однако достоверность таких прогнозов напрямую зависит от корректности выбора определяющих соотношений, описывающих механическое поведение материалов, что требует тщательного сочетания экспериментальных и численных методов исследования.

Для неметаллических материалов задача осложняется наличием широкого спектра явлений, наблюдаемых при функционировании материалов на практике и при лабораторных исследованиях [2, 3]: ползучесть, релаксация напряжений, зависимость поведения материалов от скоростей деформирования, динамические и термомеханические характеристики, а также влияния старения и окружающей среды. Эти факторы создают существенные неопределённости при построении и верификации математических моделей, что подчёркивает необходимость дальнейшего развития численных моделей.

В рамках настоящего исследования анализируются определяющие соотношения, описывающие упруговязкопластическое поведение неметаллических материалов типа полимер и смазка, с применением конститутивной модели Anand. Посредством решения краевой задачи с использованием идентифицированных параметров проведено сопоставление расчётных и экспериментальных результатов, которое продемонстрировало расхождение менее 1 %. Это свидетельствует о высокой адекватности выбранной модели для описания механического поведения исследуемого материала в широком диапазоне температур и скоростей деформирования.

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

Литература

[1] Nosov Yu.O., Kamenskikh A.A. Influence analysis of lubricant recesses on the working capacity of the bridge span spherical bearing // Lubricants. – 2022. – Vol. 10. – Art. 283. DOI: 10.3390/ lubricants10110283

[2] Петухов Д.С., Адамов А.А., Келлер И.Э Выбор и идентификация модели упруговязкопластичности наполненного фторкомпозита по данным испытаний на свободное и стесненное сжатие // Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don). – 2022. – Т. 22, № 3. – С. 180–192. DOI: 10.23947/2687-1653-2022-22-3-180-192

[3] Bogdanova A.P., Kamenskikh A.A., Muhametshin A.R., Nosov Y.O. Numerical Modeling of Thermomechanics of Antifriction Polymers in Viscoelastic and Elastic-Viscoplastic Formulations // Applied Mechanics. – 2026. – Vol. 7. – Art. 2. https://doi.org/10.3390/applmech7010002

УПРАВЛЕНИЕ ЧАСТОТНЫМ СПЕКТРОМ ПЛАСТИНЫ С ПОМОЩЬЮ ПЬЕЗОАКТУАТОРА

Каменских А.О., Матвеенко В.П.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
kamenskikh.a@icmm.ru, mvp@icmm.ru

Тонкостенные конструкции (пластины и оболочки), широко используемые в ракетно-космическом машиностроении в качестве внешней обшивки изделий, обеспечивают герметичность и защиту от внешних воздействий. Стремление к минимизации массы путём уменьшения толщины оболочек приводит к снижению их изгибной жёсткости, устойчивости и собственных частот колебаний, что повышает опасность резонансных режимов. Один из способов решения этой проблемы — управление динамическими характеристиками за счёт формирования регулируемого напряжённого состояния в тонкостенных деталях. Это можно реализовать созданием интеллектуальной системы, в частности на основе пьезоэлектриков, которые благодаря обратному пьезоэффекту могут влиять на поле механических напряжений в конструкции.

В настоящей работе методом конечных элементов исследуется управление собственными частотами и амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ) пластины с помощью встроенного пьезоактуатора. Математическая постановка задачи о собственных и вынужденных установившихся колебаниях с демпфированием формулируется на основе принципа возможных перемещений. Учёт предварительного напряжённо-деформированного состояния реализуется через введение дополнительной (геометрической) жёсткости, которая вычисляется из решения статической задачи о деформировании кусочно-однородного электроупругого тела.

В ходе исследования вычислены комплексные собственные частоты пластины с пьезоэлементом при варьировании разности электрического потенциала на его электродированных поверхностях. Получены зависимости, показывающие влияние на низшую собственную частоту таких параметров, как величина потенциала, местоположение и размер пьезоэлемента, условия закрепления, толщина и модуль Юнга материала пластины. Показано, что для относительно тонкой пластины возможно увеличение её низшей собственной частоты более чем на 45%. Для случая вынужденных колебаний рассмотрены системы с вязким и релеевским демпфированием. Результаты демонстрируют возможность снижения амплитуды вынужденных колебаний на фиксированной частоте внешнего воздействия, что позволяет исключить резонансные режимы в заданном диапазоне частот. Проанализировано поведение АЧХ пластины с плотным спектром собственных частот при изменении потенциала на пьезоактуаторе. Обнаружено, что имеется значение разности потенциалов, обеспечивающее равенство резонансных амплитуд колебаний для форм с близкими собственными частотами.

УВЕЛИЧЕНИЕ СКОРОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПУЛЬСОВОЙ ВОЛНЫ ПРИ ЛОКАЛЬНОМ НАГРЕВЕ КОЖИ ЧЕЛОВЕКА

Камшилин А.А. [1], Подолян Н.П. [1], Мизева И.А. [2], Мамонтов О.В. [3,4], Зайцев В.В. [1], Васильева М.Е.[5], Кащенко В.А. [5,6,7], Саковская А.В.[8], Долотовская П.М. [1,7], Маргарянц Н.Б.[8], Ромашко Р.В. [1]

[1] *Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Владивосток*
[2] *Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*
[3] *Национальный медицинский исследовательский центр им. В.А. Алмазова Минздрава России, Санкт-Петербург*
[4] *Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет имени академика И.П. Павлова, Санкт-Петербург*
[5] *Северо-Западный окружной научно-клинический центр им. Л. Г. Соколова ФМБА, Санкт-Петербург*
[6] *Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург*
[7] *Клиника высоких технологий «Белоостров», Ленинградская область*
[8] *Тихоокеанский государственный медицинский университет, Владивосток*
[9] *Институт мозга человека им.Н.П.Бехтеревой РАН, Санкт-Петербург*
[10] *Университет ИТМО, Санкт-Петербург*
mizeva@icmm.ru

Пульсовая волна – это волна повышенного давления, распространяющаяся по кровеносной системе от сердца до периферических сосудов микроциркуляторного русла. Её форма и время прохождения характеризуют механические свойства сосудов, по которым волна распространяется. Традиционно, по параметрам пульсовой волны оценивают свойства магистральных сосудов. Целью данной работы является изучение влияния локального нагрева поверхности кожи, который вызывает многократное увеличение кровотока в микроциркуляторном русле, на скорость распространения пульсовой волны.

Регистрация пульсовой волны производилась при помощи мультимодальной системы, объединяющей визуализирующая фотоплетизмографию (ВФПГ) и электрокардиографию (ЭКГ). Сигналы синхронизированы с точностью до 1 мс [1]. Высокая точность определения временных характеристик периферической пульсовой волны достигнута благодаря модифицированному алгоритму обработки сигналов, который обладает повышенным отношением сигнал/шум по сравнению с предшественниками [2].

В ходе исследования проанализированы 67 записей реакции микроциркуляции кожи предплечья на локальный нагрев у здоровых добровольцев. Во всех случаях нагрев кожи до 41°C вызывал многократное увеличение амплитуды пульсаций и сокращение времени распространения пульсовой волны. Важно отметить локальный характер эффекта: проксимальнее и дистальнее участка нагрева параметры пульсовой волны не изменялись. Таким образом, скорость распространения артериальной пульсовой волны зависит не только от жесткости сосудистой стенки крупных сосудов, но и от перераспределения кровотока на периферии.

Работа выполнена при поддержке РНФ (проект №25-15-00400) и Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение № 125020301282-0).

Литература

[1] Kamshilin, A. A. et al. Accurate measurement of the pulse wave delay with imaging photoplethysmography// Biomed. Opt. Express. – 2016. -V. 7. – p. 5138–5147.

[2] Kamshilin, A. A. et al. Novel method to assess endothelial function via monitoring of perfusion response to local heating by imaging photoplethysmography // Sensors. – 2022. – V. 22.- p. 5727

АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИИ ЗАКРЕПЛЕНИЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ ДЕФОРМАЦИИ

Карякина В.Д.[1], Виндокурова Е.Р. [2], Созонов Н.С. [2], Оглезнев А.А. [2], Ризванов Д.Г.[2], Вотинов Е.О. [2]

[1]Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь
[2]ООО "Инверсия-Сенсор", г. Пермь

В работе исследуется влияние технологии монтажа высокотемпературных волоконно-оптических датчиков деформации (ВОДД) на базе волоконно-брэгговских решеток (ВБР) на абсолютную погрешность деформации. Особое внимание уделено роли цианоакрилатного клея, применяемого для предварительной фиксации датчиков перед нанесением высокотемпературного клея. Проведен сравнительный эксперимент на стальных балках с варьированием количества фиксирующего состава. В результате исследования выявлена закономерность между количеством клея и качеством приклейки. Установлено, что как отсутствие предварительной фиксации, так и избыточное количество клея приводят к росту абсолютной погрешности деформации. На основе полученных данных обоснована необходимость жесткого контроля количества вспомогательного клея и регламентированной методики его нанесения для обеспечения достоверности высокотемпературной тензометрии.

Разработка и исследование высокотемпературных ВОДД является актуальной задачей, позволяющей преодолеть ограничения традиционных методов мониторинга и расширить возможности контроля состояния конструкций в экстремальных условиях. Целью работы является анализ методики закрепления волоконно-оптических датчиков для мониторинга деформаций при экстремальных температурах.

В ходе работы были проведены сравнительные механические испытания образцов с разными заклейками ВОДД с помощью высокотемпературного клея на установке четырехточечного изгиба. На части образцов также использовался цианоакрилатный клей в варьируемых дозировках. В ходе нагружения фиксировались показания ВБР и были построены графики зависимости абсолютной погрешности деформации от величины приложенной деформации.

Анализ полученных данных показал, что малое количество цианакрилатного клея положительно влияет на качество приклейки, но его переизбыток может привести к разрушению клеевого слоя и снижению точности измерений. В ходе эксперимента установлено, что при отсутствии клея погрешность измерений достигала 7%, в то время как использование малого (оптимального) количества фиксирующего состава позволило снизить погрешность до 4%.

Полученные результаты выявили ключевые факторы, которые необходимо учитывать при создании и эксплуатации подобных датчиков с учетом оптимизации технологии приклейки. Нивелирования погрешности в показаниях можно достичь, если вводить индивидуальные поправочные коэффициенты для каждого датчика или использовать термокомпенсаторы. В продолжение работы для реализации заданных требований необходимо провести серию испытаний датчиков в условиях, максимально приближенных к реальным условиям эксплуатации.

Литература

[1] Махсидов В.В., Федотов М.Ю., Шиенок А.М., Зуев М.А. К вопросу об интеграции оптоволокна в ПКМ и измерении деформации материала с помощью волоконных брэгговских решеток // Механика композиц. материалов и конструкций. 2016. Т. 22, № 3. С. 417–428.;

[2] Donlagic D. Optical Fiber Sensors for Harsh Environments / D. Donlagic. – Bristol : IOP Publishing, 2017. – 146 p.

ВЯЗОПЛАСТИЧНОСТЬ И ВЯЗКОУПРУГОСТЬ ПОЛИЛАКТИДА: БАЗОВЫЕ ИСПЫТАНИЯ И МОДЕЛИ

Келлер И.Э. [1], Адамов А.А.[1], Виндокуров И.В.[2], Еленская Н.В.[2], Ташкинов М.А.[2]

[1]*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*
[2]*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь*
kie@icmm.ru, adamov@icmm.ru, ivv@pstu.ru

Полилактид как жесткий биоразлагаемый полимерный материал используется в конструкциях имплантатов костей опорно-двигательного аппарата, испытывая циклическое несимметричное сжатие с выдержками в процессе эксплуатации. Для проектирования изделий необходимо уметь прогнозировать накопление необратимых деформаций при таком нагружении. При температуре тела человека полилактид проявляет вязкопластические и вязкоупругие свойства. Для их исследования цилиндрические образцы диаметром 20 и высотой 20 мм испытаны по следующим независимым программам: *i*) несколько циклов одноосного стесненного сжатия с различными скоростями деформирования, *ii*) одноосное свободное сжатие с различными скоростями деформирования в пределах возрастающего участка деформационной кривой с последующей разгрузкой, *iii*) одноосное свободное сжатие по программе нагружения с циклами нагрузки, разгрузки и промежуточных выдержек со ступенчатыми повышением максимального напряжения и *iv*) одноосное свободное сжатие по 100 треугольным циклам нагружения при различных значениях среднего и максимального напряжений [1]. По результатам испытаний по программам *i, ii* определены упругие модули материала, для которых не обнаружено зависимости от скорости деформации. Результаты испытаний по программе *iii* обнаруживают проявление вязкоупругих свойств материала и существование пластической компоненты деформаций при превышении определенного уровня напряжений. Результаты испытаний по программе *iv* демонстрируют монотонный рост деформаций рэтчетинга с увеличением среднего напряжения, максимального напряжения и с уменьшением скорости деформации, причем при превышении определенного значения максимального напряжения рост становится взрывным.

Результаты испытаний представляют данные для описания свойств материала подходящей моделью. Вязкоупругие свойства (релаксация и циклическая ползучесть) качественно описываются нелинейной обобщенной моделью Максвелла, а вязкопластические свойства (диаграмма нагрузки-разгрузки и ее зависимость от скорости деформации) — вязкопластической моделью. Соединение этих реологических компонент в одну в целом ухудшает описание эксперимента. Необходимо рассматривать эволюцию параметров реологических элементов модели или перекрестные связи ее внутренних переменных, что для моделей пластичности не редкость.

Литература

[1] Keller I.E., Elenskaya N.V., Adamov A.A., Vindokurov I.V., Tashkinov M.A. Viscoelastic-plastic model of polylactide for analyzing deformation of bone lattice scaffolds at different structural levels. PNRPU' Bulletin. Mechanics. 2025. No. 4. – P. 98-112.

О НЕКОТОРЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЯХ ДВУМЕРНЫХ УРАВНЕНИЙ НАВЬЕ-СТОКСА

Князев Д.В.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
dvk@icmm.ru

Уравнения двумерного стационарного течения вязкой жидкости в переменных функция тока, $\psi(x,y)$, вихрь, $\omega(x,y)$, модифицированная функция Бернулли, $B(x,y)=\beta+\omega\psi$, где $\beta(x,y)=p/\rho+\mathbf{v}^2/2$ – функция Бернулли, имеют вид

$$\nabla B=\psi\nabla\omega+\nu\,\mathbf{k}\times\nabla\omega,\ \Delta\psi=-\omega.$$

Здесь $\mathbf{k}$ – единичный вектор нормали к плоскости течения. Правая часть уравнения движения представляет собой сумму ортогональных, а значит линейно независимых, слагаемых. По аналогии с преобразованием Клебша [1, 2] можно записать $\mathbf{k}\times\nabla\omega=\lambda\nabla\mu$. Теперь, рассматривая B как сложную функцию $B(x,y)=B\big(\omega(x,y),\mu(x,y)\big)$, из уравнения движения легко найти, что

$$\frac{\partial B}{\partial\omega}=\psi,\ \frac{\partial B}{\partial\mu}=\nu\lambda.$$

Применительно к плоскопараллельному установившемуся течению вязкой жидкости эти уравнения является своеобразным аналогом теоремы (интеграла) Бернулли, справедливой для идеальной жидкости. Она утверждает, что ω и β сохраняют постоянные значения вдоль линии тока и связаны равенством $\omega(\psi)=-d\beta(\psi)/d\psi$ [3], следующим из вышеприведённых уравнений при $\nu=0$. В исходных уравнениях перейдя от независимых переменных x, y к переменным ω, μ, можно получить замкнутую систему относительно неизвестных ψ, B, λ, x, y как функций от ω и β. Выполнен предварительный анализ этой системы и найдены некоторые частные решения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (тема № 126020916825-4).

Литература

[1] Серрин Дж. Математические основы классической механики жидкости – Москва, 1963. – 256 с.

[2] Захаров В.Е., Кузнецов Е.А. Гамильтоновский формализм для нелинейных волн // УФН. – 1997. – т. 167, № 11. – с. 1137-1167.

[3] Бэтчелор Дж. Введение в динамику жидкости – Москва, 1973. – 758 с.

АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ И ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ СТАТИСТИКО-ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ КЛЕТКИ ПРИ СДВИГОВОМ НАГРУЖЕНИИ

Князев Н.А. [1], Никитюк А.С. [1]

[1]*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*
knyazev.n@icmm.ru, nas@icmm.ru

Эукариотическая клетка является базовым структурно-функциональным элементом человеческого организма, обеспечивая такие фундаментальные процессы, как деление и пролиферация, миграция, адгезия, поддержание формы, транспорт веществ, синтез белков и АТФ, апоптоз и т.д. [1]. Для описания биохимических и физических свойств клетки необходимо учитывать с одной стороны взаимодействие клетки с окружающей средой, а с другой стороны эволюцию внутренней структуры клетки, непосредственно влияющей на её свойства. Установление механизмов, лежащих в основе фенотипических изменений клеток, представляет большой интерес как с фундаментальной, так и с практической точки зрения для определения новых методов диагностики патологических заболеваний человека.

В настоящей работе проведено численное моделирование сдвигового нагружения клетки с выдержкой с использованием нелинейной статистико-термодинамической модели [2], учитывающей ориентационные и вязкоупругие свойства цитоскелета клетки. В процессе моделирования выполнена модификация предложенной модели с целью сокращения числа идентифицируемых параметров модели с пяти до четырёх. Для получения модельных результатов зависимости сдвиговой деформации клетки от времени была проведена оптимизация параметров модели путём аппроксимации сглаженной экспериментальной зависимости.

Ключевым этапом работы стало исследование чувствительности и устойчивости модели. Для этого методом Монте-Карло были заданы множества возмущений начальных данных, идентифицируемых параметров и оператора правой части определяющего соотношения модели до 1, 2, 3, 4 и 5%. В результате для каждой отдельной реализации были вычислены относительные нормы разности возмущенного и базового решений. Построены графики зависимости статистических параметров (математического ожидания и среднеквадратичного отклонения) полученных норм в рамках каждого отдельного множества от предельной величины возмущений начальных данных, параметров, оператора правой части, сделаны выводы об устойчивости модели. При возмущении идентифицируемых параметров также проведён анализ чувствительности модели, выделены наиболее чувствительные параметры модели.

Литература

[1] Alberts B., et al. Molecular biology of the cell. 5th edn. New York: Garland Science, 2007.

[2] Nikitiuk A.S., Bayandin Yu.V., Naimark O.B. Orientation and shear mechanisms of finite deformation of the cell cytoskeleton // Int. J. Eng. Sci. – 2025. – v. 214, 104306.

МЕХАНИЗМЫ ГЕНЕРАЦИИ КОНЦЕНТРИРОВАННЫХ ВИХРЕЙ ВО ВРАЩАЮЩЕМСЯ ЖИДКОМ МЕТАЛЛЕ

Колесниченко И.В., Бондаренко А.Б., Митрополит И.Ю., Лосев Г.Л., Мамыкин А.Д.

Институт механики сплошных сред УрО РАН,
Россия, 614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, д. 1
kiv@icmm.ru

В работе численно и экспериментально исследуются характеристики вращающихся и транзитных течений, созданных электромагнитными индукторами. Рассмотрены конфигурации, в которых генерируются вращающиеся и бегущие магнитные поля [1,2], а также азимутальная электромагнитная сила с помощью кондукционного механизма [3]. Возникающие развитые течения могут при определенных параметрах приводить к генерации концентрированного вихря в объеме металла [3,4]. Целью работы является изучение этого явления, а также поиск условий, при которых реализуются наибольшие расходы либо наибольшая закрутка жидкого металла. Для этого выполнены многовариантные трехмерные расчеты, в которых анализируется различные характеристики поля скорости, как локальные, так и интегральные. В экспериментах на галлиевой эвтектике изучены особенности реализации этих процессов и получены данные для верификации моделей. В результате определены зависимости интегральных и локальных характеристик процессов от значений управляющих параметров. Эти результаты легли в основу разрабатываемых магнитогидродинамических технологий. Интенсивные закрученные течения расплавленных металлов, которые генерируются сильными электромагнитными полями, играют важную роль в современных технологических приложениях. Изучение этих течений и процессов в реальных условиях их существования либо затруднено, либо невозможно даже с использованием современных методов и подходов. Это служит причиной проведения исследований моделей этих процессов в лабораторных масштабах при умеренных значениях реальных параметров и размеров. Практический интерес к магнитогидродинамическим процессам в жидких металлах обусловлен задачами металлургии и энергетики. В этих отраслях электромагнитные силы нашли применение благодаря возможности создания течения без прямого контакта с расплавами, находящимися при высоких температурах. Электромагнитные насосы активно используются для перекачивания жидкого металла как на литейном производстве, так и на атомных станциях, а электромагнитные перемешиватели позволяют гомогенизировать состав и размер зерна слитка. Работа выполняется в рамках государственного задания «Крупномасштабные течения и теплообмен в проводящей и непроводящей жидкости в условиях мелкомасштабной турбулентности», регистрационный номер темы 124012300246-9.

Литература

[1] Kolesnichenko I., Okatev R. Equalisation the toroidal and poloidal kinetic energies of liquid metal stirring flow // The European Physical Journal Plus. 2024. V. 139, – p. 846.

[2] Митрополит И.Ю., Гольбрайх Е., Колесниченко И.В. Закрученное МГД-течение в замкнутом канале круглого сечения // Журнал технической физики, Т. 96, № 2, 2026.

[3] Бондаренко А.А., Першин К.А., Колесниченко И.В. Движение оси крупномасштабного вихревого течения жидкого металла в дисковой ячейке, вызванное азимутальной электромагнитной силой малой интенсивности с нелинейным радиальным профилем // Вестник Пермского университета. Физика, № 3, 2025, – с. 13–21.

[4] Losev G., Mamykin A., Kolesnichenko I. Rich vortex dynamic of liquid metal in T-shaped cylindrical cell under counter-rotating magnetic field action // Journal of Fluid Mechanics, 2025, – p. 1023:A42.

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ КВАЗИСОСРЕДОТОЧЕННОЙ НАГРУЗКИ НА ПОВЕРХНОСТИ ДЕФОРМИРУЕМОГО ТЕЛА С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Конюхов В.А., Матвеенко В.П., Сероваев Г.С.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
koniukhov.v@icmm.ru, mvp@icmm.ru, serovaev@icmm.ru

Мониторинг механического состояния инженерных конструкций и сооружений является неотъемлемым элементом эксплуатации, традиционно реализуемый с помощью проведения периодических технических осмотров и обслуживания в соответствии с установленным регламентом. Однако с появлением и распространением композиционных материалов, обладающих более сложными механизмами разрушения, возникла необходимость разработки принципиально новых подходов для обеспечения безопасности людей и объектов инфраструктуры [1], одним из которых является применение методов машинного обучения [2].

Данная работа посвящена решению обратной задачи механики деформируемого твердого тела с помощью нейронной сети прямого распространения. В качестве примера рассмотрен процесс деформирования тонкостенной прямоугольной пластины из упругого материала [3], жестко закрепленной по двум коротким сторонам под действием квазисосредоточенной вертикальной нагрузки. Результатом решения обратной задачи являются координаты точки приложения и величина нагрузки на основе ограниченной информации о деформированном состоянии на поверхности пластины.

Формирование обучающего, проверочного и тестового набора данных реализовано путем решения серии прямых задач с применением метода конечных элементов. Результат решения каждой отдельной прямой задачи представляет собой массив данных, содержащий полный набор значений компонент тензора деформаций, полученный для конечного числа точек на поверхности пластины, при известных параметрах квазисосредоточенной нагрузки.

Поиск оптимального положения точек, используемых для регистрации компонент деформаций, реализован на основе анализа матриц чувствительности, поиск оптимальной архитектуры многослойного перцептрона и параметров обучения – с помощью метода стохастического поиска.

Анализ результатов показал удовлетворительную точность идентификации параметров внешней нагрузки в основной части пластины и ее существенное снижение в окрестности точек измерений параметров деформируемого состояния.

Литература

[1] Zhang Y., Wu X., Guo Q., Zhang D., Li C., Li D., Liu Y., Zhang J., Zhang P., Yan Y., An L., Guo J., Chen Li. Advances in sensors technologies for composites structural health monitoring // Composite Structures. – 2025. – Vol. 50. – 119448.

[2] Moradi M., Broer A., Chiachío J., Benedictus R., Loutas T. H., Zarouchas D. Intelligent health indicator construction for prognostics of composite structures utilizing a semi-supervised deep neural network and SHM data // Engineering Applications of Artificial Intelligence. – 2023. – Vol. 117. – 105502.

[3] Конюхов В.А., Матвеенко В.П., Степанов Р.А. Применение нейронных сетей для локализации сосредоточенной нагрузки на поверхности деформируемого тела по данным о деформациях // Вестник Удмуртского университета. Математика. Механика. Компьютерные науки. – 2025. – Т. 35, № 3. – С 469–484.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОЛИТИЧЕСКОЙ ДЕГРАДАЦИИ ПОЛИЛАКТИДНЫХ СКАФФОЛДОВ НА ОСНОВЕ ТРИЖДЫ ПЕРИОДИЧЕСКИХ МИНИМАЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Корягина П.О. [1], Еленская Н.В. [1], Ташкинов М.А. [1]

[1] *Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь*

polinak@pstu.ru, n.elenskaya@pstu.ru, m.tashkinov@pstu.ru

В современной медицине широко используются биоразлагаемые полимерные скаффолды, которые после имплантации подвергаются воздействию агрессивной среды организма и эксплуатационным нагрузкам, что приводит ускорению деградации. Несогласованность скорости деградации материала и темпов регенерации костной ткани может приводить к преждевременной потере несущей способности конструкции. [1] Актуальность работы обусловлена необходимостью прогнозирования изменения механических свойств пористых имплантатов во времени. В данной работе представлена численная модель гидролитической деградации биоразлагаемых полилактидных (PLA) скаффолдов с внутренней архитектурой на основе трижды периодических минимальных поверхностей (ТПМП) типа «гироид».

Для описания процессов распада использована реакционно-диффузионная модель Han, X. и Pan, J. [2], учитывающая некаталитический и автокаталитический гидролиз сложноэфирных связей, накопление кислотных олигомеров и их диффузию в объёме материала. В качестве основных переменных введены концентрация разрывов цепей и концентрация растворимых фрагментов, на основе которых рассчитывается числовая средняя молярная масса. Численное решение системы уравнений выполнено методом конечных элементов в среде COMSOL Multiphysics с учётом геометрии ТПМП-ячейки.

Показано, что деградация скаффолдов носит выраженный гетерогенный характер и концентрируется преимущественно во внутренних областях структуры вследствие автокаталитического эффекта и ограниченной диффузии продуктов распада. За восемь недель моделируемого гидролиза средняя молярная масса снижается примерно на 65% от исходного уровня, что сопровождается значительным уменьшением модуля Юнга и перераспределением напряжённого состояния при квазистатическом сжатии. Установлено, что деградация приводит к усилению локальных концентраторов напряжений в несущих рёбрах, что может привести к нестабильности скаффолда.

Полученные результаты демонстрируют необходимость учета пространственной неоднородности гидролиза при проектировании биоразлагаемых имплантатов и подтверждают возможность использования разработанной конечно-элементной модели в качестве цифрового инструмента для оптимизации архитектуры и прогноза долговечности пористых конструкций в клинической практике.

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

Литература

[1] N. Elenskaya, P. Koryagina, M. Tashkinov, and V. V Silberschmidt, “Effect of degradation in polymer scaffolds on mechanical properties : Surface vs . bulk erosion,” *Comput. Biol. Med.*, vol. 174, no. December 2023, p. 108402, 2024, doi: 10.1016/j.compbiomed.2024.108402.

[2] Pan J. (Ed.) Modelling Degradation of Bioresorbable Polymeric Medical Devices. Woodhead Publishing Series in Biomaterials, Cambridge, 2014.

ДИНАМИКА КОНВЕКЦИИ ДВОЙНОЙ ДИФФУЗИИ В ОСЦИЛЛИРУЮЩЕЙ СИСТЕМЕ ЖИДКОСТЕЙ

Краснякова Е.А.

Пермский государственный гуманитарно-педагогический университет, Пермь
Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
mosheva@icmm.ru

В работе представлено экспериментальное исследование влияния вертикальных поршневых колебаний на динамику конвекции двойной диффузии и интенсивность массопереноса в двухслойной системе жидкостей. Эксперименты выполнены в вертикальной ячейке Хеле–Шоу толщиной 0.1 см. Ячейка имеет интегрированную систему подачи жидкостей, которая позволяет формировать двухслойную жидкую систему, имеющую распределение плотности и концентрации близкое к ступенчатому. Верхний слой системы образован водным раствором сахарозы, нижний – хлорида натрия. Колебания жидкой системы создавались гидравлическим контуром мембранного типа: линейный двигатель возбуждал колебания упругой мембраны, разделяющей рабочую и приводную жидкости. Периодические перепады давления передавались в расширительные объемы ячейки, вызывая возвратно-поступательное движение всей двухслойной системы вдоль стенок неподвижной ячейки. Подробно конструкция ячейки описана в [1]. Частота колебаний составляла 2–4 Гц, амплитуда смещения жидкости – до 0.66 см.

Взаимная диффузия растворов сопровождается формированием конвекции двойной диффузии, обусловленной различием скорости молекулярной диффузии растворенных в исходных слоях компонентов [2]. В отсутствие внешнего воздействия конвекция представляет собой пальчиковую структуру, симметрично распространяющуюся вверх и вниз от начальной линии контакта слоёв. При включении поршневых колебаний структура течения изменяется: конвективные пальцы приобретают выраженную вертикальную ориентацию и более строгую пространственную периодичность.

Для оценки степени смешения использовался параметр $M(t) = 1 - \left[\sigma(t)/\sigma_0\right]$, где $\sigma(t)$ – среднеквадратичное отклонение вертикального профиля яркости изображения в момент времени t, σ_0 – его начальное значение. Значение $M = 1$ соответствует перемешанным слоям, $M = 0$ – полностью разделённым. Количественный анализ показал монотонный рост скорости массопереноса с увеличением амплитуды и частоты колебаний, при этом влияние амплитуды является доминирующим. На основе экспоненциальной модели выравнивания концентрации рассчитан эффективный коэффициент диффузии. Установлено, что при максимальной амплитуде эффективная диффузия возрастает почти в четыре раза по сравнению со случаем чисто диффузионного переноса. Наблюдаемое усиление объясняется вибрационно-индуцированной дисперсией, аналогичной дисперсии Тейлора в осциллирующих потоках [3].

Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ, грант № 23-11-00242.

Литература

[1] Krasnyakova E., Karpunin I., Kozlov N. Experimental approach to study mass transfer in liquid–liquid systems under vertical piston oscillations // Experiments in Fluids. – 2025. – т. 66. – №. 1. – с. 11-24.

[1] Radko T. Double-diffusive convection. – Cambridge University Press, 2013. – 344 с.

[3] Taylor G.I. Dispersion of soluble matter in solvent flowing slowly through a tube // Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences. – 1953. – т. 219. – №. 1137. – с. 186-203.

РАСЧЕТ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ВБЛИЗИ ПОСТОЯННОГО ДИСКОВОГО И КОЛЬЦЕВОГО МАГНИТОВ

Крыласова О.С.[1], Косков М.А.[1], Иванов А.С.[1]

[1]*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*
krylasova.o@icmm.ru, koskov.m@icmm.ru, lesnichiy@icmm.ru

Аналитически и численно описано магнитное поле в окрестности одиночного или комбинированного источника - однородного магнетика, заполняющего осесимметричную односвязную или многосвязную область. Цель исследования - получение выражения, описывающего магнитное поле в окрестности одиночных аксиально-намагниченных цилиндрических, дисковых и кольцевых магнитов, либо комбинированных источников постоянного магнитного поля, состоящих из нескольких таких тел с любым конечным аспектным отношением основных геометрических параметров. Магнитостатическая задача решена в два этапа методом Ампера с использованием абстрактных магнитных полюсов. На первом этапе рассмотрен северный полюс полубесконечного намагниченного цилиндра, в окрестности которого найдено выражение для скалярного магнитного потенциала. На втором этапе, используя принцип суперпозиции, записано выражение для поля в окрестности дискового и кольцевого магнитов в цилиндрической системе координат. Полученные выражения содержат бесконечные ряды, что затрудняет их использование на практике. Количество слагаемых ряда, достаточное для описания поля с наперед заданной точностью, определялось сравнением аналитического и численного расчетов. Соответствующая двумерная осесимметричная магнитостатическая задача решена в пакете программ FEMM (Finite Element Method Magnetics). Для дискового и кольцевого магнита вычислен модуль напряженности магнитного поля в точках окружающего пространства. Показано, что первых шести членов ряда достаточно, чтобы аналитическое и численное решения совпали в пределах 2 %, - допустимого отклонения, равного типичной приборной погрешности современного тесламетра. При дальнейшем увеличении числа членов ряда сложность вычислений возрастает, а погрешность сокращается, однако экспериментально проверить и подтвердить возросшую точность невозможно. Полученные выражения упрощают вычисление магнитного поля в случае осесимметричных комбинированных источников поля. К таковым относятся сборки из чередующихся постоянных магнитов и немагнитных вставок, применяющиеся в качестве чувствительных элементов инерционных магнитожидкостных датчиков. Пространственное распределение напряженности магнитного поля и градиента его модуля в окрестности описанных конструкций необходимо вычислять при проектировании датчиков.

Литература

[1] Пшеничников А. Ф., Магнитное поле в окрестности уединенного магнита // Магнитная гидродинамика. – 1993. – т.29, №1. – с. 37-40.

[2] Иванов А. С. Энергетический подход к вычислению магнитных сил, действующих на твёрдые тела в феррожидкости // Вычислительная механика сплошных сред. – 2020. – т. 13, №3. – с. 311-319.

ОЦЕНКА ВЕЛИЧИНЫ КРИТИЧЕСКОЙ ДИСТАНЦИИ ПОСЛЕ ЛАЗЕРНОЙ УДАРНОЙ ОБРАБОТКИ

Кудряшев И.С. [1], Изюмова А.Ю. [1], Бартоломей М.Л. [1], Вшивков А.Н. [1], Угольников М.В. [1], Ведерникова А.И. [1], Плехов О.А. [2]

[1] *Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*
[2] *Пермский федеральный исследовательский центр УрО РАН, Пермь*
kudryashev.i@icmm.ru

Теория критических дистанций (ТКД), разрабатываемая с 1930-х годов [1-3], представляет собой эффективный инженерный метод прогнозирования усилия разрушения конструкционных элементов, основанный на анализе напряженно-деформированного состояния в определенной зоне вокруг концентратора напряжений. Критическая дистанция, ключевой параметр этого подхода, традиционно считалась константой, однако современные исследования демонстрируют её зависимость от множества факторов [4-5].

Целью данного исследования является анализ применения ТКД в рамках метода точки для оценки влияния лазерной ударной обработки (ЛУО) на критическую дистанцию. В данной работе выполнено комплексное численное моделирование и последующий анализ напряженно-деформированного состояния после ЛУО цилиндрических образцов из коммерчески чистого титана ВТ1-0. Проводится сравнение с экспериментальными данными. ЛУО моделируется с использованием модели пластичности Джонсона-Кука, а растяжение цилиндра используется для определения критического расстояния в рамках линейной теории упругости.

Был проведен численный эксперимент по статическому растяжении образцов с тремя типами геометрии, как с наведенными полями остаточных напряжений, так и без них для определения критического расстояния. Усилие разрушения для образца с радиусом проточки 2 мм было рассчитано с помощью ТКД и показано, что это значение согласуется с экспериментальными данными с погрешностью 3,5%. Установлено, что ЛУО приводит к увеличению критического расстояния на 12%. В то же время расчетные усилия разрушения для обработанных образцов были ниже, чем для исходных: для образца с радиусом проточки 2 мм прогнозируемое усилие разрушения составило 21,91 кН по сравнению с 25,58 кН без обработки. Экспериментальная проверка на образце с проточкой 2 мм показала, что предложенный подход правильно предсказывает качественную тенденцию к снижению разрушающей нагрузки после ЛУО.

Литература

[1] Neuber H. Kerbspannungslehre (Notch stress). – Berlin : Julius Verlag, 1937.

[2] Neuber H. Theory of Notch Stresses: Principles for Exact Calculation of Strength with Reference to Structural Form and Material. – 1961.

[3] Новожилов В.В. О необходимом и достаточном критерии хрупкой прочности // Прикладная математика и механика. – 1969. – Т. 33. – Вып. 2. – С. 212-222.

[4] Yaren M.F., Susmel L. A novel critical distance-based homogenised material approach to estimate fatigue lifetime of plain/notched polylactide 3D-printed with different in-fill levels // International Journal of Fatigue. – 2025. – Vol. 193. – Art. 108750. – DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2024.108750.

[5] Li C., Ji B., Yao Y. Critical distance-based probabilistic fatigue analysis of base-material notches in steel bridges considering size effect // Construction and Building Materials. – 2024. – Vol. 455. – Art. 139130. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.139130.

ИЗМЕНЕНИЕ ЧИСЛА ПЕКЛЕ В ПРОГНОЗИРОВАНИИ МОРФОЛОГИИ ЧАСТИЦ ХЛОРИДА НАТРИЯ

Кузнецова Ю.Л.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
julyas@icmm.ru

Процесс испарения капель водорастворимых солей играет ключевую роль в различных технологических областях, включая производство микро- и нанопорошков для технического и фармацевтического применений. В данном контексте особую важность приобретает проблема прогнозирования морфологии, т. е. формы и структуры, образующихся кристаллических частиц, поскольку она напрямую определяет механические свойства, скорость растворения и вкусовые характеристики конечного продукта.

Экспериментальные исследования демонстрируют существенную зависимость кинетики кристаллизации и морфологии образующихся частиц от начальных параметров капель и условий сушки. В предыдущих исследованиях для комплексного описания распределения концентрации соли в капле и типа формирующихся частиц использовалось число Пекле (Pe), определяемое как отношение скорости испарения влаги с поверхности капли к скорости диффузии соли в растворе. Поскольку обе эти скорости изменяются во времени, число Пекле не является постоянным и существенно зависит от стадии процесса испарения. В ряде работ рассчитывались только начальные значения числа Пекле (до начала испарения). В более поздних исследованиях были построены зависимости числа Пекле от времени, но для этого использовали математическая модель SADKAT, которая не учитывает изменение концентрации соли внутри капли и не описывает процесс кристаллизации.

На основе разработанной автором математической модели процесса испарения и кристаллизации капель раствора соли [1, 2] исследована взаимосвязь между условиями испарения капли и количеством монокристаллических зерен образующихся в сухих частицах хлорида натрия. В качестве параметра, характеризующего процесс испарения, использовалось число Пекле. Построены временные зависимости числа Пекле с учетом фазы кристаллизации. Установлено, что максимум числа Пекле в общем случае не совпадает с моментом начала кристаллизации. Путем обработки экспериментальных данных по испарению капель хлорида натрия определены доверительные интервалы для среднего количества кристаллов, формирующихся в частице при различных значениях влажности воздуха. На основе этих данных получено уравнение нелинейной регрессии, связывающее число кристаллов в частице со значением числа Пекле. Предложенный подход позволил получить соотношение для предсказания количества монокристаллических зерен, формируемых при различных условиях испарения капель хлорида натрия, а также сократить количество феноменологических параметров модели, тем самым уменьшив объем экспериментальных данных, необходимых для ее калибровки.

Литература

[1] Кузнецова Ю.Л. Испарение и кристаллизация капель раствора соли // Вестник Пермского университета. Физика. – 2025. – т. 2 – с. 5-16

[2] Кузнецова Ю.Л. Модель испарения и кристаллизации капли раствора соли // Математическое моделирование. – 2025. – т. 37. № 4. – с. 121-136

ТЕРМОУПРУГОСТЬ НЕЛИНЕЙНЫХ ЦЕПОЧЕК И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ

Кузькин В.А.[1,2], Трунова И.Н.[3,2]

[1] *Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург*
[2]*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург*
[3]*Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»*
kuzkinva@gmail.com

В работе исследуется связь теплового расширения и температуры вдали от равновесия на примере двух слабонелинейных цепочек (двухмассовой и масса-в-массе), имеющих две подрешетки с разными массами. Такие модели выбраны потому, что в процессе теплопереноса кинетические температуры подрешеток могут отличаться. В начальный момент времени частицам задаются случайные скорости, соответствующие синусоидальному профилю кинетической температуры. Неравномерное распределение температуры приводит к теплопроводности и тепловому расширению. Последнее может быть описано уравнением термоупругости, связывающими перемещения с температурой. Измеряя термоупругие деформации, можно вычислить температуру. Возникает вопрос, какая именно микроскопическая температура получится при таком подходе? Мы показываем аналитически и численно, что, как и ожидалось, в двухмассовой цепочке в качестве такой величины выступает средняя кинетическая температура элементарной ячейки. Однако в цепочке масса-в-массе это не так — средняя кинетическая температура не удовлетворяет уравнению термоупругости. Следовательно, измерение термоупругих деформаций не всегда дает информацию о средней кинетической температуре. Данный факт необходимо учитывать при интерпретации экспериментальных данных. Работа содержит результаты проекта «ПФИ-2025-75», выполненного в рамках Программы фундаментальных исследований НИУ ВШЭ в 2026 году.

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

Курмоярцева К.А., Трусов П.В.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
kurmoiartseva.k@mail.ru, tpv@pstu.ru

Границы зерен и фаз являются препятствиями для движения дислокаций, что приводит к образованию скоплений дислокаций, локализации пластических деформаций и концентрации напряжений [1, 2]; особое внимание необходимо уделять влиянию границ на деформирование многофазных материалов [3]. На границах зерен возможна высокая плотность геометрически необходимых дислокаций, что ведет к локальному упрочнению вблизи границы раздела. В двухфазных или многофазных материалах разные свойства фаз материалов на границе приводит к значительной неоднородности деформаций и, как следствие, зарождению повреждений и начала развития процесса разрушения [3].

В связи с важностью учета влияния границ зерен и их взаимодействия с краевыми дислокациями, предполагается расширить разрабатываемую на кафедре ММСП ПНИПУ физически-ориентированную трехуровневую модель [4] подмоделью для описания межкристаллитных потоков дислокаций. В модели элементом верхнего уровня является представительный макрообъем; выделяются также два структурно-масштабных уровня – мезоуровнь-1 и мезоуровнь-2, элементами которых являются кристаллиты (субзерна, фрагменты). Данные мезоуровни вводятся для описания рассматриваемых физических механизмов с различных позиций – континуальной механики (мезо-1) и дислокационной динамики (мезо-2). В предлагаемой подмодели рассматриваются отток и приток дислокаций через границы зерен и субзерен. Потоки дислокаций реализуются между кристаллитами, которые могут принадлежать одному зерну (между субзернами) или разным, включая зерна разных фаз. Рассмотрение потоков дислокаций ведется только для активных систем скольжения, дислокации на которых движутся в сторону фасетки границы. При наличии разориентации кристаллических решеток соседних кристаллитов происходит образование остаточных дислокаций в границе, которые в дальнейшем влияют на критические напряжения на системах скольжения обоих кристаллитов. Разрабатываемая подмодель в рамках физически-ориентированной модели позволяет описать локализацию пластической деформации вблизи границ зерен.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ № 25-19-00785

Литература

[1] Орлов А.Н., Перезвенцев В.Н., Рыбин В.В. Границы зерен в металлах. – М.: Металлургия. – 1980. – 156 с.

[2] Kacher J. et al. Dislocation interactions with grain boundaries / Kacher J., Eftink B.P., Cui B., Robertson I.M. // Current Opinion in Solid State and Materials Science. – 2014. – Vol. 18, № 4. – P. 227–243.

[3] Zhang W., Jin M., Hao S., Huo M., Huang Z., Chen L., Xia W. The interfacial damage of the deformation heterogeneity in the transformation-induced plasticity (TRIP)-assisted duplex stainless steel // International Journal of Plasticity. – Elsevier BV, 2025. – Vol. 184. – P. 104209.

[4] Грибов Д.С., Трусов П.В. Дислокационно-ориентированная трехуровневая модель для описания деформирования поликристаллов: структура, алгоритм реализации, примеры применения для исследования сложного циклического нагружения // Физическая мезомеханика. – 2022. – Т.25, №4. – С.94-105.

УСЛОВИЯ ПРИМЕНИМОСТИ СТРУКТУРНОГО ТЕНЗОРА ДЛЯ ОПИСАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОРИЕНТАЦИЙ ПЛАНАРНЫХ ДЕФЕКТОВ СПЛОШНОСТИ В ТВЕРДОМ ТЕЛЕ

Кучеровский А.С.[1], Пантелеев И.А.[2]

[1]*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия*

[2] *Институт механики сплошных сред УрО РАН, ПФИЦ УрО РАН, Пермь, Россия*

artemkc633@gmail.com, pia@icmm.ru

Несмотря на широкое использование моделей деформирования твердых тел со скалярным параметром поврежденности, отражающим изменение площади поперечного сечения материала при росте микротрещин, и как следствие деградацию его упругих модулей [1-2], многочисленные эксперименты указывают на тензорную природу явления разрушения. Для описания ориентационных эффектов развития поврежденности вводятся тензорные параметры второго, четвертого и более высоких рангов [3-5].

Одной из центральных проблем использования тензорных моделей поврежденности для решения актуальных прикладных задач механики деформируемого твердого тела является определение компонент тензора поврежденности того иного ранга для исходного недеформированного состояния материала. На лабораторном масштабе исходное дефектное состояние исследуемого материала может быть визуализировано/охарактеризовано с помощью методов оптической микроскопии и рентгеновской компьютерной томографии, на геологическом масштабе – методами структурной геологии и полевой тектонофизики. Для анализа полученных данных/изображений с целью восстановления компонент тензора поврежденности используются различные подходы тензорной алгебры и стереологии. Один из наиболее распространенных подходов базируется на понятии структурного тензора, описывающего распределение нормалей планарных дефектов по ориентации на единичной окружности (2D-анализ) или единичной сфере (3D-анализ). При этом вопрос условий применимости данного формализма остается до сих пор открытым.

Настоящая работа посвящена разработке алгоритмов расчета структурного тензора второго и четвертого ранга для теоретических (синтетических) и наблюденных данных о распределениях микротрещин по ориентации, а также определению границ (условий) его применимости для описания этих распределений. Отдельное внимание уделено вопросу достаточности использования структурного тензора второго ранга для описания ансамблей микротрещин, имеющих больше одной преимущественной ориентации, а также минимального объема данных, являющегося репрезентативным, т.е. обеспечивающим неизменность параметров структурного тензора при увеличении размера выборки.

Литература

[1] Kachanov L.M. Effective elastic properties of cracked solids; critical review of some basic concepts // Appl. Mech. Rev. – 1992. – V.45. – p. 304-335.

[2] Степанова Л.В., Игонин С.А. Параметр поврежденности Ю.Н. Работнова и описание длительного разрушения: результаты, современное состояние, приложение к механике трещин и перспективы// Прикладная механика и техническая физика. – 2015. – Т. 56, № 2. – с. 133-145.

[3] Krajcinovic D. Continuous damage mechanics revisited: basic concepts and definitions // J. Appl. Mech. – 1985. – V.52. – p. 829-834.

[4] Lemaitre J., Desmorat R., Sauzay M. Anisotropic damage law of evolution // Eur. J. Mech. Solid. – 2000. – V.19. – p. 187-208.

[5] Пантелеев И.А., Ляховский В.А. Ориентация трещиноватости в хрупком твердом теле при традиционном трехосном сжатии // Известия Российской Академии наук. Механика твердого тела. – 2022. – № 5. – с. 70-92.

ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ НА ФЛОТАЦИЮ КВАРЦА

Кучинский М.О. [1,3], Любимова Т.П. [1,2] , Рыбкин К.А. [2,3]

[1]*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

[2]*Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь*

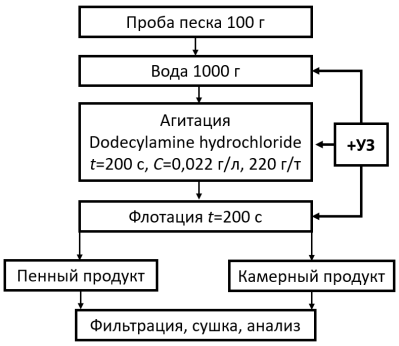
[3]*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь*

kuchinskiy.m@icmm.ru

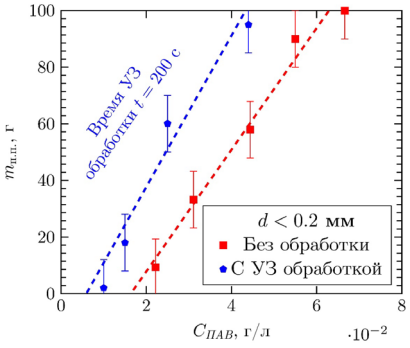
Известно, что ультразвук (УЗ) может влиять на флотацию как положительно (очистка поверхности, агломерация), так и отрицательно (разрушение флотокомплексов) [1, 2]. В связи с этим актуальна задача поиска оптимальной методики его использования. В настоящей работе исследовалось извлечение кварца флотационным методом при варьировании момента УЗ воздействия.

Работы выполнялись на кварцевых шариках (70–110 и 200–300 мкм) и кварцевом песке (фракции <200 и 200–500 мкм). Часть образцов предварительно очищали механически и химически.

В экспериментах использовалась флотационная машина типа ФМП-Л с объёмом реактора 1 л в которую был установлен источник УЗ (Bandelin SONOPULS HD 4200). УЗ воздействие (20 кГц, 200 с) применяли на одном из этапов: при смешивании (до агитации), во время агитации или в процессе флотации. Сбор пенного продукта осуществляли автоматически.



а)



б)

Рис. 1. Схема проведения опытов (а) и зависимость массы пенного продукта от концентрации ПАВ для частиц кварца размером менее 200 мкм (б): сравнение результатов без обработки и с предварительной ультразвуковой обработкой на этапе агитации.

Установлено, что наибольший эффект достигается при использовании УЗ на этапе смешивания (до агитации), особенно для частиц неправильной формы и мелких фракций. Это связано с дегазацией микротрещин и удалением загрязнений. Разработанная методика позволила определить оптимальный период применения ультразвука для повышения эффективности флотации кварца.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 24-11- 00269)

Литература

[1] Gungoren C., Ozdemir O., Ozkan S. G. Effects of temperature during ultrasonic conditioning in quartz-amine flotation //Physicochemical Problems of Mineral Processing. – 2017. – Т. 53. – №. 2. – С. 687-698.

[2] Lyubimova T. et al. Experimental study of temporal dynamics of cavitation bubbles selectively attached to the solid surfaces of different hydrophobicity under the action of ultrasound //Ultrasonics. – 2021. – Т. 117. – С. 106516.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ ТЕРМОУПРУГИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАНОПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ С УЧЕТОМ ПОВЕРХНОСТНЫХ ЭФФЕКТОВ

Леднов А.С. [1,2], Наседкин А.В. [1]

[1]*Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия*
[2]*Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Россия*
alednov@sfedu.ru avnasedkin@sfedu.ru

Для наноразмерных тел характерен масштабный эффект, описываемый моделями поверхностной упругости, среди которых одной из наиболее распространенной является модель Гуртина-Мурдоха, трактующая границы как упругие мембраны с дополнительными усилиями. В композитах с нанопорами для определения поверхностных констант модели Гуртина-Мурдоха можно использовать данные обработки стандартных макроиспытаний, в которых результаты будут зависеть как от объемных термоупругих модулей, так и от поверхностных. При решении задач гомогенизации представительный объем композита (матрица + нанопоры) рассматривался в рамках линейной термоупругости с поверхностными эффектами. На межфазных границах вводятся интерфейсные условия, учитывающие скачок напряжений через поверхностные модули по модели Гуртина-Мурдоха. Численная реализация выполнена в ANSYS. Кубические представительные объемы со случайным распределением пор моделировались по двум алгоритмам: простому случайному и по алгоритму ACELAN-COMPOS, обеспечивающему связность матрицы [1]. Границы пор покрывались мембранными элементами, свойства которых задавались трансверсально-изотропными в соответствии с ориентацией объемных элементов [2]. Эффективные упругие модули определялись из решений задач с заданными смещениями на границе при нулевой температуре [3], а температурные модули – из решений задач с ненулевой температурой при известных эффективных упругих модулях.

На примере бериллия установлено, что рост пористости почти во всех случаях снижает эффективные модули. Однако поверхностные эффекты могут замедлять это снижение и даже повышать модули относительно плотного материала за счет учета поверхностной энергии. Структуры с крупными порами (с меньшей удельной поверхностью) демонстрируют ослабленное влияние поверхностных напряжений. Полученные данные позволяют решать обратную задачу: по результатам наноиндентирования, пористости и распределению размеров пор идентифицировать поверхностные коэффициенты модели Гуртина-Мурдоха.

Работа первого автора выполнена при поддержке Российского научного фонда в рамках проекта № 22-19-00732-П в Донском государственном техническом университете.

Литература

[1] Kudimova A.B., Nadolin D.K., Nasedkin A.V., et al. Finite element homogenization models of bulk mixed piezocomposites with granular elastic inclusions in ACELAN package // Mater. Phys. Mech. – 2018. – Vol. 37, No. 1. – c. 25-33.

[2] Nasedkin A.V., Nasedkina A.A., Rajagopal A. Finite element investigation of effective moduli of transversely isotropic thermoelastic materials with nanoscale porosity // Springer Proceedings in Materials. – 2020. – Vol. 6. – c. 325-337.

[3] Наседкин А.В., Корниевский А.С. Конечно-элементное моделирование эффективных свойств анизотропных упругих материалов со случайной наноразмерной пористостью // Вычисл. мех. сплош. сред. – 2017. – Т. 10, № 4. – с. 375-387.

ПАССИВНОЕ ДЕМПФИРОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАГРУЖЕННЫХ ПЛАСТИН И ОБОЛОЧЕК С ПОМОЩЬЮ ПЬЕЗОЭЛЕМЕНТОВ

Лекомцев С.В., Матвеенко В.П., Сенин А.Н.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
lekomtsev@icmm.ru, mvp@icmm.ru, senin.a@icmm.ru

Пластины и оболочки являются распространёнными и важными элементами различных инженерных конструкций благодаря оптимальному соотношению прочности, жёсткости и массы. По причине малой толщины особую значимость для них приобретает проблема управления вибрациями. Традиционные пассивные методы зачастую приводят к недостаточному демпфированию или неоправданному утяжелению изделия. Широкие перспективы в этом направлении открывает техника на основе пьезоэлементов, шунтированных внешними электрическими цепями [1]. Её эффективность напрямую зависит от корректного выбора параметров этих электрических цепей. Одним из значимых факторов, способных оказать влияние на их оптимальные значения, являются предварительные напряжения, которые возникают в конструкции под действием эксплуатационных нагрузок.

Целью исследования является изучение влияния статической нагрузки на эффективность пассивного демпфирования колебаний прямоугольной пластины и цилиндрической оболочки с помощью пьезоэлектрического элемента, подключенного к внешней электрической цепи. При моделировании криволинейная поверхность тонкостенной конструкции представляется в виде совокупности плоских сегментов, в которых выполняются физические соотношения классической теории слоистых пластин и теории электроупругости. Деформации определяются с использованием нелинейных уравнений, которые линеаризуются относительно состояния с малым отклонением от положения начального равновесия, вызванным воздействием статических сил [2]. Полученное уравнение движения дополняется уравнением для электрической цепи, связывающим напряжение на пьезоэлектрическом элементе с электрическим зарядом. Численная реализация изложенной формулировки выполнена методом конечных элементов. В качестве примеров рассмотрены цепи, состоящие из одного резистора, а также последовательно соединённых резистора и катушки индуктивности. Полученные результаты показали, что статическая нагрузка оказывает отрицательное влияние на эффективность пассивного демпфирования колебаний.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024).

Литература

[1] Moheimani S.O.R, Fleming A.J. Piezoelectric transducers for vibration control and damping, 1st ed. – London: Springer, 2006. – 287 p.

[2] Kamenskikh A.O., Lekomtsev S.V., Senin A.N., Matveenko V.P. Free vibration of electroelastic thin-walled structures under static load // International Journal of Solids and Structures. – 2025. – Vol. 306. – Article No. 113123.

АНАЛИЗ ИСПЫТАНИЙ ПОЛНОРАЗМЕРНОГО ДВИГАТЕЛЯ ПО ВИБРОГРАФИРОВАНИЮ МАСЛОБАКА

Лешпаев Д.М., Шайдуров М.Ю., Кузнецова Е.В.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
leshpaev0437@mail.ru, shajdurov04@bk.ru, kuznetsovae@pstu.ru

Конструкции современных авиационных двигателей характеризуются высокой динамической нагруженностью. Часто именно динамические напряжения являются причиной различных дефектов. Более того именно динамическое совершенство конструкции двигателя определяет долговечность многих узлов и деталей, а, следовательно и ресурс двигателя в целом [1]. Конструкция маслобака должна обеспечивать работоспособность маслосистемы в диапазоне режимов от запуска до максимального режима. Вибрографирование маслобака проводилось в процессе испытаний двигателя по программе, имитирующей условия работы двигателя, ожидаемые в эксплуатации [2]. Запись сигналов с вибродатчиков осуществлялась непрерывно на систему регистрации. На маслобак, вблизи мест крепления, были наклеены три вибропреобразователя для измерения вибраций в трех ортогональных направлениях: вертикальном, горизонтальном и вдоль оси двигателя. Спектральный анализ вибрационных сигналов выполнялся на персональном компьютере с помощью пакета обработки сигналов WinПОС.

Анализ результатов вибрографирования показал, что в спектре вибрации маслобака в нормированном диапазоне частот 5 … 2000 Гц преобладает составляющая с частотой 18 гармоники к частоте вращения ротора (18 – количество лопаток вентилятора). Для спектрального анализа был рассчитан Тахо – функция расчета сигнала частоты вращения (оборотов) по сигналу тахоотметчика. В процессе анализа были определены суммарные пиковые значения вибрации с учетом деления нормированного диапазона на поддиапазоны согласно нормативным документам. Далее в работе был проведен расчет амплитудно фазово-частотной характеристики (обозначение алгоритма расчета АФЧХ) для каждой выделенной гармоники вибрации. По результатам построения АФЧХ определены максимальные значения виброускорений маслобака, которые согласно нормативным документам, вблизи места крепления, не превысили допустимых значений, следовательно, дефектов вибрационного характера не прогнозируются.

Таким образом, можно сделать вывод об отсутствии зависимости изменения виброускорения маслобака от виброскорости двигателя. Результаты измерений показали, что уровень вибраций маслобака на определенных режимах работы двигателя может значительно меняться, что обусловлено как конструктивными особенностями маслосистемы, так и условиями ее испытаний. Полученные данные были проанализированы с использованием методов спектрального анализа [3, 4], что позволило выделить доминирующие частоты и амплитуды вибрации, а также выявить потенциальные источники колебаний. Также было установлено, что своевременное обнаружение повышенных уровней вибраций может служить индикатором зарождающихся дефектов, таких как ослабление креплений, деформация конструкции или износ элементов.

Литература

[1] Иноземцев А.А., Сандрацкий В.Л. Газотурбинные двигатели. – Пермь: ОАО «Авиадвигатель», 2006. – 748 с.
[2] Вибрации в технике. Измерения и испытания. Том 5. Под ред. д-ра техн. наук проф. М.Д. Генкина. Справочник. - М.: Машиностроение, 1981. – 496 с.
[3] Марпл-мл. С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. М.: Мир, 1990. –584.
[4] Дженкинс Г.М., Ваттс Д.Г. Спектральный анализ и его приложения. Вып.1,2. М.: Мир, 1971. – 158.

ИЗУЧЕНИЕ МЕХАНИЗМОВ РАЗРУШЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ РЕГИСТРАЦИИ СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ СЖАТИИ

Лобанов Д.С.[1], Чеботарева Е.А. [1]

[1]*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь*
cem.lobanov@gmail.com, cem.chebotareva@mail.ru

В современных условиях развития композиционных материалов особую актуальность приобретает исследование механизмов их разрушения при различных видах нагружения, в том числе в присутствии эксплуатационных дефектов (1-2). Работа посвящена изучению особенностей разрушения полимерных слоистых композитов при квазистатическом сжатии с применением системы регистрации сигналов акустической эмиссии. Метод акустической эмиссии позволяет проводить мониторинг процессов разрушения материала, что делает его эффективным инструментом для изучения изменения механических свойств материалов (3-4).

Испытания на сжатие проводились на электромеханической испытательной системе Instron 5982 совместно с системой регистрации сигналов акустической эмиссии Vallen AMSY-6. Были проведены серии экспериментальных исследований при квазистатическом сжатии на группах образцов стеклопластика без дефектов, с дефектом вмятина от цилиндра, с дефектом вмятина от сферы, с дефектом вмятины от вала и с дефектом царапина.

По полученным результатам экспериментальных исследований проведена оценка влияния внешних эксплуатационных дефектов и наружных повреждений на поверхности образцов стеклопластика на остаточные механические свойства при квазистатическом сжатии в условиях нормальных температур. При этом регистрация сигналов акустической эмиссии позволила выявить характерные частотные диапазоны, соответствующие различным видам разрушения материала. Анализ параметров акустической эмиссии показал наличие двух основных диапазонов частот, указывающих на процессы растрескивания матрицы и расслоения материала. Была установлена взаимосвязь между параметрами сигналов акустической эмиссии и процессами разрушения материала при сжатии. Выявлены особенности накопления повреждений в зависимости от типа нанесенного дефекта и направления волокон образцов. Установлено, что характер распределения сигналов акустической эмиссии зависит от наличия и типа дефекта поверхности.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-00188, https://rscf.ru/project/25-29-00188/

Литература

[1] А. Л. Асси, А. В. Болдырев, А. А. Павлов Экспериментальное исследование влияния технологических отверстий и дефектов на механические характеристики слоистого полимерного композита // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2024. №2.

[2] Е. А. Чеботарева, Д. С. Лобанов. Оценка влияния эксплуатационных дефектов и наружных повреждений на механическое поведение полимерного слоистого композиционного материала // Проблемы прочности и пластичности. – 2025. – Т. 87, № 4. – С. 539-551

[3] Strungar E.; Lobanov D.; Mugatarov A.; Chebotareva E., Deformation processes of polymer composites with stress concentrators under different reinforcement schemes // Journal of Reinforced Plastics and Composites. 2024.

[4] Струнгарь Е.М., Лобанов Д.С., Чеботарева Е.А. Экспериментальное изучение предельных деформаций и разрушение стеклопластиков с концентраторами напряжений // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. - 2024. - №4. - С. 98-112.

ОРИЕНТАЦИОННАЯ ПРИРОДА ОТКЛИКА ФЛЮИДОНАСЫЩЕННОЙ ГЕОСРЕДЫ НА ПРОХОЖДЕНИЕ ОБЪЕМНЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН

Ложкин Д.В., Пантелеев И.А.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
lozhkin.d@icmm.ru, pia@icmm.ru

Вариации уровня воды в скважинах при прохождении сейсмических волн – широко наблюдаемое явление, используемое для изучения вибрационного воздействия на флюидонасыщенные среды и реализации геофизического мониторинга сейсмоактивных регионов. Согласно линейной теории пороупругости Био в недренированном приближении основной вклад в изменение порового давления вносит изменение объемной деформации твердого скелета [1]. Этот механизм объясняет выраженный отклик изотропной флюидонасыщенной среды на прохождение Р-волн, при этом не позволяет описать реакцию среды на воздействие сдвиговых (поперечных) волн. В случае трещиноватого коллектора его отклик на прохождение обоих типов волн начинает зависеть от направления прихода волны. Физическая причина такой зависимости состоит в том, что трещиноватость, порождая анизотропию упругих и пороупругих свойств среды, формирует эффективную связь между девиаторным напряжением и поровым давлением. В трещиноватой среде сдвиговая деформация на фронте волны сопровождается раскрытием/закрытием микротрещин, что за счет эффекта дилатансии приводит к локальному изменению объема и перераспределению эффективных напряжений. В работе [2] предложено обобщение классических пороупругих соотношений Скемптона для случая прохождения поверхностных сейсмических волн, где помимо объемной компоненты деформации учитывается вклад девиаторной (сдвиговой) части, что принципиально для пористых и трещиноватых сред.

Настоящая работа посвящена исследованию влияния ориентации трещиноватости на отклик водонасыщенного коллектора на прохождение объемных сейсмических волн. В случае сдвиговых объемных волн дополнительным фактором, влияющим на вариации порового давления, будет ориентация плоскости поляризации волны в пространстве. Различная поляризация волны будет инициировать различные моды деформирования микротрещин, что приведет к различному отклику порового давления даже при неизменном направлении распространения волны. Практическая значимость рассматриваемой задачи заключается в разработке дополнительного инструмента для оценки ориентировки осей природных напряжений, степени и ориентации трещиноватости в сейсмоактивных регионах на основе анализа отклика флюидонасыщенных коллекторов на прохождение сейсмических волн от близких землетрясений.

Литература

[1] Biot, M.A. General theory of three-dimensional consolidation // Journal of Applied Physics. – 1941. – V. 12. – № 2. – P. 155-164.

[2] Panteleev I.A., Lozhkin D.V., Lyakhovsky V., Shalev E. Nature of the Anisotropic Response of a Fluid Saturated Medium to Surface Seismic Wave Propagation // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. – 2025. – Т. 61. – №. 2. – С. 224-235.

ДЕФОРМИРОВАНИЕ И РАЗРУШЕНИЕ НЕОДНОРОДНЫХ ПРИРОДНЫХ И КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Ломакин Е.В.[1]

[1]*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова*
evlomakin@yandex.ru

При исследовании макро-свойств сред, содержащих различного рода микро-неоднородности структуры, такие как микротрещины, поры, частицы включений, особенности структуры и другие, обнаруживается ряд эффектов, которые не укладываются в рамки обычно принимаемых гипотез. Одна из особенностей заключается в том, что значения механических характеристик таких сред определяются видом напряженного или деформированного состояния, поскольку поведение неоднородностей существенным образом зависит от характера внешних воздействий. При этом для рассматриваемых материалов нет единых диаграмм зависимости между эквивалентным напряжением и эквивалентной деформацией, а также между гидростатической компонентой напряжений и объемной деформацией, инвариантных к виду нагружения, а имеется веер эквивалентных диаграмм деформирования. Предложены определяющие уравнения для нелинейно упругих изотропных и анизотропных сред, деформационные характеристики которых зависят от вида напряженного состояния [1].

У композитных материалов также обнаруживается зависимость механических свойств от вида внешних воздействий или вида напряженного состояния, которое создается этими нагрузками. Наиболее существенно данный эффект проявляется в композитах на основе тканей из различных типов волокон или в композитах с трехосным плетением волокон. Сформулированы определяющие соотношения, учитывающие данный эффект, в которых вместо матрицы постоянных коэффициентов анизотропии введена матрица анизотропных функций параметра вида напряженного состояния и разработана методика экспериментального определения этих функций.

Другая важная особенность поведения композитных материалов заключается в том, что диаграммы деформирования практически линейные, если нагрузка приложена вдоль направления армирующих волокон, но они нелинейные, если нагрузка действует под углом к направлению волокон, когда в матрице появляются сдвиговые деформации, причем степень нелинейности зависит от направления действия нагрузки. Возникает вопрос, каким образом можно с помощью определяющих соотношений описать одновременно линейное поведение в одних случаях и нелинейное в других? Предложен оригинальный способ описания данного эффекта на основе авторской идеи введения в определяющие уравнения дополнительной матрицы и связанного с ней скалярного параметра. Продемонстрировано хорошее соответствие между экспериментальными и теоретическими зависимостями [2].

Разработан подход к моделированию процессов деформирования, накопления повреждений и разрушения перспективных композитных материалов с учетом различных форм физической нелинейности их свойств [3].

Литература

[1] Ломакин Е.В. Механика сред с зависящими от вида напряженного состояния свойствами // Физическая мезомеханика – 2007. – Т. 10, №5. – с. 41-52.

[2] Lomakin E. V., Fedulov B. N., Nonlinear anisotropic elasticity for laminate composites //Meccanica. – 2015. – т. 50, № 6. – с. 1527-1535.

[3] Fedulov B. N., Fedorenko A. N., Kantor M. M., Lomakin E. V. Failure analysis of laminated composites based on degradation parameters //Meccanica, 2018, т. 53, № 1-2, с. 359-372.

ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ ВКЛЮЧЕНИЙ НА ГЕНЕРАЦИЮ ЭЛЕКТРОВИХРЕВЫХ ТЕЧЕНИЙ

Лосев Г.Л. [1], Ельтищев В.А. [1], Шестаков А.В. [1]

[1]*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*
losev.g@icmm.ru, eltishchev.v@icmm.ru, shestakov@icmm.ru

Экспериментальное изучение процессов, происходящих на микро- и мезомасштабах в жидких металлах представляет собой весьма труднореализуемую задачу. При этом именно микро- и мезоструктуры, такие как распределение и концентрация примеси, форма конгломератов примесных частиц, микромасштабные течения способны оказать критически важное влияние на макроскопические свойства всей системы [1, 2, 3]. Это обстоятельство приводит к необходимости численного моделирования поведения смеси в широком диапазоне масштабов: от масштаба рассмотрения отдельных частиц, до масштаба полного объёма среды, на котором возможно определение лишь некоторых эффективных, средних свойств.

Частица, движущаяся в потоке электропроводящей жидкости, испытывает силовое воздействие не только со стороны потока и прочих частиц, но также объёмных внешних для системы сил. Важным фактором объёмного воздействия на проводящую частицу со стороны внешней среды является электромагнетизм. Частица, помещенная в жидкость иной химической природы, имеет электрические свойства (в частности электропроводность) отличные от свойств окружающей среды. Таким образом, она будет подвержена воздействию объёмной силы отличающейся от таковой, действующей на окружающую жидкость, что порождает электромагнитный аналог пондеромоторных сил.

Настоящая работа ставит целью выявление закономерностей косвенного электромагнитного влияния внешних полей на динамику движения несферической частицы, имеющей проводимость отличную от проводимости несущей жидкости.

Рассматривается плоский слой жидкого металла, через который протекает постоянный электрический ток. В центре слоя размещена зеркально симметричная частица отличной от несущей жидкости проводимости. Неоднородность проводимости приводит к появлению дополнительных компонент плотности электрического тока и, как следствие, возникновению электровихревого течения. Возникающий в результате движения среды эффективный перепад динамического давления определяется структурой потока и играет роль объёмной силы, действующей на частицу со стороны течения.

Работа выполнена в рамках государственного задания «Крупномасштабные течения и теплообмен в проводящей и непроводящей жидкости в условиях мелкомасштабной турбулентности», регистрационный номер темы 124012300246-9.

Литература

[1] Chanda B., Das J. Evolution of microstructure homogeneity and mechanical properties in nano-/ultrafine eutectic CoCrFeNiNb ($0.45 \leq x \leq 0.65$) high entropy alloy ingots and cast rods // Journal of Alloys and Compounds. – 2022. – т. 901. – с. 163610.

[2] Zhang L., Li Xi., Li R., Jiang R., Zhang L. Effects of high-intensity ultrasound on the microstructures and mechanical properties of ultra-large 2219 al alloy ingot // Materials Science and Engineering: A. – 2019. – т. 763. – с. 138154.

[3] Kotadia H. R., Das A. Modification of solidification microstructure in hypo- and hyper-eutectic al–si alloys under high-intensity ultrasonic irradiation // Journal of Alloys and Compounds. – 2015. – т. 620. – с. 1–4.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ АЛЮМИНИЕВО-МАГНИЕВОГО СПЛАВА ПРИ ГОРЯЧЕМ ДЕФОРМИРОВАНИИ

Лыкова А.В., Третьяков М.П., Вильдеман В.Э., Оглезнева С.А.

[1]*Пермский государственный университет, Пермь*
cem_lykova@mail.ru, cem_tretyakov@mail.ru, wildemann@pstu.ru, ogleznevasa@pstu.ru

Алюминиево-магниевый сплав 1565ч, являющийся отечественным аналогом сплава AA5083, широко применяется как перспективный материал для изготовления изделий транспортного и авиационного назначения с применением процессов горячей прокатки и сверхпластической формовки [1]. Температурно-скоростные условия нагружения существенно влияют на сопротивление деформированию, пластичность и механизмы разрушения [2,3]. Для оптимизации существующих и разработки новых технологических процессов, а также для определения параметров существующих многоуровневых моделей требуется комплексное, в т.ч. экспериментальное, исследование закономерностей поведения материалов в широком диапазоне температур и скоростей деформации, соответствующем условиям термомеханической обработки изделия на разных этапах его изготовления.

В работе исследуется механическое поведение сплава 1565ч в условиях умеренно высоких температур и различных скоростей деформации. Испытания проводились на образцах с исходной крупнозернистой структурой и оценивалась возможность реализации больших пластических деформаций и режимов сверхпластичности. Для оценки анизотропии механических свойств, обусловленной текстурой горячей прокатки, образцы изготавливались в продольном и поперечном направлениях относительно оси прокатки.

По результатам экспериментального исследования установлены закономерности влияния температуры и скорости деформации на механическое поведение сплава 1565ч в диапазоне умеренно высоких температур и различных скоростей деформирования. Показано, что при 300°C сплав демонстрирует значительное увеличение пластичности и выраженную скоростную чувствительность. В ходе материаловедческих исследований сплава, получены данные о зеренной структуре образцов. Исследованы как начальная, так и конечная (после проведения испытаний на растяжение) структура образцов сплава 1565ч. Полученные результаты расширяют экспериментальную базу данных по алюминиевому сплаву 1565ч в диапазоне умеренно высоких температур и скоростей деформации и могут быть использованы при выборе режимов горячей обработки и при построении моделей термомеханического деформирования алюминиево-магниевых сплавов.

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

Литература

[1] Дриц А.М., Овчинников В.В. Свариваемый алюминиевый сплав 1565ч // Машиностроение и инженерное образование. – 2014. – №4. – с. 6-12.

[2] Summers P.T., Chen Y., Rippe C. M., Allen B., Mouritz A. P., Case S. W., Lattimer B.Y. Overview of aluminum alloy mechanical properties during and after elevated temperature exposure // Fire Science Reviews. – 2015. – vol. 4. – no. 3. – pp. 423–434.

[3] Rushchits S.V., Aryshenskii E.V., Sosedkov S.M., Akhmed'yanov A.M. Modeling the Hot Deformation Behavior of 1565ch Aluminum Alloy // Key Engineering Materials. – 2016. – vol. 684. – pp. – 35-41.

ВЛИЯНИЕ ПУЛЬСАЦИЙ ДАВЛЕНИЯ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ПЛОСКОГО ФРОНТА ВЫТЕСНЕНИЯ ВЯЗКОПЛАСТИЧЕСКОЙ ЖИДКОСТИ НЬЮТОНОВСКОЙ ЖИДКОСТЬЮ В ЯЧЕЙКЕ ХЕЛЕ-ШОУ

Любимова Т.П.[1,2], Кирпичёв В.А.[2], Устюгов М.Д.[2], Иванцов А.О.[1],

[1]*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*
[2]*Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь*
lubimova@icmm.ru

Во многих технологических процессах наблюдается эффект вязкого пальцеобразования - гидродинамической неустойчивости фронта вытеснения, известной также как неустойчивость Саффмана-Тейлора. Такая неустойчивость возникает, когда менее вязкая жидкость начинает вытеснять более вязкую и проявляется в форме пальцеобразных узоров, искажающих фронт вытеснения. Это явление отрицательно сказывается на эффективности технологических процессов: его возникновение нежелательно при нефтедобыче, фильтрации через пористые материалы. Внешнее периодическое воздействие может подавить развитие данной неустойчивости [1,2].

Целью настоящей работы являлось численное исследование влияния пульсаций давления на фронт вытеснения вязкопластической жидкости ньютоновской жидкостью в ячейке Хеле-Шоу, моделирующей однородную пористую среду. Физические параметры ньютоновской жидкости соответствуют воде. Реологические свойства неньютоновской жидкости описываются в рамках модели Гершеля–Балкли–Папанастасиу [3].

Численное моделирование показало, что в отсутствие периодического воздействия, поведение межфазной границы соответствует классическому сценарию неустойчивости Саффмана–Тейлора, приводящему к формированию пальцеобразных структур, характерных для вытеснения вязкой жидкости. Под действием пульсаций давления, поведение поверхности раздела существенно изменяется: в зависимости от параметров жидкости и интенсивности пульсаций наблюдается уменьшение скорости роста пальцев или даже полное подавление неустойчивости.

Изучено влияние периодического воздействия на скорость роста пальцеобразных возмущений фронта в области параметров ниже границы устойчивости. Определены параметры периодического воздействия, при которых фронт вытеснения устойчив, т.е. возмущения формы фронта затухают, и он принимает форму плоской поверхности. Полученные результаты позволяют оценить параметры периодического воздействия, необходимого для интенсификации фильтрации в пористых средах.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024).

Литература

[1] Иванцов А.О., Любимова Т.П. Численное моделирование осаждения капли жидкости в пористой среде // Вестник Пермского университета. Серия: Физика. – 2012. – № 4 (22). – С. 61-64.

[2] Lyubimova T, Ivantsov A, Lyubimov D. Control of fingering instability by vibrations // Mathematical Modelling of Natural Phenomena. – 2021. – Vol. 16. – P. 40.

[3] Papanastasiou T.C. Flows of Materials with Yield // Journal of Rheology. – 1987. – Vol. 31, №. 5. – P. 385-404.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВНУТРИСОСУДИСТОЙ ГЕМОДИНАМИКИ В ВИЛЛИЗИЕВОМ КРУГЕ С АНЕВРИЗМАМИ: ВЛИЯНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ КРОВИ

Любимова А.А. [1], Кучумов А.Г. [1,2]

[1]*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь*
[2]*Университет Сириус, Сочи*
sashal05@mail.ru, kychymov@inbox.ru

На данный момент основной причиной смертности в мире являются заболевания сердечно-сосудистой системы. Одно из таких заболеваний – аневризма сосудов головного мозга. Это локальное выпячивание сосудистой стенки, возникающее в месте ее истончения. Разрыв аневризмы влечет за собой субарахноидальное кровоизлияние и может приводить либо к серьезным неврологическим нарушениям, либо к смерти. На сегодняшний день существуют различные методы лечения пациентов с внутричерепными аневризмами: микрохирургические и эндоваскулярные. Однако любой вид лечения имеет высокие риски, и планирование лечения с учетом особенностей пациента имеет важное значение. Численное моделирование – это мощный инструмент, который может помочь неинвазивно оценить индивидуальные параметры кровотока внутри аневризм и в прилегающих сосудах. Но точность моделирования зависит от многих факторов, в число которых входит выбор реологической модели крови. Как правило с целью упрощения расчетов кровь считают ньютоновской жидкостью с постоянной вязкостью, но ее реальное поведение более сложное и зависит от поведения эритроцитов при разных скоростях сдвига [1].

В данной работе было рассмотрено восемь геометрий сосудов Виллизиева круга с аневризмами. Для моделирования использовались такие реологические модели, как ньютоновская, Carreau и Casson. Граничные условия на торцах входных артерий – профили скоростей, полученные при помощи интракраниальной допплерографии. На торцах выходных артерий применялась трехэлементная модель Windkessel. Стенки сосудов считались жесткими. Ключевым параметром сравнения выступали профили скоростей.

Сравнение расчетных и клинических данных о скоростях тока крови в правой и левой средних мозговых артериях показало, что все три реологические модели демонстрируют сходные результаты: систематическое превышение над экспериментальными данными на протяжении большей части сердечного цикла. При этом наблюдается совпадение систолических и диастолических фаз. Также были рассмотрены результаты моделирования скоростей тока крови внутри аневризматических мешков, позволившие увидеть совпадение пульсовых волн для трех реологических моделей. Различия между моделями минимальны. Это в целом обосновывает применение ньютоновской модели для численных экспериментов с подобной постановкой задачи [2, 3].

Литература

[1] Доль А. В. Биомеханика артерий шеи и головы: развитие аневризм и отрыв атеросклеротических бляшек при сочетанных патологиях // Российский журнал биомеханики. – 2024. – т. 28, № 3. – с. 25–38.

[2] Razavi S.E., Sahebjam R. Numerical Simulation of the blood flow behavior in the circle of Willis // Bioimpacts. – 2014. – Vol. 4, iss. 2. – P. 89–94.

[3] Brambila-Solorzano A., Mendez-Lavielle F., Naude J. L., Martinez-Sanchez G. J., Garcia-Rebolledo A., Hernandez B., Escobar-Del Pozo C. Influence of blood rheology and turbulence models in the numerical simulation of aneurysms // Bioengineering (Basel). – 2023. – Vol. 10, iss. 10. – Art. 1170.

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ВОДЫ, ЗАБИРАЕМОЙ ИЗ СТРАТИФИЦИРОВАННОГО ВОДОЕМА, ДЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ

Любимова Т.П. [1], Паршакова Я.Н. [1], Лепихин А.П. [2], Богомолов А.В. [2]

[1]*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*
[2]*Горный институт УрО РАН, Пермь*
lubimova@icmm.ru, parshakova@icmm.ru,lepihin49@mail.ru whitewing85@mail.ru

Работа посвящена решению проблемы обеспечения устойчивости технического водоснабжения из Верхне-Зырянского водохранилища в связи с ростом в нем минерализации воды вследствие активизации техногенных процессов. Решение этой проблемы требует комплексного подхода, сочетающего передовые инженерные технологии и адаптацию правового поля. Анализ показал, что пассивные мероприятия на водосборе, несмотря на их стратегическую важность, являются чрезвычайно ресурсоемкими и не гарантируют оперативного результата.

Одним из путей решения задачи обеспечения нормативного качества воды для целей технического водоснабжения является ее забор из слоя, находящегося выше порога водосброса. Этот слой воды в течение года активно промывается и в нем не наблюдается устойчивого роста минерализации. В этих условиях единственным способом, обеспечивающим устойчивость работы системы технического водоснабжения предприятий, является организация селективного отбора воды, в данном случае, путем повышения расположения оголовка водозабора, посредством изменения его конструкции, либо изменение способа пропуска воды из водохранилища. Трехмерное численное моделирование подтвердило эффективность такого метода.

Среди активных технологических мер наиболее радикальный эффект может быть достигнут также путем организации селективного сифонного водосброса, обеспечивающего целенаправленное удаление придонных рассолов. Его реализация сопряжена с необходимостью полной реконструкции гидротехнического узла. В качестве высокоэффективной меры текущего улучшения качества водоснабжения, предлагается строительство донного водовыпуска для гидротехнических сооружений. Как показали натурные наблюдения и трехмерное численное моделирование, организация селективного сифонного водосброса для удаления придонных рассолов приводит к уменьшению концентрации примеси на дне в два раза в течение первых суток и на порядок за пять суток радикального сброса воды.

Таким образом, устойчивость системы технического водоснабжения предприятий может быть обеспечена селективным отбором воды, что достигается либо конструктивным изменением водозабора с повышением расположения его оголовка, либо модификацией способа пропуска воды из водохранилища.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024).

УСТОЙЧИВОСТЬ И НЕЛИНЕЙНЫЕ РЕЖИМЫ КОНВЕКЦИИ В ГОРИЗОНТАЛЬНОМ ПОРИСТОМ СЛОЕ, НАСЫЩЕННОМ ТРЕХКОМПОНЕНТНОЙ ЖИДКОЙ СМЕСЬЮ

Любимова Т.П. [1], Шубенков И.С. [1,2]

[1]*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*
[2]*Пермский государственный университет, Пермь*
lubimova@icmm.ru, ShubenkovIS@yandex.ru

Работа посвящена исследованию конвекции трёхкомпонентной смеси углеводородов в горизонтальном пористом слое под действием вибраций. Эта проблема важна для геологических приложений. Рассматривается бесконечный горизонтальный слой пористой среды, насыщенной трехкомпонентной жидкой смесью. Границы слоя твердые, идеально теплопроводные, непроницаемые для вещества, на них заданы постоянные разные температуры. Слой находится в поле силы тяжести и высокочастотных малоамплитудных вибраций, параллельных градиенту температуры. Задача решается с учетом эффекта термодиффузии.

В работе [1] данная задача исследовалась без воздействия вибраций. Получена карта устойчивости и найдена новая длинноволновая колебательная мода неустойчивости, являющаяся наиболее опасной во всем диапазоне ее существования. Исследование нелинейных режимов конвекции методом конечных разностей показало, что первичная бифуркация, в результате которой механическое равновесие теряет устойчивость, является сверхкритической. Перестройка структуры конвективного течения при изменении числа Рэлея–Дарси сопровождается явлениями гистерезиса.

Вибрации способны оказывать значительное влияние на устойчивость механического равновесия. Уравнения тепловой вибрационной конвекции в однородной однокомпонентной жидкости под действием тяжести и высокочастотных малоамплитудных вибраций получены в [2], в пористой среде, насыщенной однокомпонентной жидкостью в [3]. В настоящей работе анализ проводится на основе уравнений конвекции в пористой среде, насыщенной многокомпонентной смесью в поле тяжести и высокочастотных малоамплитудных вибраций, полученных в [4]. Анализ линейной устойчивости равновесия по отношению к длинноволновым возмущениям показал, что вибрации не оказывают влияния на длинноволновую моду неустойчивости. На ячеистые возмущения вибрации оказывают стабилизирующее действие, повышая порог конвекции, при этом сужая диапазон существования ячеистых монотонных и колебательных возмущений. Наличие вибраций приводит к уменьшению частоты критических колебательных возмущений во всём диапазоне их существования.

Литература

[1] Lyubimova T. P., Shubenkov I. S., Soret-induced convection of ternary fluid in a horizontal porous layer heated from below // Physics of Fluids. – 2023. – Vol. 35, no 084114.

[2] Gershuni G. Z., Lyubimov D. V., Thermal Vibrational Convection // Wiley & Sons. – 1998. – 358 p.

[3] Zen'kovskaya S. M., Effect of high-frequency vibration on filtration convection // J Appl Mech Tech Phys. – 1992. – 33, 691–695.

[4] Charrier-Mojtabi M. C., Razi Y. P., Maliwan K., Mojtabi A., Influence of vibrations on Soret-driven convection in porous media // Numer. Heat Transf. A Appl. – 2004. – v. 46, pp. 981–993.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ДИНАМИКА ВОЛНОВОГО ПАКЕТА В ЦЕПОЧКЕ ПЕЙРАРДА-БИШОПА-ДОКСУА

Ляжков С.Д. [1,2,3]

[1] *Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург*
[2] *Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург*
[3] *Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Санкт-Петербург*
sergeiliazhkov@gmail.com

В работе исследуется распространение низкоамплитудного волнового пакета с гладкой огибающей в цепочке Пейрарда–Бишопа–Доксуа (модель ДНК [1]) в рамках теории энергетической динамики [2]. Данная теория позволяет описывать перенос сгустка энергии посредством аналогии с движением абсолютно твёрдого тела (АТТ). Показано аналитически, что полная энергия (аналог массы АТТ) и поток энергии (аналог импульса АТТ) волнового пакета, усреднённые по его периоду, постоянны в течение длительного времени. Вследствие этого скорость энергетического центра волнового пакета (аналог скорости центра масс АТТ) также остаётся постоянной. Кроме того, установлено сохранение в течение продолжительного времени центрального суперпотока энергии волнового пакета (аналога центрального момента инерции АТТ), усреднённого по его периоду, что приводит к линейному росту во времени энергетического радиуса волнового пакета (аналога радиуса инерции АТТ). Полученные аналитические результаты подтверждены сравнением с результатами численного моделирования, полученными методом молекулярной динамики. Работа содержит результаты проекта «ПФИ-2025-75», выполненного в рамках Программы фундаментальных исследований НИУ ВШЭ в 2026 году.

Литература

[1] Dauxois T., Peyrard M., Bishop A. R. Dynamics and thermodynamics of a nonlinear model for DNA denaturation //Physical Review E. – 1993. – Т. 47. – №. 1. – С. 684.

[2] Krivtsov A. M. Dynamics of matter and energy //ZAMM. – 2022. – Т. 103. – №. 4. – С. e202100496.

БОГАТАЯ ВИХРЕВАЯ ДИНАМИКА ЖИДКОГО МЕТАЛЛА ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВСТРЕЧНО-ВРАЩАЮЩИХСЯ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

Мамыкин А.Д., Лосев Г.Л., Колесниченко И.В.

Институт механики сплошных сред УрО Ран, Пермь
mad@icmm.ru

Закрученные потоки широко распространены в природе [1] и технологических процессах, например, в центробежных насосах, участках трубопроводов за диверторами и в перемешивателях [2]. В частности, для нужд литейной промышленности хорошо зарекомендовали себя магнитогидродинамические (МГД) перемешиватели. В них интенсивные течения электропроводной среды создаются под воздействием бегущих либо вращающихся магнитных полей (ВМП), или их сочетания. Такие аппараты применяются для улучшения качества металлов и их сплавов. Зачастую на производстве не удается разместить индукторы МГД-перемешивателя вокруг всей ёмкости с жидким металлом, поэтому актуальна задача локального воздействия ВМП и исследование области распространения закрученного потока. С фундаментальной точки зрения интересна МГД-интерпретация задачи Куэтта-Тейлора, в которой роль вращающихся с разной скоростью цилиндров выполняют магнитные поля различной интенсивности, закручивающие проводящую среду с разной угловой скоростью и/или в различном направлении.

Для исследования вышеобозначенных задач в лаборатории технологической гидродинамики «ИМСС УрО РАН» была спроектирована и создана экспериментальная установка, состоящая из цилиндрической ячейки с Т-образным сечением и двух индукторов вокруг цилиндров различного диаметра – 98 мм (нижнего) и 212 мм (верхнего). Высоты цилиндров составляют 150 мм. Каждый из индукторов содержит секционный магнитопровод с катушками, надетыми на его зубья, направленные к главной оси цилиндрической ячейки. Катушки каждого индуктора подключены по схеме ВМП к трехфазным источникам тока независимо, что позволяет создавать в цилиндрах электромагнитные силы различной величины и направления. Экспериментальная ячейка заполнена эвтектическим сплавом галлия.

Измерения проводились двумя методами: оптическим – при помощи фотографирования поверхности жидкого металла и пузырьков-трекеров восстанавливалось поле скорости на этой поверхности, и доплеровской анемометрии – при помощи ультразвукового датчика Доплера измерялись вертикальные профили скорости жидкого металла внутри ячейки.

Рассматривались режимы с включенными по отдельности индукторами, а также с индукторами, включенными в противоположных направлениях. Показано, что в данной постановке задачи реализуются разнообразные вихревые течения: квазитвердотельное вращение с образованием широкой воронки при увеличении воздействия, узкая глубокая воронка, волновое движение в приповерхностном слое, нерегулярные мелкомасштабные гидродинамические структуры, торнадоподобный вихрь вблизи центральной оси канала, а также их вариации и сочетания. Составлена карта режимов в зависимости от интенсивности электромагнитного воздействия на нижнюю и верхнюю области ячейки.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024).

Литература

[1] Соколов Д.Д. Современное состояние и перспективы лабораторного динамо-эксперимента // Соросовский образовательный журнал. – 2001. – № 4. – С. 111—115.

[2] Вольдек А. Индукционные магнитогидродинамические машины с жидкометаллическим рабочим телом // Энергия. Ленинград. – 1970. – С. 271.

ПРИМЕНЕНИЕ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ АНАЛИЗА ЭФФЕКТИВНОСТИ ЛАЗЕРНОЙ УДАРНОЙ ОБРАБОТКИ МЕДИ

Манухина К.Д. [1*], Погорелко В.В. [2], Майер А.Е. [2], Плехов О.А. [1]

[1]*Институт механики сплошных сред Уральского отделения РАН, Пермь*
[2] *Челябинский Государственный Университет, Челябинск*
ksmanuhina15@gmail.com

В настоящее время активно разрабатывается метод лазерной ударной обработки (ЛУО) для упрочнения металлов и сплавов [1]. Этот метод заключается в формировании поля остаточных напряжений путем высокомощного короткоимпульсного лазерного воздействия и генерации в материале упругопластической волны, что позволяет использовать это явление для увеличения срока службы материалов и изделий.

Для успешного применения технологии необходима разработка математической модели, описывающей процесс распространения волны напряжения в меди, которая вызвана импульсной нагрузкой, соответствующей лазерному облучению. Разработана одномерная модель, которая рассчитывает динамику распространения волны напряжения и позволяет определить степень пластической деформации, скорость свободной поверхности и распределение остаточных напряжений по глубине. В качестве материала используется медь, как простой и хорошо изученный материал. Воздействие лазерного облучения задается профилем давления, полученным из ранее предложенной широкодиапазонной модели ЛУО [2]. Для описания зависимостей напряжений от пластических деформаций используется модель Джонсона-Кука (ДК) [3].

Для калибровки параметров модели ДК используется метод Байеса, заключающийся в случайном переборе параметров и оценке соответствия модельных профилей экспериментальным профилям скорости свободной поверхности [2].

Показано, что модель ДК корректно описывает состояния системы в процессе ЛУО. Проведено сравнение экспериментальных кривых с моделями ЛУО на основе модели пластичности ДК и широкодиапазонной модели [3].

Для исследования влияния ЛУО на формирование остаточных напряжений в материале была обучена нейросеть для определения профиля давления в широком диапазоне плотностей энергии и длительности лазерного облучения. С помощью сгенерированных нейросетью профилей давления и модели ДК были посчитаны распределения остаточных напряжений, которые позволяют определить оптимальные параметры облучения при ЛУО для обеспечения необходимых сжимающих напряжений по глубине.

Разработка и обучение нейросети для получения профиля давления при лазерном облучении в широком диапазоне плотности энергии и длительности импульса выполнены за счет Российского Научного Фонда (проект № 24-19-00684, https://rscf.ru/project/24-19-00684/)

Литература

[1] Clauer A. H., Laser shock peening, the path to production //Metals. – 2019. – 9, 626.

[2] Mayer A. E., Vshivkov A. N., Plekhov O. A., Manukhina K. D., Rodionov E. S., Mayer P. N., Experimental and numerical study of stress wave generation and attenuation in copper during laser shock peening //J. Appl. Phys. – 2025. – 137 (6): 065901.

[3] Shen W., Xue F., Li Ch., Liu Yi, Mo X., Gao Q., Study on constitutive relationship of 6061 aluminum alloy based on Johnson-Cook model //Materials Today Communications. – 2023. – V. 37, – 106982, ISSN 2352-4928.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОСНАСТКИ И КОЛЬЦЕВЫХ СТЯЖЕК ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЛОКАЛЬНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ВЫСОКОНАГРУЖЕННЫХ ТРУБЧАТЫХ МЕТАЛЛОКОМПОЗИТНЫХ СТРЕЖНЕЙ

Марескин И.В. [1]

[1] *Федеральное автономное учреждение «Центральный аэрогидродинамический институт им.профессора Н.Е.Жуковского», г. Жуковский*
info@tsagi.ru

Одним из перспективных, с точки зрения обеспечения весовой эффективности, вариантов высоконагруженных конструкций может быть ферменная конструкция на основе гибридных металло-композитных осесимметричных трубчатых стержней [1]. Гибридные силовые стержни состоят из центральной композитной тонкостенной трубы и торцевых металлических конических стыковочных частей [2][3]. Композитная труба выполнена из однонаправленных узких лент, уложенных под малыми углами к оси симметрии стержня, что позволяет в значительной мере использовать высокие прочностные и жесткостные свойства армирующих волокон.

Однако, не смотря на малые углы ориентации укладки относительно оси, волокна имеют значительное искривление, которое приводит к снижению локальной устойчивости при осевом сжатии и снижению прочности при растяжении. В работе предложены способы улучшения прочностных характеристик таких конструкций за счет включения технологической оснастки в состав конструкции и использования специальных кольцевых стяжек.

Целью настоящей работы является исследование влияния на прочность и устойчивость конструкции дополнительных элементов в зависимости от их жесткостных и прочностных свойств. В работе проведены исследования по поиску положительной синергии от взаимодействия конструкции трубы и дополнительных элементов.

Исследование проводилось с использование параметрических конечно-элементных и аналитических моделей. Представлен ряд результатов проводимых исследований.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение №075-15-2024-535 от 23.04.2024)

Литература

[1] A. Shanygin, E. Dubovikov, V. Fomin, I. Mareskin, M. Zichenkov «Designing pro-composite truss layout for load-bearing aircraft structures.» Fatigue Fract Eng Mater Struct. 2017;40(10):1612–1623. https://doi.org/10.1111/ffe.12695 Online ISSN: 1460-2695

[2] Кондаков И.О., Марескин И.В., Миргородский Ю.С., Чернов А.В., Шаныгин А.Н., Композитный стержневой конструкционный элемент, патент РФ на изобретение № 2724035, 2020.

[3] Беликов С.Э., Ведерников Д.В., Крючков Е.И., Марескин И.В., Миргородский Ю.С., Фомин В.П., Шаныгин А.Н., "Устройство для передачи нагрузки", Патент РФ на полезную модель № 199953, 2020

КОНВЕКЦИЯ В ПОРИСТОЙ СРЕДЕ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ МОДЕЛЯХ ЗАКУПОРКИ

Марышев Б.С. [1,2], Клименко Л.С. [1,2]

[1]*Институт механики сплошных сред УрО, РАН, Пермь*
[2] *Пермский государственный университет, Пермь*
bmaryshev@mal.ru, lyudmilaklimenko@gmail.com

Работа посвящена изучению конвективной устойчивости горизонтального просачивания смеси через слой пористой среды при наличии иммобилизации и закупорки. Фильтрация смеси, состоящей из несущей жидкости и примеси, создается заданным постоянным перепадом давления. Предполагается, что некоторая часть примесь может оседать на стенках пор. Моделирование фильтрационного течения проведено в рамках MIM (mobile/ immobile media) подхода. [1]. Согласно этому подходу примесь может находиться в двух состояниях мобильности – мобильном и немобильном (, адсобрированная примесь). Перемещение примеси описывается с помощью стандартной модели диффузии-адвекции для мобильной компоненты с учетом перехода части примеси в немобильное состояние – иммобилизация. Процесс иммобилизации описывается с помощью нелинейной кинетической модели второго порядка с насыщением немобильной компоненты [2]. Течение смеси через массив пористой среды описано в рамках приближения Дарси-Буссинеска [4]. При иммобилизации примесь занимает часть порового пространства, тем самым снижая пористость среды и ее проницаемость. Повышение гидравлического сопротивления среды влияет на интенсивность течения и на условия возникновения конвекции. Как было показано в работе [6], для многих материалов в качестве зависимости проницаемости среды от пористости должно быть использовано обобщенное соотношение Козени-Кармана, которое обладает дополнительными параметрами, описывающими свойства пористого материала. Основной задачей исследования является получение зависимостей условий возникновения конвекции от параметров обобщенного соотношения.

Получены условия возникновения двумерного конвективного течения в виде зависимостей критического числа Релея-Дарси от параметров модели, прежде всего от степени закупорки среды, пористости и параметров обобщенного соотношения Козени-Кармана. Показано, что по сравнению с классическим соотношением может наблюдаться как стабилизация горизонтальной фильтрации, так и дестабилизация. Выяснено что этот эффект нелинейный и зависит от пористости среды и степени закупорки.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта " Фундаментальная механика в новых материалах, конструкциях, технологиях" при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024).

Литература

[1] Спивак Л.В., Скрябина Н.Е., Кац М.Я. Водород и механическое последействие в металлах и сплавах – Пермь, 1993. – 343 с.

[1] Deans H. A. A mathematical model for dispersion in the direction of flow in porous media // SPE Journal. – 1963. Vol. 3. P. 49-52.

[2] Selim H. M. Prediction of contaminant retention and transport in soils using kinetic multireaction models // Environ. Health Perspect. – 1989. Vol. 83. P. 69-75.

[3] Nield D. A., Bejan A. Convection in porous media. Springer – 2017, 988 p.

[4] Henderson N., Brêttas J. C., Sacco W. F. A three-parameter Kozeny–Carman generalized equation for fractal porous media // Chem. Eng. Sci. – 2010. Vol. 65. P. 4432-4442

МОНИТОРИНГ ФОРМИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ И ОСТАТОЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ В РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ

Матвеенко В.П., Сероваев Г.С., Кошелева Н.А., Галкина Е.Б., Конюхов В.А.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
serovaev@icmm.ru

Накопление технологических и остаточных деформаций является критическим фактором, определяющим прочностные характеристики, геометрическую точность и эксплуатационную надежность широкого спектра изготавливаемых деталей. Традиционные методы оценки напряженно-деформированного состояния часто не позволяют получить достоверную информацию о внутренних процессах, происходящих непосредственно в массиве материала на стадиях его формирования. Конструктивные особенности волоконно-оптических датчиков (ВОД) позволяют интегрировать их в структуру материалов на этапе производства, обеспечивая уникальную возможность непрерывной регистрации эволюции полей деформаций.

В работе представлены результаты экспериментальных исследований по регистрации технологических и остаточных деформаций с помощью точечных ВОД на основе волоконных брэгговских решеток и распределенных ВОД на основе рэлеевского рассеяния для нескольких классов материалов.

Для материалов на цементной основе реализована методика длительной регистрации технологических деформаций с использованием встроенных ВОД. Показано, что в образцах со свободной верхней поверхностью деформации сжатия продолжают накапливаться в течение длительного времени, а их распределение по высоте является неоднородным.

Распределенные измерения в образцах из термопластичных полимеров показали, что после завершения печати методом послойного наплавления в течение приблизительно 10 часов продолжается процесс формирования остаточных деформаций, связанный с охлаждением материала. Построение двумерных полей продольной деформации для образцов в виде пластин выявило существенные различия в механическом поведении исследуемых материалов. Полилактид (PLA) продемонстрировал однородное поле деформаций в процессе остывания без выраженных локальных концентраторов. В то время как для образцов из полиэтилентерефталат-гликоля (PETG) и композитного материала на основе акрилонитрилбутадиенстирола, армированного углеродным волокном (ABS+CF), распределенные ВОД зафиксировали скачкообразные изменения профиля деформаций, которые свидетельствуют о частичном отслоении материала от печатной платформы и последующем короблении изделия.

Полученные результаты продемонстрировали, что использование встроенных в структуру материалов ВОД является высокоинформативным методом контроля механического состояния и позволяет не только количественно оценивать уровень остаточных деформаций, но и отслеживать кинетику их формирования, выявлять пространственные неоднородности, диагностировать дефекты производства. Эти данные могут быть использованы для выбора оптимальных технологических режимов изготовления.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 124020700047-3).

ДИСЛОКАЦИОННО-ОРИЕНТИРОВАННАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ЭФФЕКТА ПОРТЕВЕНА – ЛЕ ШАТЕЛЬЕ

Мехоношин К.А. [1], Трусов П.В. [1]

[1]*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь*
ctrllll@vk.com, tpv@pstu.ru

Актуальной задачей является разработка физически-ориентированных многоуровневых моделей для исследования процессов термомеханической обработки (ТМО) многофазных сплавов. Построение таких конститутивных моделей требует детального анализа и описания физических механизмов, реализующихся при ТМО данных материалов, в частности, рассмотрение взаимодействия дислокаций с примесными атомами. При определённых температурно-скоростных условиях деформирования в сплавах проявляется широко известный в области физики деформируемого твёрдого тела эффект прерывистой пластичности [1], связанный непосредственно со взаимодействием данных дефектов [2].

На стадии разработки структуры формулируемой конститутивной модели для описания эффекта Портевена – Ле Шателье (ЭПЛШ) проанализированы его физические механизмы. В качестве основных приняты: 1) формирование скоплений атомов примесей в окрестностях временно остановленных на препятствиях дислокаций [3, 4], 2) «сбор» атомов легирующих элементов медленно движущимися дислокациями [5].

Для описания ЭПЛШ предложена модификация дислокационно-ориентированной многоуровневой модели неупругого деформирования поликристаллических сплавов [6]. На мезоуровне, оперирующим параметрами дефектной структуры кристаллита, сформулированы основные эволюционные соотношения для концентраций атомов примесей, базирующиеся на принятых физических механизмах взаимодействия дислокаций с примесными атомами, внедрён дополнительный вклад в изменение критических касательных напряжений на системах скольжения за счёт данного взаимодействия.

Приведена двухэтапная процедура идентификации модели, основанная на принципе расщепления параметров модели по основным рассматриваемым физическим механизмам неупругого деформирования, на методах статистического анализа и вейвлет-преобразования. Представлены результаты применения идентифицированной модели для описания ЭПЛШ при деформировании образцов из сплава Al-Mg.

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

Литература

[1] Portevin A., Le Chatelier F. Sur un phenomene observe lors de l’essai de traction d’alliages en cours de transformation // Compt. Rend. Acad. Sci. Paris. – 1923. – т. 176. – с. 507-510.

[2] Cottrell A.H. Dislocations and plastic flow in crystals – New York: Oxford Univ. Press., 1953. – 223 с.

[3] Cottrell A.H., Jaswon M.A. Distribution of solute atoms round a slow dislocation // Proc. R. Soc. – 1949. – т. 199. – с. 104-114.

[4] Ait-Amokhtar H., Fressengeas C., Bouabdallah K. On the effects of the Mg content on the critical strain for the jerky flow of Al–Mg alloys // Materials Science; Engineering A. – 2015. – т. 631. – с. 209-213.

[5] Petukhov B.V. Hardening of crystals caused by the dynamic aging of dislocations // Crystallography Reports. – 2003. – т. 48, № 5. – с. 813-818.

[6] Трусов П.В., Грибов Д.С. Трёхуровневая модель, основанная на физических теориях пластичности: формулировка, алгоритмы реализации, результаты применения для исследования циклического нагружения // Вычислительная механика сплошных сред. – 2022. – т. 15, № 3. – с. 274-288.

ПОИСК РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВСТРОЕННОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА НА ОСНОВЕ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ ДЛЯ НАДЕЖНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЛОКАЛИЗАЦИИ И УРОВНЯ ВНЕШНЕГО УДАРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ПРО-БИОНИЧЕСКУЮ КОНСТРУКЦИЮ ПАНЕЛИ

Миргородский Ю.С. [1]

[1]*Федеральное автономное учреждение*
«Центральный аэрогидродинамический институт им.профессора Н.Е.Жуковского»,
г.Жуковский
info@tsagi.ru

Для успешного внедрения КМ в высоконагруженные части конструкции необходимо решить задачу обеспечения ударной прочности основных силовых элементов конструкции. В процессе эксплуатации композитной конструкции возможны случайные ударные повреждения, которые не видны при визуальном осмотре, однако их наличие может быть критично для дальнейшей эксплуатации из-за значительного снижения прочности. Традиционное решение за счет увеличения толщины материала снижает весовую эффективность композитных КСС и, как правило, малоэффективно для решения задачи обеспечения ударной прочности. Возможное решение данной задачи было предложено для про-бионических конструкций на основе создания многоуровневой системы защиты ответственных силовых элементов [1]. Предложенная система защиты позволяет обеспечить защиту при высоких уровнях ударных воздействий, однако, ее наличие делает невозможным какой-либо визуальный или аппаратный оперативный внешний контроль. По этой причине необходимо иметь встроенный мониторинг технического состояния силовых элементов. Таким средством может быть встроенная система на основе пьезоэлектрических датчиков, которая фиксирует локализацию и уровень ударных воздействий на конструкцию за длительный период эксплуатации. Данная система мониторинга представляет собой, по сути, аналог нервной системы биоорганизма. Цель настоящей работы состоит в создании математического аппарата для анализа отклика таких про-бионических конструкций на ударные воздействия. Аппарат необходим для разработки конфигурации системы и ее отладки.

В данной работе, на примере созданного совместно с работниками КНИТУ-КАИ демонстратора про-бионической панели с сетчатым реберным каркасом и системой защиты совмещенной с системой мониторинга, проведены валидационные расчетно-экспериментальные исследования по оценке эффективности разработанного математического аппарата по определению амплитудно-частотных характеристик панели после ударных воздействий в области регулярной части ребра и в области перекрестия ребер. Расчетные исследования проводились с использованием специально разработанных многопараметрических КЭ моделей, тогда как экспериментальные исследования на основе специальной обработки данных, получаемых с пьезоэлектрических датчиков.

В результате сравнения первых собственных частот колебаний, полученных в рамках расчетных и экспериментальных исследований, расхождение составило не более 3%.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение №075-15-2024-535 от 23.04.2024)

Литература

[1] S.L. Chernyshev, E.A. Dubovikov, A.A. Ionov, I.O. Kondakov, A.N. Shanygin, M.C. Zichenkov «Basic principles for creating light, efficient and safe structures for the next generation supersonic transport» Acta Astronautica 204 (2023) 728–737. https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2022.10.035 Online ISSN: 0094-5765

ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ КОНФИГУРАЦИЙ БЕГУЩЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ОБРАЗОВАНИЕ ВИХРЕВЫХ СТРУКТУР В ЖИДКОМ МЕТАЛЛЕ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ

Митрополит И.Ю. [1], Лосев Г.Л. [1], Ельтищев В.А. [1], Колесниченко И.В. [1]

[1]*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*
mitropolit.i@icmm.ru, losev.g@icmm.ru, eltishchev.v@icmm.ru, kiv@icmm.ru

Гидродинамика расплава является основным фактором в процессе формирования микроструктуры и обусловленных ей механических свойств металлов и сплавов, так как конвективные течения в жидкой фазе кристаллизующегося материала существенно влияют на распределение примесей, фронт кристаллизации и, как итог, на всю дефектную структуру материала [1].

Отсутствие внешнего воздействия приводит к неравномерному распределению примесей и образованию структурных дефектов, а приложение внешних сил, в свою очередь, позволяет значительно улучшать гомогенизацию расплава и контролировать морфологию межфазных границ. Высокая электропроводность жидких металлов дает возможность генерации сил и формирования перемешивающих течений в расплавах при помощи магнитного поля. Данный подход – электромагнитное перемешивание – весьма эффективен и находит широкое применение в металлургической промышленности [2].

Настоящая работа посвящена исследованию перемешивающих потоков в жидком металле, которые создаются многосекционной линейной индукционной машиной посредством генерации бегущего магнитного поля (БМП).

Проведена валидация математической модели, основанной на системе уравнений магнитной гидродинамики в электродинамическом приближении, по данным экспериментов по созданию течения жидкого галлия в узкой изложнице под воздействием разнонаправленных бегущих магнитных полей. Электродинамические параметры задачи определялись при помощи программной среды ANSYS EMAG, гидродинамические параметры – в ANSYS Fluent.

В рамках работы численно исследованы вихреобразование и взаимодействие встречных потоков жидкого металла в узкой изложнице. Изучены некоторые свойства линейной индукционной машины и влияние особенностей генерируемых ей конфигураций магнитного поля, в частности, перезамыкания линий магнитного поля на расположенных близко катушках, на формирование течений.

Изучены перемешивающие характеристики потоков, созданных различными конфигурациями БМП, при помощи моделирования движения пассивной примеси в объеме жидкого металла. Описаны наиболее эффективные конфигурации.

Работа выполнена в рамках государственного задания «Крупномасштабные течения и теплообмен в проводящей и непроводящей жидкости в условиях мелкомасштабной турбулентности», регистрационный номер темы 124012300246-9.

Литература

[1] Davis S. H. Theory of Solidification. – Cambridge University Press, 2001. – 392 p.

[2] Cramer A., Pal J., Gerbeth, G. Electromagnetic Stirring with Superimposed Travelling and Rotating Magnetic Fields // Przeglad Elektrotechniczny. – 2008. – Vol. 84, No. 11. – 144-148.

МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ И АТОМНО-СИЛОВАЯ МИКРОСКОПИЯ В ОПРЕДЕЛЕНИИ СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТИ ПОЛИМЕРА

Морозов И.А.

Институт механики сплошных сред, Пермь
imorozov@icmm.ru

Методы атомно-силовой микроскопии (АСМ) нашли широкое применение не только в исследовании структуры, но и в изучении физико-механических свойств поверхностей. В последнем случае наиболее распространенным подходом является индентирование поверхности в воздушной среде. В таких экспериментах контактному взаимодействию предшествует скачек острия к поверхности. Высокая скорость изгиба кантилевера на участке бесконтактного взаимодействия не позволяет определить момент контакта острия с мягким материалом [1]; сразу после контакта, острие может внедряться в поверхность за счет сил инерции и адгезии на глубину до нескольких нанометров. Достоверное нахождение начала контакта является основополагающим и влияет на все измеряемые характеристики неоднородных материалов: рельеф поверхности и структура подповерхности [2], их физико-механические свойства.

Согласно теореме Найквиста-Шеннона, непрерывный сигнал может быть полностью восстановлен из дискретного только в том случае, если частота дискретизации вдвое выше частоты исходного сигнала. Высокая скорость сближения острия и поверхности на участке начального взаимодействия и ограниченная частота записи АСМ-данных приводят, с одной стороны, к потере значимых точек на кривой взаимодействия и, следовательно, неправильной интерпретации результатов. С другой стороны, ускоренное движение острия делает невозможным применение простых статических моделей. В настоящей работе для расшифровки бесконтактного и начального контактного вязкоупругого взаимодействия острия с поверхностью предлагается использовать алгоритмы машинного обучения, натренированные на модели динамического взаимодействия острия с поверхностью.

Данные для обучения были получены из решения большого количества модельных задач с использованием динамической модели гармонического осциллятора (рассматривали как бесконтактное, так и контактное вязкоупругое взаимодействия). В результате, из начального участка экспериментальной кривой силового взаимодействия зонда АСМ с поверхностью были последовательно определены константа бесконтактного взаимодействия, точка контакта острия с поверхностью и механические свойства поверхности (модуль упругости и коэффициент вязкости).

Предлагаемый подход проиллюстрирован расшифровкой эксперимента по индентированию эпоксидной смолы и может быть использован для анализа физико-механических свойств поверхностей широкого класса полимерных материалов.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда и Министерства образования и науки Пермского края (соглашение №С-26/1774 от 12.05.25): грант №25-21-20086.

Литература

[1] Morozov I.A., Izumov R.I. Influence of experimental conditions on apparent AFM tip-surface contact in air // Ultramicroscopy. – 2025. – V. 273. №. 114148.

[2] Wang D., Fujinami S., Nakajima K., Nishi T. True Surface Topography and Nanomechanical Mapping Measurements on Block Copolymers with Atomic Force Microscopy // Macromolecules. – 2010. – V. 43. P. 3169-3172.

ВЛИЯНИЕ ГИБРИДНЫХ И СМЕШАННЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАПОЛНИТЕЛЕЙ НА ВЯЗКОУПРУГИЕ СВОЙСТВА ЭЛАСТОМЕРНЫХ НАНОКОМПОЗИТОВ

Мохирева К.А. [1], Свистков А.Л. [1]

[1]*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*
lyadovaka@icmm.ru, svistkov@icmm.ru

В рамках данной работы проведено комплексное исследование эластомерных нанокомпозитов на основе бутадиен-нитрильного каучука (БНК). Объектом изучения стали материалы с суммарным содержанием наполнителя 40 массовых частей (м.ч.) на 100 м.ч. каучука. Были рассмотрены шесть композиций: классическая (40 м.ч. технического углерода, ТУ) и пять вариантов, где 7 м.ч. углерода заменялись на: 1) ТУ, модифицированный графеном (гибридный наполнитель); 2) графен из крахмала; 3) графен из целлюлозы; 4) многостенные углеродные нанотрубки (МУНТ); 5) МУНТ, модифицированный графеном (гибридный наполнитель).

Ключевой особенностью работы стал подход к созданию гибридных наполнителей: графен синтезировался непосредственно в среде основного наполнителя методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС). Содержание графена в гибридной среде составляло 10–15 м.ч. Гибридный наполнитель в количестве 7 м.ч. вводился в полимерную матрицу, предварительно модифицированную ТУ (33 м.ч.).

Механическое поведение материалов оценивали на основе данных испытаний с вложенными циклами нагружения и ступенчато нарастающей амплитудой деформаций, а также результатов динамического механического анализа (ДМА). Анализ зависимостей истинного напряжения от кратности удлинения показал, что совместное введение ТУ и МУНТ, по сравнению с чистым ТУ (в той же суммарной концентрации), повышает жесткость материала и усиливает вязкоупругие эффекты. Однако расчет начального модуля по «размягченной» равновесной кривой выявил обратную тенденцию: материал с чистым ТУ обладает большей равновесной жесткостью в области малых деформаций. Это объясняется морфологией наполнителя: нанотрубки сохраняются в виде агрегатов («клубков»), служащих концентраторами микродефектов, тогда как ТУ лучше диспергируется и эффективнее взаимодействует с полярной матрицей (БНК).

Модификация нанотрубок графеном приводит к снижению жесткости композита и росту его деформативности. Одновременно наблюдается увеличение диссипативных свойств. Предполагается, что графен способствует перераспределению внутренних напряжений и формированию более гибких межфазных границ. В результате работы получены количественные параметры вязкоупругого поведения для различных типов наполнителей.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024).

НАКОПЛЕНИЕ ПОВРЕЖДЕНИЙ, РАЗУПРОЧНЕНИЕ, РАЗРУШЕНИЕ В АНАЛИТИЧЕСКИХ И ЧИСЛЕННЫХ РЕШЕНИЯХ КРАЕВЫХ ЗАДАЧ

Мугатаров А.И., Вильдеман В.Э.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
iamugatarov@pstu.ru, wildemann@pstu.ru

Работа посвящена изучению закономерностей неупругого деформирования и разрушения твердых тел на основе анализа аналитических и численных решений краевых задач. Рассмотрены процессы деформирования и разрушения упруго-хрупких тел со случайными прочностными характеристиками структурных элементов. Изучены особенности разрушения пластин с концентраторами напряжений при одноосном и двухосном пропорциональном нагружении [1]. Продемонстрированы возможность реализации закритического деформирования тела на макроуровне и влияние нагружающей системы на устойчивость процессов накопления повреждений. На основе метода суперэлементов предложен способ учета свойств нагружающих систем при численном решении краевых задач. Получены аналитические решения задач о растяжении системы параллельно соединенных элементов со случайными прочностными характеристиками [2] и о кручении цилиндрических тел [3] при учете разупрочнения материала и жесткости нагружающей системы. Продемонстрирована возможность выявления дополнительных прочностных и деформационных резервов за счет учета закритической стадии деформирования. Выведены условия реализации полной диаграммы нагружения на макроуровне. С позиций механики закритического деформирования рассмотрены процессы равновесного роста трещин в рамках модели когезионной зоны [4]. Изучено влияние жесткости нагружения на реализацию устойчивого развития трещины. Исследована эволюция зон разупрочнения при растяжении пластин с концентраторами напряжений различной геометрии [5]. Проведено сопоставление результатов численного моделирования данным натурных экспериментов. На основе анализа аналитических и численных решений краевых задач сделан вывод о целесообразности учета процессов накопления повреждений, разупрочнения и разрушения, а также свойств нагружающих систем при прогнозировании механического поведения ответственных конструкций. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00765-П (https://rscf.ru/project/22-19-00765/).

Литература

[1] Feklistova E., Mugatarov A., Wildemann V. Numerical modeling of fracture processes of bodies with stress concentrators under conditions of proportional loading, taking into consideration the statistical distribution of ultimate strength and partial loss of load bearing capacity // Frattura ed Integrita Strutturale. – 2025. – Vol. 19, No. 74. – P. 55-72.

[2] Wildemann V.E., Mugatarov A.I., Tretyakov M.P. The analytical and numerical solution of the problem of stretching a system of parallel elements with random strength characteristics taking into account the postcritical stage of deformation and rigidity of the loading system // Meccanica. – 2022. – Vol. 57, No. 9. – P. 2323-2335.

[3] Вильдеман В.Э., Мугатаров А.И. Устойчивость закритического деформирования при кручении толстостенного цилиндрического тела // Вестник ПНИПУ. Механика. – 2022. – № 4. – С. 135-147.

[4] Вильдеман В.Э., Мугатаров А.И. Моделирование процесса равновесного роста трещины в композитном образце с позиций механики закритического деформирования // Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки. – 2022. – Т. 26, № 1. – С. 48-61.

[5] Вильдеман В.Э., Третьяков М.П., Мугатаров А.И. Моделирование процесса деформирования пластины с концентратором напряжений при учете закритической стадии деформирования материала // Вестник ПНИПУ. Механика. – 2020. – № 3. – С. 32-40.

МЕХАНИЗМ ПЕРЕХОДА ОТ ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНОЙ К СТЕПЕННОЙ РЕОЛОГИИ В КЛЕТКАХ И ИНДЕКС МЕТАСТАТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА

Никитюк А.С.[1], Баяндин Ю.В.[1], Наймарк О.Б.[1]

[1]*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*
nas@icmm.ru, buv@icmm.ru, naimark@icmm.ru

Механическое поведение клеток эукариот демонстрирует два принципиально различных режима деформационного отклика: быстрый экспоненциальный на малых временах и последующий степенной на больших временах. Такая смена режимов отражает последовательность структурных процессов в цитоскелете: первоначальную линейную перестройку филаментов и последующую нелинейную ориентационную кинетику.

На основе статистико-термодинамического подхода предложена модель, описывающая ориентационную деформацию цитоскелета через внутреннюю переменную. Получен вид свободной энергии клетки с учетом активных и пассивных напряжений, а также нелинейных эффектов перестройки сети филаментов цитоскелета. Показано, что экспоненциальный режим сменяется автосолитонной динамикой, приводящей к автомодельному (степенному) закону деформации. Такой переход формирует наблюдаемую экспериментально «двухфазную» реологическую картину.

Модель апробирована на синтетических данных для линий MCF-10A, MCF-7 и MDA-MB-231. Для каждой клетки идентифицированы: модуль упругости E_r, показатель степени функции ползучести β и частота диссипативных процессов f_{diss}, связанная с производством энтропии при переориентации филаментов. Показано, что эти параметры ранжируют фенотипы по-разному, что соответствует известному в литературе «парадоксу жёсткости» опухолевых клеток [1] и делает невозможной классификацию метастатического потенциала по какому-то одному механическому признаку. Для получения устойчивой классификации введён индекс метастатического потенциала *IA*, объединяющий нормированные значения E_r, β и f_{diss}. Показано, что *IA* обеспечивает монотонное ранжирование клеточных линий, согласующееся с известным уровнем их агрессивности.

Полученная модель объясняет природу двух последовательно реализующихся режимов деформационного отклика клетки и механизм перехода между ними, а также формирует основу для разработки механобиологических показателей агрессивности опухолевых клеток.

Исследование выполнено в рамках государственного задания, регистрационный номер темы 124020200116-1.

Литература

[1] M. L. Yubero, P. M. Kosaka, Á. San Paulo, M. Malumbres, M. Calleja, and J. Tamayo Effects of energy metabolism on the mechanical properties of breast cancer cells // Commun. Biol. – 2020. – vol. 3., no. 1 – p. 1-9.

МАСШТАБНО-ИНВАРИАНТНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ РОСТА УСТАЛОСТНОЙ ТРЕЩИНЫ ПРИ СВЕРХМНОГОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ В ТИТАНОВОМ СПЛАВЕ TI-6AL-4V ПОСЛЕ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ НАНОСЕКУНДНЫМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ

Оборин В.А., Банников М.В., Балахнин А.Н., Никитюк А.С., Наймарк О.Б.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
oborin@icmm.ru

В работе исследуются структурно обусловленные закономерности стадий разрушения для прогнозирования долговечности перспективных материалов авиационных двигателей из титанового сплава Ti-6Al-4V в условиях последовательного лазерного и сверхмногоциклового усталостного нагружения. Обработка приповерхностных слоев исследуемых материалов осуществлялась с использованием системы прецизионной лазерной маркировки «Минимаркер 2». В состав установки входит иттербиевый наносекундный импульсный волоконный лазер производства IPG Photonics с длиной волны излучения 1064 нм. Параметры облучения: длительность импульса 200 нс, энергия в импульсе 1 мДж, диаметр пятна сфокусированного на поверхности лазерного пучка ~30 мкм. Обработка поверхности проводилась в сканирующем режиме, луч лазера перемещался по поверхности образца «трек за треком» так, чтобы зоны воздействия (пятна) соприкасались, но не накладывались друг на друга, образец поворачивался с помощью высокоточного вращателя. Обработка осуществлялась через слой воды 2 мм, что позволило создавать ударную волну в обрабатываемом материале, обусловленную образованием плазмы при воздействии лазерного импульса на поверхность образца. В связи с тем, что качество поверхности играет крайне важную роль при сверхмногоцикловых испытаниях, для разделения эффектов «влияние шероховатости» и «лазерная обработка» были испытаны образцы с разным качеством поверхности Ra = 0,25±0,05 мкм и Ra = 0,15±0,05 мкм в исходном состоянии и с обработкой на «Минимаркер 2».

Показано, что лазерная обработка поверхности с последующим шлифованием является перспективным инструментом повышения усталостного ресурса титанового сплава на 9-10% при сверхмногоцикловых испытаниях.

Пространственные структурные масштабы, связанные с различными стадиями перехода от повреждения к разрушению, определялись путем анализа масштабно-инвариантных закономерностей шероховатостей и оценки показателя Херста. Сравнение структурных масштабов образцов, нагруженных при сверхмногоцикловой усталости, показывает значительное уменьшение диапазона пространственных масштабов l_{sc} и L_{pz} (1,6-15,4 мкм), где показатель Херста остается постоянным для образцов, обработанных лазером в центре «рыбий глаз», в отличие от образцов в исходном состоянии (0,7-34,2 мкм). Лазерная обработка поверхности образца приводит к уменьшению пространственных масштабов, на которых показатель Херста остается постоянным, что может затруднить рост усталостных трещин и увеличению долговечности титанового сплава.

Работа выполнена в рамках госзадания, регистрационный номер темы №124020200116-1.

МЕХАНИЗМЫ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ПОЛОИДАЛЬНОЙ КОМПОНЕНТЫ СКОРОСТИ ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВРАЩАЮЩЕГОСЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Озерных В.С., Колесниченко И.В.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
ozernykh.v@icmm.ru

Высокая электропроводность жидких металлов дает возможность эффективного управления потоками в них и, контроля их характеристик с помощью электромагнитных сил. Настоящая работа посвящена исследованию механизмов возникновения вихревого течения в цилиндрической ячейке. На жидкий металл воздействует электромагнитный индуктор, генерирующий вращающиеся магнитные поля.

Математическая модель основана на уравнениях электродинамики сплошных сред, которые описывают процесс взаимодействия электрических и магнитных полей с движущимися электропроводными средами. Одним из основных уравнений является уравнение переноса магнитного поля движущейся электропроводной жидкостью, сформулированное из уравнений Максвелла и закона Ома для движущихся сред. Два других основных уравнения – это уравнение Навье-Стокса со слагаемым, учитывающим действие электромагнитной силы, а также уравнение неразрывности.

В зависимости от расположения индуктора и его размеров возникают принципиально различные картины течения. При центральном расположении индуктора развитие течения происходит следующим образом. За счет раскрутки течения полоидальный вихрь движется по стенкам вверх и вниз ячейки. На пристеночном профиле наблюдается течение от центра к торцам цилиндра. Получившийся крупномасштабный вихрь замыкается вблизи оси цилиндра.

Когда вихрь в пристеночной области достигает торцов – возникает Экмановская подкачка: течение на оси цилиндра от торцов к центру. Далее полоидальное течение разбивает механизм Экмана на два более мелких источника. Расчеты показали, что на оси течение развернулось в противоположную сторону, т.е. к торцам. Далее вихрь более мелкого масштаба, образовавшийся около торцов, смещается по оси цилиндра в сторону центра. У торца снова возникает течение в направлении центра цилиндра.

В конечном счете течение разбивается на множество мелких вихрей. Вихри Тейлора-Гёртлера могут вызывать турбулизацию ламинарного пограничного слоя, интенсифицировать тепло- и массоперенос и существенно влиять на другие свойства течения. Вихри Тейлора-Гёртлера возникают в полоидальной плоскости. Под действием сил Экмана вихри Тейлора-Гёртлера перемещаются к стенкам ячейки, где в конечном счете, рассеиваются.

Работа выполнена в рамках государственного задания «Крупномасштабные течения и теплообмен в проводящей и непроводящей жидкости в условиях мелкомасштабной турбулентности», регистрационный номер темы 124012300246-9.

ЛИНЕЙНАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ МГД-ТЕЧЕНИЯ С НЕОДНОРОДНО РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ПРИМЕСЬЮ

Окатьев Р.С. [1], Фрик П.Г. [2]

[1]*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*
[2]*Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь*
okatev.r@icmm.ru

Рассматривается задача о линейной устойчивости течения вязкой жидкости с неоднородной электропроводностью под действием постоянного однородного внешнего магнитного поля. Магнитное поле направлено перпендикулярно направлению течения. Предполагается, что электропроводность жидкости зависит от распределения некоторой скалярной величины, динамика которой определяется уравнением переноса с учетом диффузии. Зависимость электропроводности от скаляра полагается линейной с коэффициентом $\varkappa$.

Профили скорости основного течения совпадают с полученными ранее для случая «замороженного» распределения скаляра [1]. Особенностью этих профилей скорости является асимметрия, вызванная неоднородностью силы Лоренца, и наличие точек перегиба. При умеренных значениях числа Гартмана (Ha=15) точки перегиба появляются при сколь угодно малых значениях параметра $\varkappa$.

Для рассматриваемого течения выполнено исследование устойчивости относительно малых двумерных нормальных возмущений. В силу справедливости теоремы Сквайра для исследуемого класса течений, рассматриваются плоские возмущения, однородные поперек течения. Обобщенное уравнение Орра-Зоммерфельда решается численно спектральным методом с использованием разложения по полиномам Чебышева. Расчеты проведены при фиксированных значениях числа Гартмана Ha=25, 50, 100 для нескольких различных значений числа Прандтля Pr.

Показано, что при фиксированных значениях чисел Рейнольдса и Гартмана и фиксированных параметрах возмущения увеличение числа Прандтля приводит к увеличению скорости роста наименее устойчивой моды.

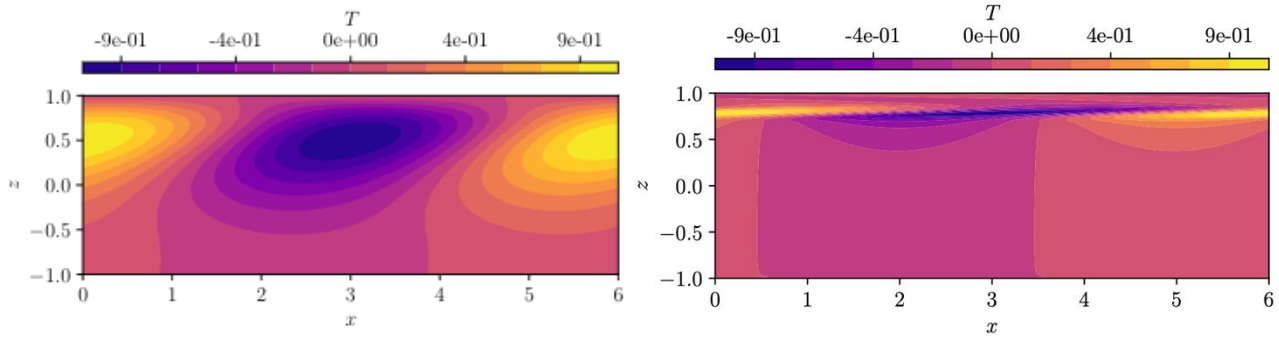


Рисунок 1. Распределение возмущения скаляра, соответствующее наименее устойчивой моде при Ha=50, Re=25000, $\varkappa$=0.7 для значений числа Прандтля $Pr=10^{-3}$ (слева) и Pr=1 (справа)

Литература

[1] Окатьев Р.С., Фрик П.Г., Колесниченко И.В., Течение Гартмана в слое жидкости с пространственно неоднородными свойствами //Вестник ЮУрГУ. Серия «Математика. Механика. Физика». – 2023. – т. 15, № 3. – с. 34-42.

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ГРАДИЕНТНЫХ КОСТНЫХ СКАФФОЛДОВ НА РАЗЛИЧНЫХ ЭТАПАХ БИОРЕЗОРБЦИИ

Павлецов Д.А.[1], Еленская Н.В.[1], Садырин Е.В.[2], Виндокуров И.В.[1], Ташкинов М.А.,[1]

[1] *Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь*
[2] *Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону*
qazvaaz@inbox.ru, n.elenskaya@pstu.ru, esadyrin@donstu.ru, ivv@pstu.ru, m.tashkinov@pstu.ru

Восстановление поврежденной костной ткани является одной из ключевых задач современной медицины. Перспективным решением для ускорения реабилитации и уменьшения операционных вмешательств служат решетчатые структуры (скаффолды) из биосовместимых и биорезорбирующих материалов, имитирующие строение и функции поврежденного фрагмента кости. Критически важным аспектом является прогнозирование скорости изменения механических свойств имплантата в процессе его биодеградации . Деградация скаффолда происходит под воздействием биологической среды, однако еѐ скорость будет зависеть не только от биорезорбируемых свойств материала, но и от архитектуры самого скаффолда [1, 2].

В связи с этим, в рамках данной работы проводилось моделирование механического отклика при различных условиях нагружения образцов скаффолдов на основе трижды периодических минимальных поверхностей (ТПМП) на различных этапах биорезорбции. Оценивалась динамика изменений механических свойств структур с различной топологией пор в зависимости от длительности воздействия среды, приближенной к реальным условиям эксплуатации. Для этого в качестве исходных использовались данные томографии на установке Xradia Versa 520 (РЦКП НОЦ «Материалы» ДГТУ) об архитектуре реальных прототипов скаффолдов, выдержанных в физиологическом растворе в течение 7 и 14 дней при температуре 37°C. Исследовались случаи нагружения на свободное сжатие, растяжение, сдвиг и трехточечный изгиб с учетом изменения упругих свойств материала в процессе деградации. Сопоставление полученных результатов проводилось с результатами моделирования механического отклика для реконструированных образцов скаффолдов без воздействия и численной модели-прототипа. Для образцов без воздействия жидкой среды показано сходство механического отклика с численной моделью-прототипом. Установлено снижение эффективного упругого отклика структур по мере увеличения длительности воздействия среды. При этом для реконструированных моделей выявлено увеличение концентрации напряжений. На основе морфометрического анализа оценивалось эрозионное воздействие жидкой среды на архитектуру скаффолдов. В процессе деградации выявлено эрозионное уменьшение средней толщины стенок скаффолда, однако эти изменения в рамках исследованного временного диапазона носят незначительный характер.

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

Литература

[1] Effect of degradation in polymer scaffolds on mechanical properties: Surface vs. bulk erosion / N. Elenskaya, P. Koryagina, M. Tashkinov, V. V. Silberschmidt // Computers in Biology and Medicine. – 2024. – Vol. 174. – P. 108402.

[2] Experimental Evaluation of the Effect of Degradation on the Mechanical Behavior and Morphometric Characteristics of Functionally Graded Polymer Scaffolds / N. Elenskaya, I. Vindokurov, E. Sadyrin [et al.] // Polymers. – 2024. – Vol. 16. – № 24. – P. 3474

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ТЕОРИИ ЭФФЕКТИВНЫХ СРЕД В ОЦЕНКЕ УПРУГОГО ОТКЛИКА ТРЕЩИНОВАТОГО СИЛЬВИНИТА ПО КТ-ДАННЫМ

Пантелеев И.А.[1], Ложкин Д.В.[1], Барях А.А.[2]

[1]*Институт механики сплошных сред УрО РАН, ПФИЦ УрО РАН, Пермь*
[2]*Горный институт УрО РАН, ПФИЦ УрО РАН, Пермь*
pia@icmm.ru

Настоящая работа посвящена сравнительному анализу различных методов теории эффективных сред для описания деградации упругих модулей образцов красного сильвинита Верхнекамского месторождения солей при циклическом одноосном сжатии с увеличением максимальной нагрузки после каждого цикла. Для характеризации изменения микротрещиноватости в сильвините и оценки ее интегральных параметров (плотности микротрещин и объёмной доли микротрещин) при нагружении сильвинита, а также верификации результатов применения методов теории эффективных сред, использована компьютерная рентгеновская микротомография. Пространственное разрешение томографических изображений составило 12 мкм.

В результате проведенной серии экспериментов выявлена зависимость деформационных характеристик красного сильвинита от максимальной нагрузки в цикле. При нагрузках до 10 МПа касательный модуль деформации изменяется незначительно (≤10%), после цикла с нагрузкой 20 МПа наблюдается его существенная деградация – в среднем на 32%. Анализ КТ-данных образцов сильвинита показал, что образование микротрещин начинается в сильвиновых конгломератах и на границах с галитом, а с ростом нагрузки распространяется и на галитовые конгломераты. Объёмная доля микротрещин с увеличением максимальной нагрузки в цикле растет нелинейно, заметные изменения имеют место после нагрузки 10 МПа. Средняя объёмная пористость микротрещин после завершения испытаний составляет 1.6%. Для оценки плотности микротрещин по КТ-данным предложены два подхода: на основе их максимального размера и на основе радиуса монетообразных трещин, эквивалентных по объёму и площади боковой поверхности. Показано, что до максимальной нагрузки 10 МПа оба подхода дают незначительный рост плотности микротрещин. Далее, при увеличении максимальной нагрузки в цикле, плотность микротрещин, рассчитанная по первому способу, растет квазилинейно, тогда как по второму способу – нелинейно. После десяти циклов нагружения максимальные значения средней плотности микротрещин составили 0.45 и 1.2 соответственно.

Для описания зависимости эффективного модуля Юнга от максимальной нагрузки в цикле были апробированы следующие методы теории эффективных сред: метод Мори–Танака, дифференциальный метод эффективной среды и метод самосогласования. Установлено, что дифференциальный метод эффективной среды и метод самосогласования с оценкой плотности трещин по первому способу дают заниженные оценки среднего эффективного нормированного модуля Юнга, начиная уже с умеренных нагрузок, а метод Мори–Танака – завышенные оценки. Показано, что метод самосогласования, использующий для оценки плотности трещин модель эквивалентных монетообразных трещин, даёт приемлемые результаты для прогноза эффективного модуля Юнга при плотности микротрещин до 0.5.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания (рег. номер: 124031800058-4).

ГЕНЕРАЦИЯ ОСРЕДНЕННОГО ТЕЧЕНИЯ БЕГУЩЕЙ ПОВЕРХНОСТНОЙ ВОЛНОЙ

Панькова Н.В., Кетов А.И., Мизёв А.И.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
pankova.n@icmm.ru

Известно, что распространение бегущей поверхностной волны приводит к формированию осредненного течения в приповерхностном слое в направлении движения волны [1,2]. Однако результаты экспериментальных исследований демонстрируют более сложные структуры течения [3,4], не согласующиеся с предсказаниями теории, что требует дополнительных лабораторных исследований. В докладе данная задача рассмотрена на примере волны, генерируемой полупогруженной сферой, совершающей вертикальные колебания. Рассмотрены вопросы конфигурации и устойчивости поверхностной волны, а также структура генерируемого волной осредненного течения.

Эксперименты проведены в стеклянной цилиндрической кювете диаметром 12.5 см или 19.5 см и высотой 7.5 см, заполненной слоем изопропилового спирта толщиной 4.5 см. В центре поверхности помещалась полупогруженная сфера диаметром 2.85 см или 4.00 см, совершающая колебания в вертикальном направлении в диапазоне частот (20÷60) Гц с амплитудой до 0.085 см. PIV метод использован для измерения поля скорости. Для восстановления мгновенного профиля свободной поверхности жидкости использован синтетический шлирен-метод, основанный на наблюдении случайного узора через слой жидкости с деформированной границей раздела.

Обнаружено, что круговая волна, генерируемая колебаниями сферы в области малых амплитуд, теряет осевую симметрию при достижении порогового значения амплитуды с формированием более сложной конфигурации, представляющей собой суперпозицию стоячей азимутальной волны и бегущей радиальной. Показано, что порог зависит как от размеров сферы, так и диаметра кюветы, что не укладывается в традиционное объяснение такого перехода, как проявления модуляционной неустойчивости [5]. На основании специально поставленных экспериментов предложен альтернативный механизм явления. Смена конфигурации волны приводит к изменению структуры осредненного течения, интенсивность которого становится промодулированной в азимутальном направлении при сохранении радиального направления, что вполне укладывается в рамки существующих теорий. В докладе даны объяснения существующим расхождениям с результатами более ранних экспериментов и обоснована корректная постановка экспериментов.

Литература

[1] Stokes G.G. On the theory of oscillatory waves // Trans. Cam. Philos. Soc. – 1847. – V. 8. – P. 441-455.

[2] Longuet-Higgins M. S. Mass transport in water waves // Phil. Trans. Royal Soc. Series A, Mathematical and Physical Sciences. – 1953. – V. 245 (903). – P. 535-581.

[3] Taneda S. Visual observations of the flow around a half-submerged oscillating sphere // Journal of Fluid Mechanics. – 1991, Vol. 227. – P. 193-209.

[4] Punzmann H. et al. Generation and reversal of surface flows by propagating waves // Nature Physics. – 2014. – V. 10 (9). – P. 658-663.

[5] Benjamin T. B., Feir J. E. The disintegration of wave trains on deep water. Part 1. Theory // Journal of Fluid Mechanics. – 1967. – V. 27, № 3. – P. 417–430.

СТОХАСТИЧЕСКОЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ ВОЗБУЖДЕНИЕ ТЕПЛОВОЙ КОНВЕКЦИИ В СЛОЕ ПОРИСТОЙ СРЕДЫ

Пермякова Э.В. [1], Голдобин Д.С. [1], Тюлькина И.В.

[1]*Институт Механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*
[2]*Пермский государственный технический университет, Пермь*
irinatiulkina95@gmail.com, denis.goldobin@gmail.com

Проблема случайного параметрического возбуждения (или стохастической устойчивости) в механике жидкости не так широко рассматривается, как ее детерминированный аналог — случай периодической модуляции [1]. Эта проблема представляет интерес в связи с процессами, протекающими в системах с низкой гравитацией: для них критически важно учитывать влияние флуктуаций остаточной силы тяжести. Ранее авторами было исследовано влияния случайных вибраций на конвективную неустойчивость неизотермического слоя жидкости [2, 3].

В данной работе рассматривается проблема стохастического параметрического возбуждения свободной тепловой конвекции жидкости, насыщающей бесконечный горизонтальный слой или прямоугольную ячейку пористой среды, при случайной модуляции силы тяжести. Используемая математическая формулировка позволяет исследовать случаи подогрева как снизу, так и сверху, а также случай условий микрогравитации. Для системы получены уравнения стохастической динамики амплитуды малых возмущений полей температуры и функции тока. Для этих уравнений выводятся условия роста среднеквадратичных значений; эти условия используются в качестве критерия возбуждения конвективных движений в системе. Проверено, что найденные моды самого быстрого роста среднеквадратичных значений при всех значениях параметров лежат в области фазового пространства, имеющей физический смысл. Выведено, что тепловой поток, характеризуемый числом Нуссельта, связан со среднеквадратичным значением возмущений температуры. Из этого следует, что порог стохастического возбуждения среднеквадратичных моментов определяет порог возбуждения конвективного теплопереноса.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ(тема № 124021600038-9).

Литература

[1] Ibrahim R. A. Recent Advances in Physics of Fluid Parametric Sloshing and Related Problems // Journal of Fluids Engineering. – 2015. – Vol. 137, N. 9. – P. 090801.

[2] Пермякова Э. В., Голдобин Д. С. Стохастическое параметрическое возбуждение конвекции Рэлея-Бенара // Вестник Пермского университета. Физика. – 2022. – № 4. – С. 34–44.

[3] Permyakova E. V., Goldobin D. S. Stochastic parametric excitation of convective heat transfer // Philosophical Transactions of the Royal Society A. – 2023. – Vol. 381. – P. 20220084

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ РАСЧЕТА КЛАССИЧЕСКИХ И НЕЙРОСЕТЕВЫХ РЕШЕНИЙ В ЗАДАЧЕ О ПЛОСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Петухов Д.А. [1], Фролов М.Е. [1]

[1]*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург*

d_a_petukhov@mail.ru , frolov_me@spbstu.ru

Многие десятилетия одним из мощных и универсальных методов решения инженерных задач остается метод конечных элементов (МКЭ). Тем не менее, развитие технологий искусственного интеллекта привело к появлению новых численных методов на основе нейронных сетей, которые носят аббревиатуру PINN (physics-informed neural networks). Хотя иногда они показывают результаты, сопоставимые с классическими подходами (см., например, [1]), методы недостаточно изучены и теоретически обоснованы с точки зрения сходимости. Это делает особенно актуальным вопрос оценки того, насколько PINN-решение отклоняется от точного в рамках рассматриваемой математической модели.

Для оценки точности PINN- или МКЭ-решения задач линейной теории упругости удобно использовать апостериорную оценку функционального типа, предложенную в монографии С.И. Репина [2]. Важно отметить, что для применения этой оценки приближенное решение должно точно удовлетворять граничному условию типа Дирихле, что не выполняется автоматически при использовании PINN. В данной работе для выполнения этого условия конечное решение ищется в виде произведения функции, полученной с помощью нейронной сети, и специальной функции (*bubble*-функции), которая равна нулю на границе типа Дирихле и строго больше нуля внутри расчетной области. В областях с нетривиальной геометрией аналитическое построение *bubble*-функции целесообразно заменить на численный расчет, например, путем решения уравнения Пуассона с постоянной правой частью при помощи МКЭ с кусочно-линейной аппроксимацией. Полученная таким образом функция, хоть она и удовлетворяет описанным выше критериям, не имеет непрерывных первых и вторых производных. Для применения PINN эти производные в узлах сетки могут быть получены численно путем процедуры пост-обработки (осреднения). В данной работе рассмотрено две процедуры осреднения по элементам: без учета площадей и с весами в зависимости от площади элементов. Приведено сравнение результатов МКЭ и PINN при численном и аналитическом задании *bubble*-функции. Исследование развивает недавнюю работу [3] и статью [4].

Литература

[1] Raissi M., Perdikaris P., Karniadakis G.E., Physics-informed neural networks: a deep learning framework for solving forward and inverse problems involving nonlinear partial differential equations // Journal of Computational Physics. – 2019. – т. 378. – с. 686-707.

[2] Repin S.I. A posteriori estimates for partial differential equations – Berlin, Walter de Gruyter, 2008.

[3] Петухов Д.А., Фролов М.Е. Апостериорный контроль точности решений плоских задач линейной теории упругости, полученных с помощью нейронных сетей // Материалы конференции «Актуальные проблемы механики сплошной среды — 2025» – Казань. – 2025. – с. 471-475.

[4] Петухов Д.А., Фролов М.Е., Апостериорный контроль погрешности нейросетевых решений плоских задач линейной теории упругости // Вестник СПбГУ. Математика. Механика. Астрономия. – 2026. – вып. 3. (принята к публикации).

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПАСНЫХ СЕЧЕНИЙ ВАЛА РОТОРА ТУРБИНЫ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ

Пешина Е. А., Кузнецова Е. В.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь
bella.peshina@yandex.ru, kuznetsovae@pstu.ru

В условиях стремительного прогресса авиастроения и энергетического машиностроения вопросы обеспечения надежности и увеличения ресурса основных узлов газотурбинных установок приобретают первостепенное значение. В работе исследуется напряженное состояние вала ротора турбины низкого давления турбореактивного двигателя в зависимости от различных параметров нагружения [1,2].

На первом этапе необходимо было выполнить аналитический расчет прочностных характеристик вала, определить зоны концентрации напряжений и найти запасы прочности вала при воздействии нагрузок, имитирующих реальные условия эксплуатации. Далее в среде ANSYS проводилось компьютерное моделирование вала, где был выполнен детальный анализ влияния каждого типа нагружения на распределение напряжений в сечениях с максимальными напряжениями. При расчете были учтены особенности силового воздействия на вал, влияние инерционных сил и возможные перегрузки в полетных режимах [3].

В результате аналитического и численного решения были установлены участки с максимальными напряжениями. Наиболее критическими оказались три поперечных сечения, которые впоследствии были подвергнуты углубленному численному анализу. Моделирование поведения вала под нагрузкой осуществлялось с использованием инструментов конечно-элементного анализа [4]. На основе созданной геометрической модели, с учетом заданных начальных и граничных параметров, были получены значения напряжений, возникающих при различных рабочих режимах. При этом моделировалось совместное действие осевых усилий, центробежных сил и моментов от гироскопического эффекта.

Сопоставление результатов, полученных аналитически и численно показало различие в 4 %, что отражает достаточную точность расчетов. Наиболее нагруженные сечения при оценке степени воздействия каждого фактора нагружения на распределения деформаций и напряжений обнаружились в зонах действия крутящего момента и гироскопических сил.

Таким образом, представленное в работе исследование показало необходимость проведения комплексных расчетов с целью выявления влияния видов нагружения на распределение напряженного состояния в сечениях вала турбины, а численное моделирование позволило ранжировать уровень этого влияния и сопоставить результаты и показатели прочности с нормативными требованиями, которые в настоящее время предъявляют в соответствии с отраслевыми стандартами к заданным конструкционным материалам и деталям газотурбинных двигателей.

Литература

[1] Конструкция и проектирование авиационных газотурбинных двигателей: Учебник для студентов вузов по специальности «Авиационные двигатели и энергетические установки»/С. А. Вьюнов, Ю. И. Гусев, А. В. Карпов и др.; под общ. ред. Д. В. Хронина. – М.: Машиностроение, 1989. – 368 с.
[2] Скубачевский Е. С. Авиационные газотурбинные двигатели, конструкция и расчет деталей. М. «Машиностроение», 1974. – 520 с.
[3] Биргер И. А., Шорр, Б. Ф., Иосилевич, Г. Б. Расчет на прочность деталей машин: справочник. М.: Машиностроение, 1972. – 312 с
[4] Иноземцев В. В., Сандрацкий, Н. И. Газотурбинные двигатели. М.: Энергия, 1985. – 256 с.

ОПТИМИЗАЦИЯ МЕХАНИЧЕСКОГО ОТКЛИКА ТРИЖДЫ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ПОРИСТОЙ СТРУКТУРЫ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОСТНЫХ ИМПЛАНТАТОВ

Пирогова Ю.В. [1], Затонская В.М. [1], Еленская Н.В. [1], Ташкинов М.А. [1]

[1] *Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь*
yu.pirogova@pstu.ru

Одной из актуальных задач регенеративной медицины является создание решетчатых пористых структур для замещения костной ткани (скаффолдов). Для успешной интеграции и дальнейшей эксплуатации необходимо чтобы скаффолд имитировал естественную пористую структуру замещаемой кости. Таким образом, трехмерная структура скаффолда должна обладать схожим механическим откликом, а также биологическими характеристиками. Структуры на основе трижды периодических минимальных поверхностей (ТПМП) являются перспективными для применения в качестве скаффолдов благодаря сочетания высокой удельной площади поверхности и несущей способности [1].

Данное исследование направлено на получение оптимального дизайна микроструктуры ТПМП с требуемым механическим откликом. Для решения поставленной задачи оптимизации используется генетический алгоритм. Таким образом, целевой функцией является различие между распределениями напряжений, возникающих в прототипе и костной ткани, а параметрами управления являются геометрические параметры структуры ТПМП.

С помощью оптимизации параметров были получены структуры ТПМП, построенные на основе поверхности Фишера-Коха, гироидной и алмазной поверхностей. Анализ механического поведения проведен с помощью конечно-элементного анализа с применением статистических методов оценки случайных величин. Степень различия механического отклика с костной тканью оптимизированных структур варьируется от 4.88% до 12.10%. Однако, при разработке скаффолдов нельзя ограничиваться только механическими свойствами. Морфометрические характеристики определяют степень заселения клетками и их жизнеспособности, что напрямую влияет на регенерацию. Аналогично стандартным параметрам микроструктуры костной ткани для оценки морфометрии спроектированных структур были выбраны толщина стенки структуры, средняя толщина пор и значение удельной площади поверхности.

Полученные результаты могут быть использованы для создания персонализированных костных имплантатов с контролируемыми механическими свойствами, которые будут способствовать качественной регенерации костной ткани и восстановлению функций опорно-двигательного аппарата пациентов.

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

Литература

[1] Y. Pirogova, M. Tashkinov, I. Vindokurov, N. Elenskaya, A. Tarasova, A. Shalimov, V. V Silberschmidt Design of lattice structures for trabecular-bone scaffolds: comparative analysis of morphology and compressive mechanical behaviour // Biomechanics and Modeling in Mechanobiology. – 2025. – т. 24, № 5. – с. 1535–1564.

ВЛИЯНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ НА ПРОЦЕСС ЗАРОЖДЕНИЯ И СКОРОСТЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УСТАЛОСТНЫХ ТРЕЩИН В МЕТАЛЛАХ

Плехов М.А. [1], Плехов О.А. [2]

[1]*Пермский государственный технический университет, Пермь*

[2]*Пермский федеральный исследовательский центр УрО РАН, Пермь*

mishaplehov2468@mail.ru

В настоящее время вопрос о страгивании трещины в металлах и сплавах активно изучается, поскольку он играет ключевую роль в обеспечении безопасности и надёжности конструкций. В соответствии с современными представления и механики разрушения практически во всех инженерных системах в процессе эксплуатации образуются трещины разного характера. Изучение трещин и их поведения позволяет определить долговечность системы.

Одной из современных гипотез механики усталостного разрушения является взаимно-однозначная связь между остаточными напряжениями в вершине трещины и предельного размаха коэффициента интенсивности напряжений [1]. В работе представлена методика для получения остаточного напряжения на фронте трещины после заданной истории нагружения, определены величины предельного размаха коэффициента интенсивности напряжений, а также построены кинетическая диаграмма усталостного разрушения и кривая роста трещины [2].

Объектом исследования данной работы являются усталостные трещины в металлах. Предметом исследования выступает влияние остаточных напряжений на кинетическая диаграмма усталостного разрушения. В качестве основного метода в данной задаче использовался численно-аналитический метод с построением моделей: деформации [3], нагружения, коэффициента интенсивности напряжений, влияния остаточных напряжений на предельный размах коэффициента интенсивности напряжений, роста усталостной трещины, с последующим построением кривой роста трещины.

Таким образом, в работе представлен алгоритм моделирования, позволяющий построить кривую роста трещины для алюминиевого сплава 2024-Т3 с учетом истории нагружения. Представленная модель позволяет оценить влияние параметров истории нагружения на скорость роста трещины. Результаты расчета в условиях разных историй регулярного нагружения показали, что наличие перегрузки может как ускорить, так и замедлить рост трещины. После анализа скорости роста трещины можно сделать вывод, что при наличии перегрузки до зоны пластической деформации скорость трещины замедляется.

Литература

[1] Сундер Р. Остаточные напряжения у вершины трещины и пороговая интенсивность напряжений при росте усталостных трещин // International Journal of Fatigue. – 2007. – Т. 29. – С. 1681–1696.

[2] Рамберг В., Осгуд В.Р. Описание диаграмм напряжение–деформация с помощью трёх параметров. – Техническая записка № 902. – Вашингтон: Национальный консультативный комитет по аэронавтике (NACA), 1943. – 19 с.

[3] Лоусон Л., Дафлоу Ж., Ван Хаут П., Говарт Л., Ван Хек Х. Поведение материалов при усталости: подход к проектированию // International Journal of Fatigue. – 1999. – Т. 21. – С. S15–S34.

ИССЛЕДОВАНИЕ МАССОПЕРЕНОСА ФЛУОРЕСЦЕНТНОГО КРАСИТЕЛЯ В ПОРИСТЫХ СРЕДАХ ДЛЯ ОЦЕНКИ ДИФФУЗИОННОЙ ИЗВИЛИСТОСТИ

Полежаев Д.А. [1], Терёхина А.В. [1]

[1]*Пермский государственный гуманитарно-педагогический университет, Пермь*
polezhaev@pspu.ru, teryokhina_av@pspu.ru

В работе представлена и апробирована новая методика определения диффузионной извилистости пористой среды τ, основанная на сравнении коэффициента молекулярной диффузии растворенного вещества в свободной жидкости с коэффициентом диффузии этого же вещества в жидкости, заполняющей поровое пространство. В отличие от свободной жидкости в пористой среде перенос растворенного вещества протекает в условиях геометрических ограничений, так что молекулы вынуждены многократно огибать матрицу пористой среды, вследствие чего длина их траекторий увеличивается. Характеристикой, описывающей влияние матрицы на транспортные свойства вещества, является извилистость. При теоретической оценке извилистости часто используются модели пористых сред, матрицы которых состоят из квадратов, шариков [1] или кубиков [2]. В настоящем экспериментальном исследовании рассматривается модель пористой среды, представляющей собой вертикальный прямоугольный канал, заполненный одинаковыми шариками.

Эксперименты проводятся с шариками диаметрами $d_{s1} = 1.98 \pm 0.01$ мм, $d_{s2} = 3.98 \pm 0.01$ мм или $d_{s3} = 3.00 \pm 0.01$ мм. В экспериментах с шариками диаметрами d_{s2} и d_{s3} толщина канала равна диаметру шариков, и пористость P канала, заполненного такими шариками, равна 0.41 ± 0.01. Эксперименты с шариками диаметром d_{s1} эксперименты проводятся в каналах толщиной $d = 2.0$, 2.2, 2.5 и 2.7 мм, что позволяет варьировать пористость моделей пористой среды в пределах от 0.40 до 0.55.

При проведении эксперимента нижняя половина канала заполняется водным раствором флуоресцентного красителя Родамина Б, а верхняя – чистой водой. В результате диффузии Родамин Б переходит из нижней области в верхнюю, и на межфазной границе формируется диффузионная зона, в пределах которой концентрация Родамина Б изменяется от 0 до 1. Темп изменения ширины диффузионной зоны определяет коэффициент диффузии красителя в пористой среде и позволяет рассчитать диффузионную извилистость. Экспериментальные результаты представлены в виде зависимости $\tau(P)$. Полученные данные сравниваются с теоретическими предсказаниями для пористых сред со скелетом, состоящим из шариков и экспериментальными работами других авторов.

Исследования выполнены в рамках государственного задания Министерства Просвещения Российской Федерации, регистрационный номер 1025032600036-8-2.3.2.

Литература

[1] Zuo X. et al. Geometrical model for tortuosity of transport paths in hardened cement pastes // Adv. Cem. Res. 2012. V. 24 (3). P. 145 – 154.

[2] Ahmadi M.M., Mohammadi S., Nemati Hayati A. Analytical derivation of tortuosity and permeability of monosized spheres: A volume averaging approach // Phys. Rev. E. 2011. V. 83. P. 026312.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПЕРЕМЕШИВАЮЩЕГО МГД-ТЕЧЕНИЯ И ЗАТОПЛЕННОГО СТРУЙНОГО ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА

Полуянов А.О. [1], Колесниченко И.В. [1]

[1]*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*
poluyanov.a@icmm.ru, kiv@icmm.ru

Возможность управления потоками проводящей жидкости внешними электромагнитными полями является одной из важных как научных, так и прикладных задач. В реальных установках скорости течений достаточно велики, такие течения являются турбулентными. Известно, что турбулентность приводит к интенсивному перемешиванию течений. Тем не менее, для управления этим процессом рассматривают различные внешние бесконтактные методы воздействия, как правило, связанные с внешними электромагнитными полями (см работы [1-3], и ссылки в них).

В данной работе с помощью численного моделирования рассматривается взаимодействие затопленного струйного течения жидкого металла (натрия) и течения, возбуждаемого внешним обжимающим электромагнитным воздействием. Математическая модель сформулирована на основе уравнений магнитной гидродинамики в электродинамическом приближении, которая описывает взаимодействие движущейся электропроводной среды с магнитным полем. В виду малости магнитного числа Рейнольдса, задача электродинамики по нахождению распределения по объему ячейки электромагнитной силы решается отдельно от задачи гидродинамики по нахождению поля скорости.

На основе полученных результатов моделирования, рассматриваемое обжимающее воздействие существенным образом влияет на свойства течения в исследуемом цилиндрическом объеме. При увеличении внешнего воздействия, в потоке формируются вторичные полоидальные течения, которые существенным образом могут влиять на гомогенизацию и транзитную скорость потока. При этом, внешнее электромагнитное воздействие на поток с затопленной струей позволяет эффективно управлять характеристиками данного потока. В работе также показано, что возможная генерация азимутального вращения течения под действием внешнего электромагнитного поля слабо влияет на полученные результаты. Результаты данного численного исследования позволят подобрать параметры, необходимые при разработке электромагнитных аппаратов для воздействия на неизотермический поток при смешении разнотемпературных жидкостей и снижению пульсаций температуры.

Литература

[1] Golbraikh E., Kapusta A., Kapusta B. et al, MHD processes arising in melts under the action of superposition of two frequency-modulated rotating magnetic fields //Magnetohydrodynamics. – 2009. – Vol. 45, No. 1. – pp. 73-80.

[2] Listratov Y.I., Razuvanov N.G., Belyaev I.A. et al, Dynamics of submerged jet flow in a pipe in a longitudinal magnetic field //Computational Continuum Mechanics. – 2022. – Vol. 15, No. 4. – pp. 480-494.

[3] Mullyadzhanov R.I., Yavorsky N.I. Submerged jet of a conducting fluid in the presence of the magnetic field // Siberian Journal of Physics. – 2012. – Vol. 7, No. 2. – pp. 25-38.

НЕЛИНЕЙНАЯ ГИПЕРБОЛИЧЕСКАЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ В КОМПОЗИТАХ ПРИ ИНТЕНСИВНОМ НАГРЕВЕ

Пьянков Г.А. [1], Баяндин Ю.В. [1], Наймарк О.Б. [1]

[1]*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*
Riperrus@yandex.ru, buv@icmm.ru, naimark@icmm.ru

Композиционные углерод-углеродные материалы широко применяются в авиационно-космической технике, энергетике, ракетных системах, элементах тепловой защиты, тормозных системах, энергетических установках и других конструкциях, работающих в условиях интенсивного нагрева. Выраженная анизотропия свойств композита позволяет создавать ответственные конструкции под нужные эксплуатационные условия.

Во многих практических ситуациях эксплуатация таких материалов сопровождается высокоинтенсивным нагревом, длящимся от микро- до миллисекунд. В этих условиях формируются высокие температурные градиенты и существенно нестационарные поля температуры. При столь малых временах теплового воздействия, применения закона теплопроводности Фурье может искажать описание протекания тепловых процессов, так как предположение о бесконечной скорости распространения тепла в этих условиях может не выполняться. Поэтому для адекватного моделирования интенсивного нагрева требуется использование гиперболических моделей теплопроводности, в частности закона Каттанео–Вернотта [1], учитывающего конечную скорость распространения тепловых возмущений.

Вместе с этим в условиях высокоинтенсивного нагрева большое влияние оказывают эффекты термоупругости [2], быстрое изменение температуры приводит к возникновению значительных термических деформаций и напряжений, которые влияют на температурное поле. На границе материла, которая подвергается тепловому воздействию, происходит значительное изменение температуры и, следовательно, тепловых свойств материала (коэффициенты теплового расширения, теплопроводности, теплоёмкости) [3]. Нелинейность свойств приводит к изменению характера теплопереноса, усилению температурных градиентов и большей локализации тепла.

Целью работы является исследование возникновения или отсутствие отрыва упругих волн от теплового фронта в связанной термоупругой модели интенсивного нагрева изотропных и анизотропных углерод-углеродных композитов с учётом конечной скорости распространения тепла. Предложена математическая модель связанной термоупругости, с использованием гиперболического уравнения теплопроводности, при учёте нелинейной зависимости тепловых свойств от температуры. По результатам численного моделирования было установлено, что в исследуемом материале как в изотропном, так и в анизотропном, волна напряжений не отрывается от фронта теплового фронта.

Литература

[1] Жмакин А. И. Теплопроводность за пределами закона Фурье //Журнал технической физики. – 2021. – Т. 91. – №. 1. – с. 5-25.

[2] Баяндин Ю. В. О верификации и валидации методов численного моделирования термоупругого деформирования твердого тела //Вестник Пермского федерального исследовательского центра. – 2025. – №. 1. – с. 6-17.

[3] Ruan C. et al. Prediction of thermo-mechanical properties of 8-Harness Satin-Woven C/C composites by asymptotic homogenization //Materials. – 2024. – Т. 17. – №. 6. – с. 1284.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СТРАТЕГИИ УКЛАДКИ СЛОЕВ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ИЗДЕЛИЙ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ МЕТОДОМ МНОГООСЕВОЙ И ТРАДИЦИОННОЙ FDM-ПЕЧАТИ

Пятковский Н.В. [1], Ташкинов М.А. [1]

[1]*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь*
n.piatkovsky@pstu.ru

Технология послойного наплавления (FDM) является наиболее распространённым методом аддитивного производства полимерных деталей. Однако, изделия, изготовленные данным методом, обладают анизотропией механических свойств: прочность в направлении оси Z (перпендикулярно плоскости слоёв) значительно уступает прочности в плоскости XY. Это обусловлено недостаточной адгезией между соседними слоями и наличием межслойных пустот. Указанное ограничение существенно сужает область применения FDM-печатных изделий в нагруженных конструкциях.

Многоосевая печать представляет собой перспективный подход к преодолению данного ограничения. В отличие от традиционной 3-х осевой печати, где материал укладывается плоскими горизонтальными слоями, многоосевая печать позволяет формировать криволинейные слои, ориентированные вдоль направлений максимальных главных напряжений. При этом осевое направление филамента совпадает с направлением наибольших нагрузок, что обеспечивает передачу усилий преимущественно через тело филамента, а не через ослабленные межслойные границы.

В данной работе проведено экспериментальное сравнение механических характеристик образцов, изготовленных двумя способами: традиционной 3-х осевой FDM-печатью и многоосевой печатью с криволинейной укладкой слоев. Исследованы несколько вариантов геометрии образцов, специально разработанных для демонстрации преимуществ многоосевого подхода: L-образный кронштейн, волновая пружина, Y-образный вилочный кронштейн. Выбранные геометрии характеризуются наличием криволинейных поверхностей и зон концентрации напряжений, где ориентация межслойных границ критически влияет на несущую способность. Образцы изготовлены из ABS с идентичными параметрами печати (высота слоя, скорость, температура) для обеспечения корректности сравнения.

Результаты экспериментов подтверждают, что образцы, изготовленные многоосевой печатью, демонстрируют повышение несущей способности по сравнению с аналогами, напечатанными традиционным способом. Проведённое исследование указывает на перспективность многоосевой FDM-печати для изготовления нагруженных конструктивных элементов и обосновывает целесообразность дальнейшего развития данного направления аддитивного производства.

Исследование выполнено в Пермском национальном исследовательском политехническом университете при поддержке Российского научного фонда (проект № 22-79-10350-П).

Всероссийская конференция «Механика в новых материалах, конструкциях, технологиях»
25-27 марта 2026 г., Пермь

ВЛИЯНИЕ ГРАФИТАЦИИ НА СТРУКТУРНЫЕ ПАРАМЕТРЫ И ПОРИСТОСТЬ УУКМ ДЛЯ МЕДИЦИНСКИХ ИМПЛАНТАТОВ

Разумовский Е.С.[1], Чекалкин А.А.[2]

[1]*АО «Уральский научно-исследовательский институт композиционных материалов», Пермь*
[2]*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь*
erazumovskij@yandex.ru, a.a.chekalkin@yandex.ru

Исследованы термодинамические процессы в материале имплантата - углерод-углеродном композиционном материале (далее – УУКМ) с пиролитической углеродной матрицей, при графитации. Графитация УУКМ приводит к минимизации свободной энергии Гиббса. Необходимость проведения графитации для УУКМ заключается в снижении вероятности реализации такого фактора в пиролитической углеродной матрице, как инициация и накопление повреждений. Данный фактор связан с сильно флуктуирующими полями напряжений и деформаций в зернах поликристаллической матрицы. В силу сильно стохастической структуры поликристалла пироуглерода при определенной, так называемой экстремальной ориентации кристаллографических осей зёрен, в кристаллитах координационных сфер взаимодействия могут возникать напряжения существенно превышающие соответствующие пределы прочности в зерна в кристаллографической системе координат. Множественность данного явления приводит на макроскопическом уровне к изменению физико-механических характеристик имплантата из УУКМ [1].

Графитация приводит к повышению упорядоченности УУКМ, которая характеризуется параметром степень графитации [2]. Также происходит процесс коалесценции малых пор материала и частичной аннигиляции пор, так как процесс является энергетически выгодным. Однако для имплантата из УУКМ одним из ключевых факторов является величина открытой пористости, а также средний размер пор, который должен обеспечивать качественную остеоинтеграцию, а также фиксацию белковых молекул на первых стадиях установки имплантата. Поэтому, поиск баланса температуры на основе теоретико-экспериментальных исследований, который, с одной стороны обеспечивает снижение реализации факторов накопления повреждений и при этом не происходит существенного снижения пористости и температурой, при которой происходит существенный рост упорядоченности и падение пористости, является ключевым элементом исследования.

В результате исследования было определено, что требуемая температура при которой происходят предрекристаллизационные процессы и не происходит существенного снижения пористости составляет 1800^{o}C. Движущими силами в процессе стремления системы к минимуму энергии Гиббса является самодиффузия. Исследование структуры УУКМ методами компьютерной томографии и РСА показывают, что снижение общей и открытой пористости составляет от 9 до 17%, а рост показателей текстурированности – межплоскостное расстояние, размеры областей когерентного рассеяния - 1,4% и 37,1% соответственно. Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации на проведение фундаментальных научных исследований (проект FSNM-2026-0006).

Литература

[1] Razumovskii E.S., Shavshukov V.E. A change in the bearing capacity of the hip joint Endoprosthesis as a result of damage to the polycrystalline matrix of the C/C composite // Procedia Structural Integrity. – 2024. – Vol. 65. - pp. 191-199.

[2] Mantell, C. L. (1968). Carbon and Graphite Handbook. New York: John Wiley & Sons, Inc.

СТРУЙНОЕ ИМПУЛЬСНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ В ПОЛОСТЬ КАНАЛА С ЖИДКИМ МЕТАЛЛОМ В ПОПЕРЕЧНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Рахимов Р.Ф. [1], Лоцманов М.В. [1], Беляев И.А. [1]

[1]*Объединенный институт высоких температур РАН, Москва*
rakhimovrf@ihed.ras.ru, bia@ihed.ras.ru

В термоядерных установках возникновение импульсных воздействий связано с процессами срыва плазмы, которые приводят к быстрым изменениям магнитного поля и индуцированию вихревых токов. Экспериментальное воспроизведение условий, описанных в работе [1], требует тщательной подготовки и создания стенда с большим запасом электрической энергии для генерации импульсных электромагнитных воздействий. В численных исследованиях импульсное магнитное поле в полости с жидким металлом вызывает движение электропроводящего теплоносителя. В связи с этим в работе приводится постановка экспериментов, моделирующих быстропротекающие процессы с помощью приближенного метода — создания струйного течения жидкого металла за счет впрыска в канал порции воздуха под постоянным давлением.

Экспериментальный стенд состоит из опытного участка, изготовленного из органического стекла с внутренними размерами 40x40x200 мм. На входе установлен формирователь струйного течения с внутренним диаметром 4 мм, на выходе — труба с внутренним диаметром 18 мм. Как уже упоминалось ранее, на входе в канал подается порция воздуха с постоянным давлением и объемом, что позволяет собирать статистику влияния поперечного магнитного поля на импульсное движение электропроводящей среды. С помощью созданной экспериментальной установки также удалось провести исследования при наличии свободной поверхности, моделируя движение двухфазного теплоносителя.

Одной из проблем при исследовании импульсного струйного течения является выбор методики измерения локальных характеристик. При стационарном течении [2] измерение скорости осуществлялось с помощью термопар корреляционного датчика, что требует подвода тепла. В случае быстропротекающего воздействия на покоящуюся жидкость нагрев усложнит эксперимент и не позволит получить воспроизводимые статистические данные. Опираясь на результаты работы [3] по поиску датчиков давления, способных стабильно функционировать в стационарном магнитном поле, была проверена работоспособность пьезоэлектрического датчика: его испытали на экспериментальном стенде в процессе исследования импульсного струйного течения.

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда 25-19-00642 "МГД течения при быстро меняющихся сильных магнитных полях и электрических пробоях в жидкость"

Литература

[1] Smolyanov I., Zikanov O. Exploratory study of liquid-metal response to rapid variation of applied magnetic field // Physical Review E. – 2025. – Т. 111. – №. 6. – С. 065104.

[2] Belyaev I. A., Mironov I. S., Luchinkin N. A., Listratov Y. I., Kolesnikov Y. B., Krasnov D., Zikanov O., Molokov S. Experimental study of submerged liquid metal jet in a rectangular duct in a transverse magnetic field // Journal of Fluid Mechanics. – 2022. – Т. 953. – С. A10.

[3] Лоцманов М. В., Рахимов Р. Ф., Балабаев Н. Е., Перцев И. П., Беляев И. А. Методы измерения давления в импульсном магнитном поле // Уральский молодежный теплофизический семинар: тезисы докладов. – 2025. – Т. 20. – С. 19.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ НАМАГНИЧИВАНИЯ И ПЕРЕОРИЕНТАЦИИ МАРТЕНСИТНОЙ СТРУКТУРЫ В ФЕРРОМАГНИТНОМ СПЛАВЕ С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ

Роговой А.А., Столбова О.С.

«Институт механики сплошных сред УрО РАН» - филиал ПФИЦ УрО РАН, Пермь
rogovoy@icmm.ru, sos@icmm.ru

Ферромагнитные сплавы с эффектом памяти формы, в частности сплавы Гейслера, относятся к числу интеллектуальных материалов, способных изменять свою форму, а также магнитные и механические характеристики под действием внешнего силового и/или магнитного полей. Такое уникальное поведение делает их перспективными для применения в качестве приводов, сенсоров и адаптивных элементов в микро- и наноэлектромеханических системах. В мартенситном состоянии такие материалы формируют двойниковую структуру и магнитные домены, что приводит к магнитной и механической анизотропии.

Для теоретического описания магнитного поведения ферромагнитных сплавов с эффектом памяти формы применяется микроструктурный подход, зарекомендовавший себя как эффективный инструмент для моделирования сложных магнитных процессов на мезоскопическом уровне. В рамках данного подхода эволюция вектора намагниченности во времени описывается уравнением Ландау-Лифшица-Гильберта (ЛЛГ), представляющим собой нелинейное векторное дифференциальное уравнение первого порядка по времени. Вместо решения полного уравнения ЛЛГ, описывающего динамику прецессии вектора намагниченности, предлагается использовать уравнение, определяющее только его конечное, результирующее направление [1, 2]. Проведено численное моделирование установившегося распределения намагниченности внутри двумерного образца, а также поля размагничивания, как в объеме этого образца, так и в окружающем его пространстве при различных значениях внешнего магнитного поля. Помимо двумерной постановки, предложенный подход был реализован для трехмерного случая.

Приложение внешнего магнитного поля вызывает не только перераспределение доменов, но и исчезновение двойников (раздвойникование), что играет ключевую роль в наблюдаемой макродеформации. Двойниковая структура в мартенситной фазе описывается уравнением совместности Адамара для деформаций, решение которого позволяет определить плоскости скольжения, направления и величину сдвига в кристаллической ячейке материала, приводящие к формированию и исчезновению двойниковой структуры [3]. Процесс переориентации одного варианта мартенсита в другой происходит, когда касательные усилия, возникающие от действия магнитного и/или силового полей на поверхностях сдвига, достигают критического значения, определяемого экспериментально для конкретного материала.

Литература

[1] Rogovoy A.A., Stolbova O.S. The relation for determining the resulting direction of the magnetization vector obtained from the Landau-Lifshitz-Gilbert equation // Phys. Met. Metal. – 2025. – V. 126, No. 8. – P. 855-870. https://doi.org/10.1134/S0031918X25601155.

[2] Роговой А.А., Столбова О.С. Новый подход к моделированию магнитного поведения сплава Гейслера // Физ. мет. металловед. – 2025. – Т. 126, №9. – С. 1001-1012. https://doi.org/10.7868/S3034621525090055.

[3] Rogovoy A.A., Stolbova O.S. An approach to describe the twinning and detwinning processes of the martensitic structure in ferromagnetic alloy with shape memory in magnetic and force fields // Mech. Adv. Mater. Struct. – 2025. – V. 32, No. 5. – P. 794-814. https://doi.org/10.1080/15376494.2024.2355627.

ИССЛЕДОВАНИЕ СВЯЗАННОЙ ПОСТАНОВКИ ЗАДАЧИ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ И ДЕФОРМАЦИИ ЭПИТЕЛИАЛЬНОГО МОНОСЛОЯ

Роготнев А.А., Никитюк А.С., Наймарк О.Б.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
rogotnev.a@icmm.ru, nas@icmm.ru, naimark@icmm.ru

Определение физических характеристик биологических тканей играет важную роль в области различных биомедицинских исследований [1]. Известно, что некоторые проявления онкогенеза и прогрессирования опухоли вызывают изменение теплофизических и механических свойств тканей [2]. Углубленное изучение термомеханических свойств биологических структур способно привести к разработке и оптимизации новых диагностических и терапевтических парадигм, что могут быть применены при решении различных медицинских проблем [1], включая рак молочной железы.

Целью данной работы является разработка математической модели, позволяющей исследовать эволюцию температурного поля одномерного эпителиального слоя клеток молочной железы в зависимости от различных типов деформационного отклика, обусловленного степенью поляризации тканевой структуры и внешним сдвиговым воздействием.

Предлагаемая в данном исследовании модель позволяет получить пространственно-временные распределения полей температуры и деформации в монослое эпителия молочной железы. Согласно подходу [3] вводится структурный параметр для ткани, определяющий нелинейное динамическое поведение данной системы. В зависимости от значений этого параметра наблюдаются различные типы автомодельных решений периодического, автосолитонного и степенного типа, соответствующие устойчивому, метастабильному и критическому состоянию системы.

Исследование выполнено в рамках государственного задания, регистрационный номер темы 124020200116-1.

Литература

[1] Bianchi L., Cavarzan F., Ciampitti L., Cremonesi M., Grilli F., Saccomandi P. Thermophysical and mechanical properties of biological tissues as a function of temperature: a systematic literature review //International Journal of Hyperthermia. – 2022. – vol. 39, no. 1. – pp. 297-340.

[2] G.K. A.V., Gogoi G., Kachappilly M.C., Rangarajan A., Pandya H.J. Label-free multimodal electro-thermo-mechanical (ETM) phenotyping as a novel biomarker to differentiate between normal, benign, and cancerous breast biopsy tissues //Journal of Biological Engineering. – 2023. – vol. 17, no. 1. – pp. 68.

[3] Наймарк О.Б. Коллективные свойства ансамблей дефектов и некоторые нелинейные проблемы пластичности и разрушения //Физическая мезомеханика. – 2003. – т. 6, №. 4. – с. 45-72.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАМКА ДЛЯ КРЕПЛЕНИЯ ЛОПАТКИ К ДИСКУ ГТД С ПРИМЕНЕНИЕМ РАСШИРЕННОГО КОМБИНИРОВАННОГО ПОДХОДА

Романов К.А., Балдин М.Н., Кондратьев Н.С.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
karomanov@pstu.ru, mnbaldin@pstu.ru, kondratev@pstu.ru

Одной из актуальных задач двигателестроения летательных аппаратов и наземных установок является обеспечение надежности и долговечности дисков газотурбинных двигателей (ГТД) при их эксплуатации, в ходе которой диски подвергаются значительным циклическим температурным и механическим нагрузкам. Указанные нагрузки приводят к износу и снижению прочностных свойств дисков ГТД, при этом разрушение реализуется в высоконагруженных областях – вблизи ступицы, на ободе, в замке для крепления лопаток и др. [1].

Для исследования изменения напряженно-деформированного состояния и прочностных свойств диска ГТД в процессе эксплуатации целесообразно использовать аппарат математического моделирования. При этом детальное моделирование (с малым размером конечных элементов и малым шагом интегрирования) эксплуатации диска ГТД методом конечных элементов в ходе реальных полетных циклов, длительность которых может достигать несколько часов, является вычислительно трудоемкой задачей.

Для повышения вычислительной эффективности в работе использовалось расширение ранее предложенного комбинированного подхода [2] для детального моделирования критически важной области диска ГТД – замка для крепления лопаток. В рамках процедуры реализации комбинированного подхода [2] на первом этапе решается краевая задача для изделия в целом, в результате чего определяется история изменения поля перемещений в узлах сетки анализируемой области. На втором этапе рассматриваемая область «вырезается» из изделия и для неё проводится решение отдельной краевой задачи с полученной на первом этапе историей перемещения. В качестве расширения описанного комбинированного подхода, помимо истории изменения поля перемещений, из решения краевой задачи для изделия в целом выгружается история изменения поля температуры.

Полученные результаты решения отдельной краевой задачи для замка с меньшим (по сравнению с решением задачи для диска в целом) средним размером конечных элементов удовлетворительно соответствуют ранее полученным результатам для всего диска [3]. На основе проведенного анализа трещиностойкости для областей диска ГТД с высокой интенсивностью напряжений можно заключить наличие значительного запаса прочности по данному механизму.

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

Литература

[1] Иноземцев А.А., Сандрацкий В.Л. Газотурбинные двигатели. – Пермь: ОАО «Авиадвигатель», 2006. – 1204 с.

[2] Baldin M., Kondratev N., Trusov P., Ostapovich K. A Combined Approach to Solving Applied Metal Forming Problems // Crystals. – 2025. – V. 15. – № 2. – P. 101.

[3] Kondratev N.S., Romanov K.A., Baldin M.N., Shveykin A.I., Nihamkin M.S. Digital design of gas turbine engine parts based on multilevel modeling // Frontiers in Mechanical Engineering. – In progress.

ИНЕРЦИОННО-ВОЛНОВЫЕ РЕЖИМЫ ТЕЧЕНИЙ, ВОЗБУЖДАЕМЫЕ ПРЕЦЕССИЕЙ ДИСКА, ВО ВРАЩАЮЩЕМСЯ ДЛИННОМ ЦИЛИНДРЕ

Рысин К.Ю. [1], Субботин С.В. [1]

[1]*Пермский государственный гуманитарно-педагогический университет, Лаборатория вибрационной гидромеханики, Пермь*
rysin@pspu.ru, subbotin_sv@pspu.ru

Исследование посвящено классификации режимов течений во вращающемся длинном цилиндре, один из торцов которого имеет коническую форму. Движение жидкости возбуждается прецессионным движением диска с азимутальным волновым числом $k = 1$, расположенного вблизи противоположно торца. Работа является развитием исследований [1] и направлена на изучение зависимости пространственной формы инерционно-волновых структур от частоты N и знака форсинга (направления распространения фазы колебаний края диска относительно глобального вращения). Поля скорости исследуются при помощи PIV-метода (Particle Image Velocimetry). Обнаружены два основных режима. Первый – глобальные инерционные моды с осевым и радиальным волновыми числами m и n соответственно. Для примера на Рис. 1*а* приводится мода M(3,2,-1) в виде трех пар вложенных неосесимметричных вихрей, где цветом показано поле завихренности. Изменение знака частоты форсинга на положительный приводит к смещению значения собственной моды в высокочастотную область, что связано с влиянием зонального среднего течения. Причем при положительных частотах превалируют моды с радиальным волновым числом $m = 2$, а при отрицательных с $m = 1$.

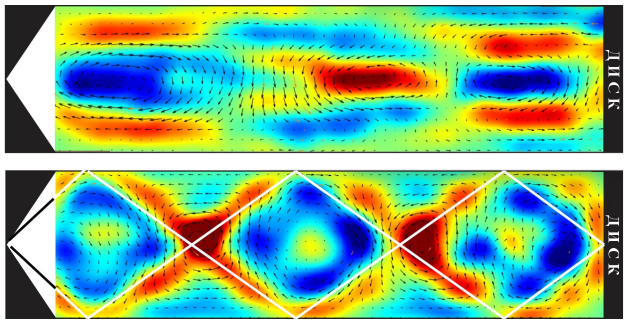


Рис. 1. Мгновенное поле скорости при N = – 0.400 (а) и N = – 1.263 (б)

Второй режим – волновые аттракторы типа A(n,1,-1), наблюдаемые только при антициклонической прецессии [2, 3]. В этом случае энергия колебаний локализована в тонких сдвиговых слоях, образующих замкнутые траектории. В осевом сечении полости структура течений напоминает систему ромбовидных структур между, жидкость в которых совершает сонаправленное движение (Рис. 1*б*).

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ №25-11-00358.

Литература

[1] A. D. McEwan. Inertial oscillations in a rotating fluid cylinder // J. Fluid Mech. – 1970. – Vol. 40. – P. 603–640.

[2] I. Sibgatullin, E. Ermanyuk, L. Maas, X. Xu, and T. Dauxois. Direct Numerical Simula-tion of Three-Dimensional Inertial Wave Attractors // 2017 Ivannikov ISPRAS Open Conference (ISPRAS), Moscow, Russia. – 2017. – P. 137–143.

[3] S. Subbotin, N. Shmakova, V. Kozlov, E. Ermanyuk. Nonlinear regimes of inertial wave attractors generated by a precessing lid: Zonal flows and Rossby waves // Phys. Fluids. – 2023. – 35(7). – P. 074110.

ОЦЕНКА ПРИМЕНЕНИЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ КОНСТАНТ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Саврасова А.И. [1], Галкина Е.Б. [2]

[1] *Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь*
[2] *Институт механики сплошных сред, Пермь*
alinasavrik@yandex.ru, galkina.e@icmm.ru

Волоконно-оптические датчики деформации (ВОДД) на основе брэгговских решёток представляют собой современное средство измерения деформаций, обладающее высокой точностью, устойчивостью к электромагнитным воздействиям и возможностью многоточечного контроля. В настоящее время актуальной задачей является оценить перспективы применения ВОДД для определения механических характеристик новейших материалов, а также в системах мониторинга состояния конструкций при эксплуатации в агрессивных полях и средах, где такие датчики показывают большую стабильность и устойчивость к воздействиям [1].

В работе проведено исследование применимости ВОДД для определения упругих констант материала при статическом нагружении балки. На первом этапе для консольно-закрепленной балки равного сопротивления при статическом нагружении измерение деформаций выполнялось одновременно с использованием волоконно-оптических и тензометрических датчиков. Установлено, что показания волоконно-оптических датчиков хорошо согласуются с результатами тензометрических измерений. Относительное расхождение значений деформаций составило от 0.4% до 7.5%, что подтверждает достаточную точность обоих методов. На втором этапе выполнено определение упругих постоянных дюралюминиевой балки прямоугольного сечения при четырехточечном изгибе. Волоконно-оптические датчики регистрировали продольные и поперечные деформации в зоне чистого изгиба. Нагружение осуществлялось ступенчато до максимального значения 2500 Н. На основании измеренных деформаций определялись модуль Юнга и коэффициент Пуассона [2].

Далее в работе было выполнено численное моделирование с использованием метода конечных элементов и аналитический расчет по классическим зависимостям сопротивления материалов. Сравнительный анализ показал сопоставимые результаты экспериментальных данных, а также численных и аналитических расчетов. Относительная погрешность при определении продольных деформаций не превысила 0,3%, а для поперечных деформаций составила 4%.

Таким образом, полученные результаты подтверждают возможность использования волоконно-оптических датчиков для определения упругих характеристик материалов с высокой точностью. Применение данной технологии является перспективной задачей экспериментальной механики и мониторинга технического состояния инженерных конструкций.

Литература

[1] Шардаков И. Н., Созонов Н. С. Цветков Р. В. Экспериментально-теоретические основы автоматизированных систем деформационного мониторинга с использованием волоконно-оптических элементов // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. – 2016. – №4.

[2] Matveenko V., Serovaev G., Fedorov A., Galkina E., Zaitsev A. Determination of Poisson's ratios for different-modulus materials based on four-point bending // Institute of Continuous Media Mechanics of the Ural Branch of Russian Academy of Science – 2023. – 15 p.

РАСЧЕТ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ АЛЮМИНИЕВОГО РЕБРА, ВОЗВЕДЕННОГО НА ОСНОВАНИИ ПРОВОЛОЧНО-ДУГОВОЙ НАПЛАВКОЙ

Салихова Н.К., Дудин Д.С., Келлер И.Э.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
salikhova@icmm.ru, dmitryovj@yandex.ru, kie@icmm.ru

Метод проволочно-дуговой наплавки относится к процессу аддитивного производства, при котором происходит последовательное добавление слоев расплавленного металла. При таком способе производства изделий в объеме материала возникают значительные градиенты температуры, приводящие к появлению несовместных деформаций и остаточных напряжений, которые могут деформировать изделие и в дальнейшем привести к его разрушению. Для исследования возникающих остаточных напряжений разработана трехмерная численная модель процесса послойной наплавки алюминиевой стенки на основание, которая включает последовательный несвязанный расчет в COMSOL Multiphysics тепловой задачи, термоупругопластической задачи с учетом истории изменения геометрии заготовки и неоднородного поля температуры в ней для расчета полей собственных деформаций и остаточных напряжений, а также упругопластической задачи освобождения охлажденной возведенной конструкции от закрепления, в процессе которой происходит ее продольный изгиб и изменение поля остаточных напряжений. Из решения задачи теплопроводности определяется распределение температуры в конструкции, создаваемое в результате воздействия движущегося объемного источника тепла, представляющего собой прямоугольный параллелепипед 6,5×6,5×2,7 мм. Возведенная стенка представляла собой прямоугольный параллелепипед высотой 24,3 мм и длиной 250 мм, сформированный из девяти слоев металла. Подложка из AlMgSi представляла собой прямоугольный параллелепипед 310×65×6,35 мм, вертикально закрепленный на стальной опорной плите длиной 400 мм и шириной 125 мм. Скорость наплавки составляла 10 мм/с. После наплавки каждого слоя происходит остывание конструкции на воздухе в течение 45 с. В тепловой задаче учитывались нелинейные краевые условия, обусловленные радиационно-конвективным теплообменом с окружающей средой. Фронты плавления и кристаллизации не рассматривались. Численное моделирование выполнено при исходных данных, задающих свойства материалов в виде нелинейных зависимостей от температуры модуля упругости и константы закона упрочнения Джонсона-Кука. Вычисленное значение прогиба хорошо согласуется с результатами эксперимента для конструкции, воспроизведенной в расчете, представленные в работе [1]. Полученные результаты моделирования могут быть использованы для выбора оптимального режима процесса проволочно-дуговой наплавки и минимизации искажения оребрённых конструкций и неоднородности распределения остаточных напряжений в них. Некоторые подробности работы приведены в статьях [2,3].

Литература

[1] Hoennige J. Colegrove P. Ganguly S. et al. Control of residual stress and distortion in aluminium wire + arc additive manufacture with rolling // Additive Manufacturing. – 2018. – No. 22. – P. 775–783.
[2] Salikhova, N.K., Dudin, D.S., Keller, I.E. et al. Modelling the evolution of eigenstrains and residual stresses during wall deposition on a substrate by wire-arc surfacing. Mechanics of Solids. 2025. Vol. 60, No.4. P. 2516-2530.
[3] Dudin D.S., Keller I.E., Permyakov G.L., Trushnikov D.N. Modelling of residual stresses and distortions of the wall on a substrate built by wire- arc surfacing. Journal of Siberian Federal Universit. Mathematics and Physics. 2024. T. 17. № 1. С. 75-90.

МОДЕЛЬ И РАСЧЁТ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ЛИСТА ГРАФЕНА НА ОСНОВЕ МОМЕНТНО-МЕМБРАННОЙ ТЕОРИИ УПРУГОЙ ПЛАСТИНКИ

Саркисян С.О. [1], Саркисян Л.С. [2], Жамакочян К.А. [1]

[1]*Ширакский государственный университет, Армения, Гюмри*
Институт механики НАН Армении, Армения, Ереван
s_sargsyan@yahoo.com, lusinehsargsyan@gmail.com, knarikzhamakochyan@mail.ru

При исследовании несущей способности листа графена наряду с прочностью должна быть обеспечена достаточная устойчивость. Поэтому при расчёте листа графена одновременно с расчётом на прочность необходимо будет вести расчёт также на устойчивость.

Как известно, моментно-мембранная линейная теория изгибной деформации упругой пластинки установлена как континуальная теория деформационного поведения листа графена при изгибе [1]. Для этой теории доказана применимость в случае статики минимального принципа полной потенциальной энергии. Аналогично, для листа гибкого графена как модель деформационного поведения установлена моментно-мембранная теория упругой пластинки большого прогиба. Для этой нелинейной теории пластин получено вариационное уравнение типа Лагранжа (уравнение принципа возможных перемещений).

Функционал задачи устойчивости листа графена определён по следующей процедуре. Сначала представляется функционал для возмущённого состояния. При этом все параметры напряжённо-деформированного состояния представляются в виде сумм слагаемых исходного (докритического) состояния и возмущения. Далее представляется функционал исходного состояния в линейном виде. В итоге представляется разность указанных двух функционалов-как функционал задачи устойчивости листа графена. При вариационной реализации задачи об устойчивости листа графена использован четырёхузловой прямоугольный конечный элемент пластинки [2]. Основные матрицы метода конечных элементов для задачи устойчивости пластинки представляют собой матрицу жёсткости и матрицу геометрической жёсткости, которые получены вариационным способом.

Литература

[1] Саркисян С.О. Стержневая и континуально-моментная модели деформаций двумерных наноматериалов //Физическая мезомеханика. – 2022. – т. 25, № 2. – с. 109-121.

[2] Саркисян С.О., Жамакочян К.А., Саркисян Л.С. Деформационное состояние листа графена в рамках континуальной моментно-мембранной теории упругих пластин //Вычислительная механика сплошных сред. – 2024. т. 17, № 1.– с. 33-43.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ГАЗОВОГО ПУЗЫРЬКА В ПОЛЕ СТОЯЧЕЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ВОЛНЫ

Сбоев И.О. [1], Любимова Т.П. [2], Рыбкин К.А. [3]

[1]*АО «ОДК-Авиадвигатель», Пермь*
[2]*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*
[3]*Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь*
ivan-sboev@yandex.ru, lyubimovat@mail.ru, k.rybkin@gmail.com

Исследование воздействия высокочастотных колебаний (или ультразвука) на границу раздела двух несмешивающихся сред представляет значительный интерес для целого ряда приложений, включая процессы обогащения руд методом флотации, очистку поверхностей и технологию сепарации микрочастиц с использованием ультразвука [1]. В данной работе проводится численное моделирование движения одиночного газового пузырька, окруженного жидкостью, в поле стоячей УЗ волны.

Численный расчет выполняется методом конечных элементов в двухмерной постановке. Рассматривается цилиндрическая область радиусом R, заполненная жидкостью с параметрами воды ($\rho = 1{,}0\cdot10^3$ кг/м³, $c = 1{,}49\cdot10^3$ м/с), в которой возбуждается плоская стоячая УЗ волна с частотой f и амплитудой P. Направление распространения УЗ волны совпадает с направлением вертикальной оси y. Длина УЗ волны $\lambda = c/f$. В жидкости находится цилиндрический пузырек радиусом $r \ll \lambda$, заполненный воздухом ($\rho_п = 1{,}2$ кг/м³, $c_п = 0{,}34\cdot10^3$ м/с). Действие силы тяжести на пузырек не учитывается.

На первом этапе путем решения уравнения Гельмгольца рассчитывается среднее поле акустического давления в жидкости в отсутствие пузырька без учета акустических течений и поглощения звуковой энергии, обусловленного затуханием. По найденному распределению среднего давления вычисляется средняя сила акустического излучения.

На втором этапе с использованием уравнений Навье-Стокса рассчитываются нестационарные поля скорости и давления в жидкости и в пузырьке. Решение уравнения переноса фазы (метод «level set») на каждом временном шаге позволяет следить за изменением среднего положения и средней формы пузырька с учетом действующей на него средней объемной силы акустического излучения.

Получены численные данные о среднем смещении и средней форме пузырька при различных параметрах ультразвукового воздействия и разных размерах пузырька.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 24-11-00269).

Литература

[1] Lauterborn W., Kurz T. Physics of bubble oscillations //Reports on progress in physics. – 2010. – т. 73, №. 10. – с. 106501.

[2] Бутюгина Е. В., Насибуллаева Э. Ш., Гумеров Н. А., Ахатов И. Ш. Численное моделирование динамики газового микропузырька в акустическом поле с учетом процесса направленной диффузии //Вычислительная механика сплошных сред. – 2014. – т. 7, № 3. – с. 234-244.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КАВИТАЦИИ В ТУРБУЛЕНТНОМ ПОТОКЕ ЖИДКОСТИ В ТОПЛИВНОЙ ФОРСУНКЕ В УПРОЩЕННОЙ ПОСТАНОВКЕ

Сбоев И.О., Мингалев С.В., Абрамчук Т.В.

АО «ОДК-Авиадвигатель», Пермь
ivan-sboev@yandex.ru, mingalev-sv@avid.ru, abramchuk-tv@avid.ru

Возникновение кавитации в топливном распылителе форсунки камеры сгорания (КС) газотурбинного двигателя (ГТД) приводит к изменению характеристик распыла форсунки, что оказывает влияние на неравномерность поля температуры на выходе из КС, ресурс форсунки и «горячей» части ГТД в целом. Предсказание перехода к этому режиму работы является важным для понимания природы возникновения данного явления и разработке конструктивных мероприятий, позволяющих нивелировать факторы, приводящие к возникновению кавитации на рабочих режимах КС. Настоящая работа направлена на решение этой задачи в упрощенной постановке, при которой форсунка заменяется узким каналом, возникновение кавитации в котором моделируется численными методами. Цель исследования состоит в сравнении различных подходов к моделированию турбулентности в приложении к проблеме возникновения кавитации.

Моделируется турбулентное течение сжимаемой вязкой жидкости со свойствами углеводородного топлива (при нормальных условиях $\rho_0 = 786{,}2$ кг/м^3, $\nu_0 = 1{,}85$ м^2/с) под действием большого перепада давления в узком горизонтальном канале высотой $h = 0{,}3$ мм и протяженностью $l = 1{,}0$ мм [1]. На входе и выходе из канала давление постоянно и принимается равным $p_1 = 3{,}0 \cdot 10^7$ Па и $p_2 = 1{,}14 \cdot 10^7$ Па соответственно. Давление насыщенных паров исследуемой жидкости $p_п = 9{,}745 \cdot 10^3$ Па, плотность жидкости в условиях насыщения $\rho_н = 777{,}6$ кг/м^3. Температура смеси $T = 353$ К.

Для описания течения в канале используются различные модели турбулентности, в том числе метод крупных вихрей (LES), а также основанные на усредненных по Рейнольдсу уравнениях Навье-Стокса (RANS) двухпараметрические модели k-ε и SST. Для учета фазового перехода при кавитации рассматривается баротропная модель смеси жидкости и пара [2], при которой плотность смеси определяется локальным значением давления в потоке, т. е. $\rho = \rho(p)$. Численный расчет проводится методом конечных объемов в стационарной и нестационарной постановках для двухмерной и трехмерной геометрии.

В ходе исследования получены осредненные по времени поля скорости, давления, завихренности и плотности в продольном сечении канала. Расчеты в стационарной постановке показали, что осредненное течение имеет различимые зоны рециркуляции, в которых давление способно достигать значений ниже давления насыщенных паров жидкости. Рассчитанные осредненные течения качественно согласуются с шлирен-фотографиями распределения объемной доли паровой фазы в канале [1]. Предпринята попытка показать сложный пространственный нестационарный характер трехмерного течения кавитирующей жидкости и разрешить вихревые структуры, внутри которых могут развиваться макроскопические области, заполненные паром.

Литература

[1] Ибен У., Махнов А.В., Шмидт А.А. Математическое моделирование возникновения и развития кавитации в турбулентном потоке жидкости в симметричном канале //Письма в Журнал технической физики. – 2019. – т. 45, № 2. – с. 43-46.

[2] Панов Л.В., Чирков Д.В., Чёрный С.Г. Численные алгоритмы моделирования кавитационных течений вязкой жидкости //Вычислительные технологии. – 2011. – т. 16, № 4. – с. 96-113.

ВОДОРОДНАЯ ХРУПКОСТЬ И ВЛИЯНИЕ СКИН-ЭФФЕКТА: АНАЛИЗ ТРЕХ КРИТЕРИЕВ РАЗРУШЕНИЯ

Седова Ю.С. [1]

[1]*Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург*
sedova.yus@mail.ru

Подавляющее большинство экспериментальных исследований водородной хрупкости проводится на образцах, искусственно насыщенных водородом. При этом зачастую не принимается во внимание, что такая процедура приводит к формированию приповерхностного скин-слоя с повышенной концентрацией водорода [1]. На изломах таких образцов наблюдается двойственный (хрупко-вязкий) характер разрушения, для интерпретации которого в современной литературе привлекаются гибридные модели, сочетающие механизмы HELP [2] + HEDE [3]. Однако физическая обоснованность и предсказательная способность подобных моделей остаются предметом дискуссии.

В настоящей работе предложен альтернативный подход, развивающий исходную идею модели HEDE о снижении эффективной поверхностной энергии в присутствии водорода. На примере задачи об одноосном растяжении стандартного цилиндрического образца выполнено численное моделирование развития трещины с использованием трех фундаментальных критериев механики разрушения: силового критерия Ирвина в рамках линейно-упругой постановки (LEFM), энергетического J-интеграла для упругопластического тела (NLFM) и декогезионного критерия, описывающего процессы в вершине трещины посредством когезионных элементов (CZM). Во всех трех сценариях определяющим являлся учет исходного неравномерного распределения водорода, соответствующего скин-эффекту. Численная реализация осуществлена с использованием собственного разработанного программного комплекса на языке C++.

Результаты моделирования продемонстрировали качественно единую кинетику разрушения во всех трех постановках. На начальном этапе реализуется индуцированный водородом рост трещины с конечным временем инициирования, обусловленным диффузионным накоплением вещества в окрестности вершины. По мере увеличения длины трещины скорость ее распространения начинает превышать скорость подвода водорода, вследствие чего концентрация в движущейся вершине снижается до фоновых значений. Дальнейшее развитие трещины происходит уже при исходных механических характеристиках материала, без непосредственного участия водорода.

Таким образом, учет скин-эффекта в рамках классических критериев механики разрушения позволяет естественным образом объяснить наблюдаемую двойственную картину разрушения без привлечения дополнительных гипотез о конкурирующих механизмах. Это позволяет по-новому интерпретировать обширный массив экспериментальных данных и указывает на необходимость пересмотра и корректировок методик стандартных испытаний на водородное растрескивание элементов конструкций, эксплуатирующихся в водородсодержащих средах.

Литература

[1] Polyanskiy V. A. et al. Phenomenon of skin effect in metals due to hydrogen absorption // Continuum Mechanics and Thermodynamics. – 2019. – Т. 31. – №. 6. – С. 1961-1975.

[2] Sofronis P., Liang Y., Aravas N. Hydrogen induced shear localization of the plastic flow in metals and alloys // European Journal of Mechanics - A/Solids. – 2001. – Т. 20. – №. 6. – С. 857–872.

[3] Oriani R. A. A mechanistic theory of hydrogen embrittlement of steels // Berichte der Bunsengesellschaft für physikalische Chemie. – 1972. – Т. 76. – №. 8. – С. 848-857.

КВАНТОВАЯ ГИДРОДИНАМИКА ИЗ ВАРИАЦИОННЫХ ПРИНЦИПОВ ДЛЯ ОПТОСПИНТРОНИКИ

Серебренников А.М. [1]

[1]*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь*
al-serebr02@yandex.ru

Рассматривается семейство квантово–гидродинамических моделей для исследований в области плазмонного резонанса наночастиц (НЧ), базирующееся на гипотезах о нелокальной зависимости функции плотности от обобщенных координат. Основные уравнения получены встречным движением двух ходов теории: сверху от полуклассического лагранжиана и функции Гамильтона (следуя Ф.Блоху [1]) и снизу от квантовой механики (КМ) системы многих частиц. Из вариационных процедур следуют уравнения движения, совместности и непрерывности. Линеаризация плотности относительно функции перемещений сводит уравнения движения к форме полуклассического осциллятора с тензорами эффективной жесткости и массы, являющимися функционалами плотности основного состояния. Информация о ней появляется из решения тех же моделей. На основе эффективных характеристик выводится критерий резонанса малых частиц. Численные результаты получены для сферических и несферических частиц и сравнены с расчетными и экспериментальными [2,3] для НЧ Na и Co. Осуществляется расширение подхода на КМ систем со спином, где наличие спиновой динамики существенно влияет на проявление резонансных свойств. Мезоскопическое описание строится на стыке многочастичной КМ, континуальной механики и классической теории поля [4]. В его основе – представление плотности в форме бинарной суперпозиции. Мотивацией для этого являются: (I) теоремы сложения и умножения вероятностей, (II) положения КМ о суперпозиционности. Посредством комбинирования (I)–(II) плотность $\otimes_{n=1}^{N}(\rho_n^{\uparrow}+\rho_n^{\downarrow})$ отображается на множество конфигураций $\rho_\sigma=\int_\Omega \Phi(\mathbf{r},\boldsymbol{\sigma},t)\Phi^*(\mathbf{r},\boldsymbol{\sigma},t)\,d\Omega$ системы N–частиц спина $s=1/2$. Зависимость $\rho_n^{\uparrow}$, $\rho_n^{\downarrow}$ от обобщенных координат через экстремизацию действия ведет к 2^N–уравнениям импульсов. На обобщении преобразования Маделунга строится детерминантная много конфигурационная волновая функция, удовлетворяющая многочастичному уравнению Шредингера с *4*–потенциалом. Область применения подхода – оптика НЧ переходных металлов. С позиции зонной теории их особенностью является пересечение *d*–зонами уровня Ферми (E_F). Асимметрия расщепления диаграммы плотности состояний в Co ведет к различию характеристик рассеяния электронов вблизи E_F: спин–вверх электроны обладают низким уровнем, спин–вниз – высоким [3]. Наличие представительного числа актов рассеяния с переворотом спина порождает конфигурации, различающиеся по движению с потолком размерности их множества $\cong 2^N$ (N – число частиц в событиях переворота). Аспекты вычислительной сложности адресованы в выступлении.

Литература

[1] Eguiluz A., Quinn J.J., Hydrodynamic model for surface plasmons in metals and degenerate semiconductors // Phys. Rev. B. – 1976. – т. 14, № 4. – с.1347–1361.

[2] Serebrennikov A.M., Continual–quantum plasmonics with kinematical functions: dipolar resonance and nonlocal polarizability of simple metal made nanoparticles // Opt. Quant. Electron. – 2019. – т. 51, № 8. – 253.

[3] Bhatta H.L., Aliev A.E., Drachev V.P., New mechanisms of plasmons specific for spin–polarized nanoparticles // Scientific Reports. – 2019. – т. 9, № 1. – 2019.

[4] Serebrennikov A.M., Superposition continuum mechanics (hydrodynamics) for systems with spin polarization defined evolution // Materials Today Communications. – 2024. – т. 38. – 107945.

ПЕРФУЗИЯ КРОВИ И КРОВЕЗАМЕЩАЮЩИХ РАСТВОРОВ ПО ЭЛАСТИЧНОМУ СОСУДУ ВИБРООБЪЕМНЫМ МЕТОДОМ

Сизиков В.С.[1], Чупахин А.П.[2]

[1] *Санкт-Петербургский государственный технологический университет; Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург*

[2] *Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск*
sizikovvs@yandex.ru, chupakhin@hydro.nsc.ru

В работе выполнено исследование процесса перемещения крови и кровезамещающих растворов по сосуду виброобъемным методом [1] с использованием устройства с вибрирующими стенками. Исследование выполнено методом математического моделирования. На основе выполненной работы подтверждена принципиальная возможность осуществления транспортирования крови по каналу с вибрирующими стенками предложенным методом и его применимость для операции перфузии.

Поставлена задача о перфузии крови, заключающейся в искусственном поддержании кровообращения во время проведения хирургических процедур и предложен виброобъемный метод перемещения крови и устройство для осуществления этого процесса. Рассмотрена трехкомпонентная реологическая модель крови как вязко-упругой жидкости и двухмассовая модель стенки устройства и сосуда, отображающие процесс деформирования сосуда и транспортирования крови. Математическая модель учитывает два характерных периода взаимодействия стенок устройства и сосуда – период деформирования эластичного сосуда при его движении в контакте со стенками устройства и период их бесконтактного движения. Модель отображает процесс деформирования сосуда с кровью и транспортирование крови вдоль сосуда вибрирующим стенками устройства.

Выполнено численное моделирование процесса перемещения крови для искусственного сосуда диаметром 10 мм с реологическими характеристиками крови, выбранными на основе экспериментальных измерений и данных из открытых источников для диапазона расходов потока крови, характерных для применяемых на практике конструкций перфузионных насосов [2]. Моделирование показало, что скорость транспортирования крови возрастает с увеличением угла раскрытия транспортного канала устройства и амплитудного значения вынуждающей силы. Изучено влияние частоты вынуждающей силы на скорость транспортирования крови и размах колебаний стенок и найдено несколько зон резонансных частот колебаний в исследуемой системе. Представлены рекомендации к выбору частоты и амплитуды вынуждающей силы в устройстве, обеспечивающих наибольший расход потока крови при выполнении ограничения на наибольшую поперечную деформацию сосуда сжатием вибрирующими стенками устройства. Полученные результаты свидетельствуют о принципиальной возможности осуществления перфузии крови и кровезамещающих растворов и управления расходом крови конструктивными и режимными параметрами устройства.

Обозначено направление дальнейших исследований, заключающееся в совершенствовании формы продольного сечения транспортного канала на основе решения задачи оптимизации по критерию наибольшего расхода кровотока.

Литература

[1] Способ переработки зернистых материалов и устройство для его осуществления: пат. 2675554 Рос. Федерация: МПК B01F 3/18, B01F 11/00, B02C 19/18 / Сизиков В.С., Сизиков С.А. Заявка № 2016140584/05; заявл. 14.10.2016; опубл. 19.12.2018. Бюл. № 35. 2 с.

[2] Левтов В. А., Регирер С. А., Шадрина Н. Х. Реология крови. М.: Медицина, 1982 г. - 272 с.

ОБ ОЦЕНКЕ УСТОЙЧИВОСТИ ПО ЛЯПУНОВУ БАЗОВЫХ СООТНОШЕНИЙ ФИЗИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ПЛАСТИЧНОСТИ

Симонов А.В., Швейкин А.И.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
pro100simonov@yandex.ru, shveykin@pstu.ru

Многоуровневые конститутивные модели (КМ) металлов и сплавов, основанные на физических теориях пластичности (ФТП), позволяют достаточно детально описывать изменение внутренней структуры обрабатываемого образца, что позволяет применять данные модели в широком классе технологических задач [1]. Однако многоуровневые КМ ФТП обладают существенной нелинейностью, а описываемые такими моделями процессы стохастичны по своей природе. По этой причине актуальным является вопрос об устойчивости моделей данного типа к возмущениям различных параметров.

В работах [2, 3] содержатся результаты численной оценки устойчивости данных моделей, обсуждаются проблемы применимости к многоуровневым КМ ФТП аналитических подходов, разработанных А.М. Ляпуновым. Между тем последние находят эффективное применение в некоторых частных задачах, однозначно отвечают на вопрос об устойчивости/неустойчивости решений, могут дать конкретные ограничения на параметры модели. Качественный анализ устойчивости, по крайней мере, базовых соотношений может выявить тенденции поведения без особых ограничений на сценарий возмущения. Более того, аналитические подходы не требуют многократного проведения вычислительных экспериментов для получения результата. Стоит отметить, что для решения вопроса об устойчивости необходим комплексный подход [4].

В данной работе для базовой системы соотношений мезоуровня двухуровневой КМ ФТП [4] совершается переход к обезразмеренной постановке задачи, с применением первого метода А.М. Ляпунова исследуется устойчивость решения по отношению к возмущению остаточных мезонапряжений, проводятся численные расчёты для монокристалла меди с проверкой полученных аналитическим путём результатов.

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

Литература

[1] Трусов П.В., Швейкин А.И., Кондратьев Н.С., Янц А.Ю., Многоуровневые модели в физической мезомеханике металлов и сплавов: результаты и перспективы // Физическая мезомеханика. – 2020. – т. 23, №6. – с. 33-62.

[2] Швейкин А.И., Трусов, П.В., Романов К.А., Об одном подходе к численной оценке устойчивости многоуровневых конститутивных моделей материалов // Вычислительная механика сплошных сред. – 2021. – т. 14, №1. – с. 61-76.

[3] Швейкин А.И., Трусов П.В., Романов К.А., Некоторые результаты численной оценки устойчивости двухуровневой конститутивной модели ГЦК-поликристалла // Вычислительная механика сплошных сред. – 2021. – т. 14, №2. – с. 127-143.

[4] Shveykin A.I., Trusov P.V., Romanov K.A., Stability of Crystal Plasticity Constitutive Models: Observations in Numerical Studies and Analytical Justification // Metals. – 2024. – т. 14, № 8. – с. 947.

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

Смирнов А.С. [1], Канакин В.С. [1]

[1]*Институт машиноведения им. Э.С. Горкунова УрО РАН, Екатеринбург*

При горячей пластической деформации напряжение текучести металлических материалов определяется не только мгновенными значениями температуры и скорости деформации, но и историей нагружения. Это обусловлено конкуренцией процессов упрочнения и разупрочнения, кинетика которых зависит от всей предыстории термомеханического воздействия. В связи с этим однозначное соответствие между напряжением и текущими деформационными параметрами отсутствует. Данный факт ограничивает применимость статических реологических моделей, описывающих отклик материала лишь как функцию текущего состояния, и обуславливает необходимость перехода к динамическим моделям, учитывающим эволюцию параметров деформирования во времени.

Для учета истории нагружения традиционно применяются феноменологические модели в интегральной форме, развивавшиеся, в том числе, А.А. Поздеевым с коллегами [1], а также структурно-феноменологические и физически обоснованные модели, в которых эволюция внутреннего состояния описывается системой дифференциальных уравнений. Нейросетевые модели с памятью (RNN, LSTM, GRU, TCN) также способны учитывать предысторию нагружения, однако характеризуются высокой вычислительной ресурсоемкостью и в большинстве случаев не способны корректно прогнозировать напряжение текучести при отклонении от шага по времени, для которого были получены их веса.

В работе предложена гибридная реологическая модель, сочетающая феноменологическое уравнение начального предела текучести и нейронную сеть NARX (Nonlinear AutoRegressive with eXogenous inputs), реализованную через многослойный персептрон с обратной связью по выходу. Часть набора входных параметров формируется на одном предшествующем временном шаге ($\sigma_S^i, \sigma_S^{i-1}, \dot{\varepsilon}^i, \dot{\varepsilon}^{i-1}, \Delta t^i, \Delta t^{i-1}, T$), что обеспечивает учет предыстории деформирования при минимальной глубине памяти. Накопленная степень деформации исключена из числа параметров как неинформативная при описании разупрочняющих процессов. Для повышения обобщающей способности модели в обучающую выборку введено варьирование временного интервала Δt и режимы с немонотонным изменением скорости деформации.

Верификация проведена на алюмоматричном композите В95/2,5% TiC, деформируемом в диапазоне температур 300–500 °C и скоростей деформации 0,1–6 $с^{-1}$. Средняя относительная погрешность прогноза составила 1,5%, а все расчетные значения полностью укладываются в интервал ±5% от экспериментальных значений. Модель корректно воспроизводит локальные особенности кривых деформирования, включая участки разупрочнения при переменных скоростных условиях нагружения.

Литература

[1] Поздеев А.А., Тарновский В.И., Еремеев В.И., Баакашвили В.С. Применение теории ползучести при обработке металлов давлением. – М.: Металлургия, 1973. – 192 с.

АНАЛИЗ МЕЖСЛОЙНОЙ ПРОЧНОСТИ МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНОГО КОМПОЗИТА ПРИ ТРЕХТОЧЕЧНОМ ИЗГИБЕ

Смирнов С.В.[1], Мясникова М.В.[1], Вичужанин Д.И.[1]

[1]*Институт машиноведения имени Э. С. Горкунова УрО РАН, Екатеринбург*
smirnov.sergy@bk.ru, marina@imach.uran.ru, mmm@imach.uran.ru

Использование слоистых металлополимерных композитов, изготовленных из пластин алюминиевых сплавов, соединенных адгезивным слоем на основе эпоксидной смолы, является перспективным направлением проектирования гибридных материалов и находит применение в разных отраслях техники. В связи с этим актуальной является задача обеспечения требуемого уровня адгезионной прочности границ «металл – адгезив» и необходимости разработки надежных методик прогнозирования способности таких соединений сопротивляться разрушению. Одним из основных экспериментальных методов для оценки адгезионной прочности слоистых материалов является испытание на трехточечный изгиб. Такая схема нагружения часто встречается при эксплуатации ряда деталей и элементов конструкций, что дает преимущество трехточечному изгибу по сравнению с другим, также широко распространенным видом испытаний на сдвиг растяжением внахлест. Вместе с тем неоднородность напряженно-деформированного состояния при изгибе вызывает некоторые трудности в обработке результатов испытаний. Цель настоящей работы заключалась в разработке подхода для расчета адгезионной прочности слоистого металлополимерного композита с использованием в качестве критерия разрушения предельного значения плотности энергии деформации, чтобы иметь возможность оценить способность исследуемого соединения сопротивляться адгезионному разрушению в условиях трехточечного изгиба.

По результатам испытаний на трехточечный изгиб слоистого металлополимерного композита, состоящего из пластин алюминиевого сплава АМг6-НВП, соединенных эпоксидным клеем, с помощью видеофиксации установлены места и моменты первоначальных межслойных сдвигов, приводящих к расслоению границ соединения. Совместный анализ результатов экспериментов и конечно-элементного моделирования процесса испытаний позволил построить диаграмму предельной адгезионной прочности в виде экспоненциальной зависимости предельно достигаемой плотности энергии деформации W^* к моменту образования межслойного сдвига от величины фазового угла β, характеризующего соотношение нормальных и сдвиговых напряжений на границе адгезионного соединения.

Зависимость $W^*(\beta)$ была использована для моделирования степени использования ресурса адгезионной прочности межслойной границы металлополимерного композита, характеризующей деградацию адгезионных связей при трехточечном изгибе в рамках феноменологической концепции механики поврежденности. Примененный подход может оказаться перспективным для выполнения проектных и поверочных расчетов межслойной прочности слоистых металлополимерных композитов.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИЙ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ МОДУЛЕЙ НАВИГАЦИИ С УЧЁТОМ ПЕРЕГРУЗОК

Смирнова А.Е., Кузнецова Е.В.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
vasiljevaanastassia@yandex.ru, kuznetsovae@pstu.ru

В работе представлены результаты проектирования и численного анализа двух конструктивных узлов инерциальной навигационной системы: блока микромеханических датчиков и модуля размещения электронной аппаратуры. Система будет изготовлена с применением аддитивных технологий: корпусные элементы и крепёжные детали предполагается выполнять 3D-печатью из ударопрочного ABS-пластика, обеспечивающего достаточную жёсткость и технологичность при малой массе.

Для блока микромеханики были сформулированы требования по обеспечению соосности MEMS-датчиков, жёсткости конструкции (допустимый прогиб не более 1/100 мм), компактности и устойчивости к перегрузкам до 5G. Проектирование осуществлялось в CAD-среде с последующей верификацией в пакете ANSYS Static Structural [1]. В расчётной модели использовалась линейно-упругая постановка, анализировались перемещения, деформации и эквивалентные напряжения [2].

Первоначальная конструкция показала превышение допустимого прогиба при динамической нагрузке. В результате модернизации были внедрены стандартные стальные стойки, что позволило уменьшить максимальные перемещения при перегрузке на порядок. Итоговое значение относительного перемещения в рабочем диапазоне нагрузок [-5G; +5G] составило порядка 0,01 мм, что соответствует техническому заданию. Концентрации напряжений локализуются в крепёжных элементах, при этом запас прочности превышает нормативные значения [3].

Во второй части работы выполнено проектирование стеллажного инерциального модуля по аналогии со структурой CubeSat. Конструкция включает алюминиевые направляющие, текстолитовые полки и разъёмные крепления. Численный анализ показал, что при сохранении прочности элементов по критериям текучести и разрушения прогибы конструкции превышают допустимые значения как в статике, так и при перегрузке 5G. Добавление рёбер жёсткости привело к снижению напряжений, однако не обеспечило требуемую жёсткость. Сделан вывод о необходимости пересмотра компоновочной схемы на структурном уровне.

Таким образом, в работе представлены результаты проектирования приборных конструкций, подготовленных к производству посредством аддитивных технологий, при этом практическое применение методов конечных элементов при проектировании позволяет применить итерационный подход к обеспечению жёсткости при сохранении минимальной заданной массы и обеспечить оптимальные параметры технологического процесса.

Литература

[1] Конюхов А.В. Основы анализа конструкций в ANSYS. – Казань: Казан. гос. ун-т, 2001. – 101 с.

[2] Бруяка В.А. и др. Инженерный анализ в ANSYS Workbench. – Самара: СамГТУ, 2010. – 271 с.

[3] Александров А.В., Потапов В.Д., Державин Б.П. Сопротивление материалов. – М.: Высшая школа, 2003. – 560 с.

РОЛЬ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ В ЧИСЛЕННЫХ ЗАДАЧАХ МГД В РЕЖИМАХ ИНТЕНСИВНОЙ МАГНИТНОЙ КОНВЕКЦИИ

Смольянов И.А. [1,2], Шмаков Е.И. [1,2] Листратов Я.И.[1], Беляев И.А.[1]

[1]*ОИВТ РАН, Москва*
[2]*Уральский федеральный университет, Екатеринбург*
i.a.smolyanov@gmail.com

Конвективный вынос магнитного поля играет ключевую роль в МГД-задачах, таких как работа бланкетов термоядерных реакторов в переходных режимах или перекачка жидкого металла. Интенсивность процесса традиционно характеризуется магнитным числом Рейнольдса (Rem). При Rem > 0.1–1 конвекция начинает доминировать над диффузией, что приводит к эффекту «вмораживания» поля. Однако критические значения Rem зависят от условий конкретной задачи.

В данной работе исследуется влияние граничных условий на результаты численного моделирования перекачки жидкого металла под действием гетерогенного магнитного поля (аналогично [1]). В этой задаче существенную роль в поведении потока жидкости играет явление выноса магнитного поля, а также, как видно из Рисунка 1, способ задания граничных условий для уравнений магнитного поля. Полученные результаты могут быть экстраполированы на широкий круг других задач в области МГД.

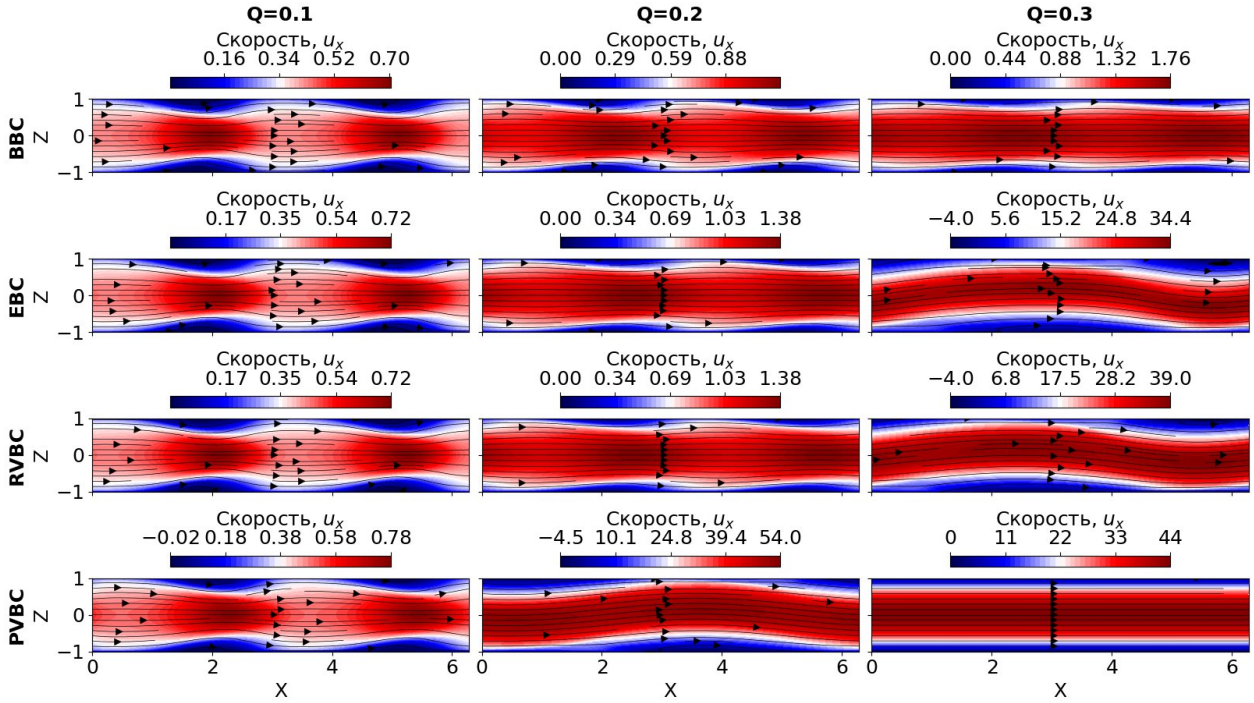


Рисунок 1. Сравнение результатов численного расчета распределений продольной компоненты скорости u_x при использовании в модели ГУ из [1] (BBC), «точных» ГУ с помощью псевдоспектрального метода (EBC), явного разрешение области (RVBC) и псевдовакуумных ГУ (PVBC) для значений Q=0.1-0.3, соответствующих обратному числу Стюарта.

Литература

[1] Vinod Bandaru, Julian Pracht, Thomas Boeck и др. Simulation of flux expulsion and associated dynamics in a two-dimensional magnetohydrodynamic channel flow// Theor. Comput. Fluid.Dyn. – 2015, т. 29 – с. 63–276

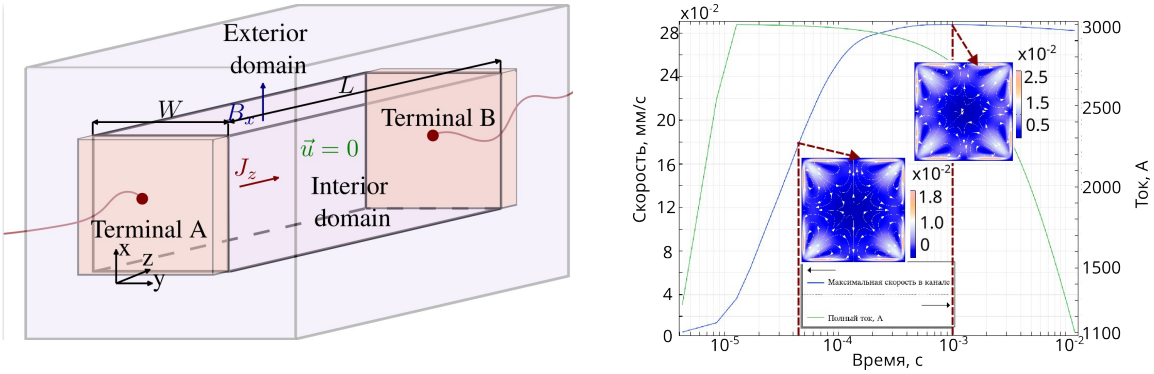
ИССЛЕДОВАНИЕ ИМПУЛЬСНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ТОКА НА ПОКОЯЩУЮСЯ ПРОВОДЯЩУЮ ЖИДКОСТЬ

Смольянов И.А. [1,2], Шмаков Е.И. [1,2] Листратов Я.И.[1], Беляев И.А.[1]

[1]*ОИВТ РАН, Москва*
[2]*Уральский федеральный университет, Екатеринбург*
i.a.smolyanov@gmail.com

Эффективная работа термоядерных реакторов требует работы в режимах близким к пороговым режимам стабильности, что неизбежно приводит к срыву плазмы. В этих режимах жидкость в бланкетах реакторов будет испытывать силовое воздействие из-за быстрого затухания магнитного поля, предназначенного для удержания плазмы в равновесии. В данной работе проводится количественная и качественная оценка электрического пробоя жидкого металла в сильных постоянных магнитных полях с целью воспроизвести импульсное действие магнитного поля в упомянутых переходных режимах.

Модель представляет собой область, состоящая из двух подобластей: области канала (**Interior domain**), заполненного электропроводящей жидкостью, и внешней области (**Exterior domain**), представляющей собой окружающую среду (см. Рис.1, А). К торцам канала (**Terminal A,B**) подводится импульсный электрический ток, а поперек току действует постоянное магнитное поле B_x. Зависимость максимального модуля вектора скорости в сечении канала от времени в процессе электрического разряда представлена на Рис. 1, Б. На графике также показаны структуры поля скорости в характерные моменты времени. Видно, что максимальные значения скорости достигаются менее чем за 1 мс после начала импульса, после чего наблюдается её монотонное затухание. Такая динамика объясняется возникновением в начальный момент времени (t ~ 0) сильной неоднородности в распределении плотности тока, связанной с процессом магнитной диффузии. Это приводит к локальному дисбалансу электромагнитных сил, который не компенсируется гидростатическим давлением стенок канала.



А) Б)

Рисунок 1. Схематичное представление задачи (А) и зависимость максимальной скорости и тока в канале от времени с пространственным распределением скорости в сечении канада (Б)

Литература

[2] Ivan Smolyanov и Oleg Zikanov, Exploratory study of liquid-metal response torapid variation of applied magnetic field //Phys. Rev. E. – 2025. –. doi: 10.1103/nm74-f77r

ИЗУЧЕНИЕ МЕХАНИЗМОВ ЛОКАЛИЗАЦИИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВИДАХ ДИНАМИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ КАК РЕЗУЛЬТАТА ПОВЕДЕНИЯ ДЕФЕКТНОЙ СТРУКТУРЫ МАТЕРИАЛА

Соковиков М.А.[1], Симонов М.Ю.[2], Чудинов В.В.[1],
Оборин В.А.[1], Уваров С.В.[1], Наймарк О.Б.[1]

[1]*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь,*
[2]*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь*
sokovikov@icmm.ru

Цель исследования: обоснование одного из механизмов локализации пластической деформации как результата эволюции дефектной структуры материала при различных видах динамического нагружения [1]. Осуществлены испытания образцов на разрезном стержне Гопкинсона-Кольского с применением высокоскоростной камеры Photron FASTCAM SA-Z 2100K и DIC технологии. Величины температурных полей, которые в процессе деформирования исследовались «in-situ» с использованием высокоскоростной инфракрасной камеры CEDIP Silver 450M, не подтверждают представления о механизме локализации деформации, связанном с термопластической неустойчивостью. Микроструктурный анализ, проведенный с помощью оптического интерферометра-профилометра и сканирующего электронного микроскопа, показал коррелированное поведение ансамбля дефектов, которое может быть классифицировано, как структурный переход, обеспечивающий локализацию деформации. Данные экспериментальных исследований и численного моделирования, проведенного с учетом особенностей кинетики накопления микродефектов в материале, позволяют предполагать, что один из механизмов локализации пластической деформации для исследованных материалов при реализованных условиях нагружения обусловлен скачкообразными процессами в дефектной структуре материалов [2-7]. Исследования осуществлялись в рамках госзадания ПФИЦ УрО РАН (тема № 124020200116-1).

Литература

[1] Наймарк О.Б. Коллективные свойства ансамблей дефектов и некоторые нелинейные проблемы пластичности и разрушения // Физическая мезомеханика. – 2003. – т. 6, № 4. – с. 45-72.

[2] Sokovikov M., Uvarov S., Simonov M., Oborin V., Chudinov V., Naimark O. Plastic strain localization mechanism in AlMg alloys as a result of jumpwise processes in the defect structure of materials // Procedia Structural Integrity. - 2023. – V. 47. – p. 693–697.

[3] Соковиков М.А., Симонов М.Ю., Чудинов В.В., Уваров С.В., Оборин В.А., Наймарк О.Б. Экспериментальное и теоретическое исследование структурных механизмов и эффектов локализации пластической деформации в сплаве АМг6 при динамическом нагружении // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2023. – №4. – с.110-120.

[4] Sokovikov M.A., Uvarov S.V., Simonov M.Yu., Chudinov V.V., Naimark O.B. Metastability, adiabatic shear bands initiation and plastic strain localization in the AMg6 alloy under dynamic loading // Frattura ed Integrità Strutturale. - 2024. - V.68. - p.255-266.

[5] Sokovikov M.A., Simonov M.Yu., Chudinov V.V., Uvarov S.V., Oborin V.A., Naimark O.B. Plastic strain localization in the AMg6 alloy under dynamic loading // Procedia Structural Integrity. – 2024. – V. 65. – p.265-274.

[6] Наймарк О.Б., Соковиков М.А., Чудинов В.В., Уваров С.В., Оборин В.А., Ледон Д.Р. Устройство для испытаний на сжатие образца материала на стержне Гопкинсона- Кольского // Патент на изобретение № 2773418. - 2022. - Зарегистрировано 03.06.2022. - Заявка № 2021123595 от 05.08.2021.

[7] Наймарк О.Б., Соковиков М.А., Чудинов В.В., Уваров С.В., Оборин В.А., Ледон Д.Р. Устройство для испытания на растяжение образца из хрупкого материала на стержне Гопкинсона -Кольского// Патент на изобретение № 2808953. - 2023. - Зарегистрировано 05.12.2023. - Заявка № 2023117325, 30.06.2023 от 30.06.2023.

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ПАКЕТА ДЛЯ КОЛИЧЕСТВЕННОГО АНАЛИЗА МОРФОЛОГИИ ПОВЕРХНОСТИ РАЗРУШЕНИЯ

Соколов А.М., Банников М.В.

Институт механики сплошных сред Уральского отделения РАН, Пермь
mbannikov@icmm.ru

На сегодняшний день для задач количественной фрактографии [1] имеющиеся решения характеризуются высокими требованиями в вопросах необходимых вычислительных мощностей. Кроме того, зачастую требуется промежуточное программное обеспечение (ПО), накладывающее дополнительные ограничения на организацию эксперимента.

В рамках работы разрабатывается решение, нацеленное на получение масштабных инвариантов: показателя Херста, длину корреляции[1-2]. Проведена модернизация имеющейся в лаборатории физических основ прочности программы в направлении адаптации к задачам с обработкой массивных объемов экспериментальных данных и снятием зависимости от иностранного ПО (MetroPRO от Zygo). В связи с этим, была поставлена цель создать модульный программный комплекс, подходящий для обработки больших массивов данных, с возможностью его масштабирования путем расширения номенклатуры поддерживаемых методов анализа морфологии.

В ходе разработки программного комплекса он был расширен дополнительным методом (MF-DFA) [3-4] для анализа мультифрактальных закономерностей морфологии поверхности исследуемых материалов. Высокая степень автоматизации позволила получить новые результаты, из которых удалось извлечь количественные характеристики, отображающие качественные изменения на поверхности разрушения.

Созданный программный комплекс с высокой степенью автоматизации обработки экспериментальных данных и эффективным использованием вычислительных ресурсов, позволил многократно ускорить количественный анализ морфологии поверхности разрушения: в десятки раз при полной автоматической обработке, и в несколько раз при частичной ручной.

Список цитируемой литературы:

1. Банников, М.В, Структурно-кинетические механизмы разрушения металлов в режимах много- гигацикловых усталостей: - УрО АН ИМСС, Пермь, 2013 – 139 с.

2. Neter J., Wasserman W., Kutner M.H. Applied Linear Statistical Models. – McGraw-Hill, 5-е изд., 2004. – Гл. 2.5, с. 47. – 1400 с.

3. Волчук В. Н. О применении вейвлетно-мультифрактального анализа в задаче оценки структуры металла // Вісник ПДАБА. 2015. №9 (210).

4. Lv Z., Chen C., Li R., Jin J., Hu B. Multifractal of acoustic emission for the multi-scale fracture behavior of diatomite modified concrete // Construction and Building Materials. — 2024. — Vol. 445. — Art. 137951. — ISSN 0950-0618.

Работа выполнена в рамках госзадания, регистрационный номер темы №124020200116-1.

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ 3D-БИОПЕЧАТИ НА ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОБРАЗЦОВ ИЗ ГИДРОГЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ КОЛЛАГЕНА МОРСКОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

Спорышева Д.И.[1], Виндокуров И.В.[1], Ташкинов М.А.[1], Куликова Ю.В.[2]

[1]*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь*
[2]*Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта, Калининград*
disporysheva@pstu.ru

Биопечать –это технология создания объёмных структур из живых клеток и биоматериалов с помощью 3D-принтеров, представляющая собой послойное нанесение биочернил. Она нужна для регенеративной медицины, печати тканей, органов, имплантов и моделирования болезней, чтобы решать проблемы дефицита донорских органов и персонализировать лечение. Для биопечати используют биочернила на основе гидрогелей, биополимеров и клеток: коллаген, альгинат, желатин, хитозан, гиалуроновая кислота, фибрин, а также различные синтетические полимеры. Кроме того, возможны различные вариации составов с несколькими ключевыми компонентами. В данной работе использовались коллаген, полученный из трех видов рыб (салака, семга, сельдь). В качестве сшивающего агента использовался альгинат натрия.

Основная цель данного исследования заключалась в подборе и отработке режимов 3D-биопечати, а также исследование механических свойств образцов различной геометрии, полученных из различных видов коллагена. Изготовление образцов производилась на 3D-биопринтере Rokit Dr. INVIVO 4D2, особое влияние уделялось подбору параметров печати таких как скорость экструзии, температура стола и сопла при печати, и как следствие вязкости гидрогеля. Печать отрабатывалась на нескольких геометриях образцов, при последовательной регулировке каждого из параметров. Произведена оценка геометрических характеристик полученных образцов до и после воздействия отвердителя, исследовано провисание геля при печати мостов. Проведены механические испытания на растяжение на универсальной испытательной машине Instron 68SC-5. Все испытания проводились при стандартных условиях. Установлено, что характеристики пленок на основе разного коллагена отличаются, гидрогели имеют разные вязкости, из-за чего параметры печати подбираются индивидуально, коэффициент усадки при взаимодействии с отвердителем также различный.

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

УСТАЛОСТНАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ В УСЛОВИЯХ МНОГООСНОГО НАГРУЖЕНИЯ

Староверов О.А. [1], Вильдеман В.Э. [1], Мугатаров А.И. [1], Сивцева А.В. [1]

[1]*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь*
oastaroverov@pstu.ru

Полимерные композиционные материалы, армированные волокнами, широко применяются в высоконагруженных узлах и объектах гражданской авиации, судостроения, автомобилестроения и др. благодаря таким преимуществам, как высокая коррозионная стойкость и меньший вес при высоких физико-механических характеристиках. При этом большинство конструкций из композитов в ходе эксплуатации подвергаются сложным режимам механических воздействий, которые не приводят к усталостному разрушению, однако, даже при малой продолжительности, могут снижать остаточные статические прочностные и деформационные характеристики материала [1, 2]. Для математического описания данных процессов на сегодняшний день разработаны различные модели описания усталостного повреждения композитов, среди которых можно выделить феноменологические модели остаточной жесткости и прочности, т.к. они являются наиболее простыми и доступными для использования в различных отраслях промышленности [3, 4]. Однако, не все из них способны описывать многостадийные зависимости остаточных характеристик композитов, в частности при многоосных воздействиях. Таким образом, актуальным является проведение комплексных экспериментальных и теоретических исследований механического поведения полимерных композитов в условиях предварительных многоосных циклических и последующих квазистатических воздействий с целью развития методов прочностного анализа композитных конструкций, повышения их надежности и безопасности.

В работе приводятся модифицированные экспериментальные подходы к исследованию закономерностей механического поведения полимерных композитов при комплексных механических воздействиях. Анализ результатов испытаний проведен на основе разработанного подхода, включающего аппроксимацию опытных данных моделями на основе использования интегральных функций распределения вероятности, построения диаграмм усталостной чувствительности с определением характерных пороговых точек перехода к критическим состояниям.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-79-10194, https://rscf.ru/project/25-79-10194/

Литература

[1] Вильдеман В.Э., Староверов О.А., Мугатаров А.И., Кучуков А.М. Усталостная чувствительность стеклопластиков в условиях пропорционального циклического растяжения с кручением // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика – 2023. – № 6. - с. 29-40.

[2] Wildemann V., Staroverov O., Strungar E., Mugatarov A., Kuchukov A. Mechanical Properties Degradation of Fiberglass Tubes during Biaxial Proportional Cyclic Loading // Polymers. – 2023. – Vol. 15, Iss. 9. – Art. 2017. – P. 1-22. DOI 10.3390/polym15092017.

[3] Staroverov O.A., Mugatarov A.I., Yankin A.S., Wildemann V.E. Description of fatigue sensitivity curves and transition to critical states of polymer composites by cumulative distribution functions // Frattura ed Integrità Strutturale = Fracture and Structural Integrity. – 2023. – Vol. XVII, Iss. 63. – P. 91-99. DOI 10.3221/IGF-ESIS.63.09.

[4] Staroverov O., Mugatarov A., Kuchukov A., Strungar E., Chebotareva E., Sivtseva A., Wildemann V. Influence of proportional multiaxial fatigue loading on the residual mechanical properties of glass-reinforced plastic pipes // Engineering Failure Analysis. – 2024. – Vol. 163, part. B. – Art. No. 108586. - P. 1-19.

СИЛОВОЙ ОТКЛИК МАГНИТОАКТИВНОГО ЭЛАСТОМЕРА: РОЛЬ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ

Столбов О.В., Райхер Ю.Л.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
sov@icmm.ru, raikher@icmm.ru

Магнитоактивным эластомерам (МАЭ) – дисперсиям ферромагнитных частиц в мягких полимерных матрицах – присуще разнообразие магнитомеханических эффектов, что делает их объектами высокого прикладного интереса. Сложность внутренних взаимодействий в композите, обусловливающих эти свойства, формирует запрос на построение физически обоснованных моделей отклика МАЭ на магнитные поля и механические нагрузки. Многофакторность и многомасштабность задачи приводит к тому, что набор предлагаемых моделей значителен и продолжает расширяться, приводя зачастую к противоречивым выводам. В этой ситуации любая теория с необходимостью требует проверки путём сопоставления с экспериментом, от которого, очевидно, требуется высокая достоверность.

В случае МАЭ получение точных данных оказывается нетривиальной задачей. Например, лишь тщательная проверка выявила [1], что многие опубликованные результаты измерения полевой зависимости комплексного модуля сдвига МАЭ с помощью ротационного реометра значительно искажены из-за wall-slip (проскальзывания) на границе образец / ротор.

В настоящей работе рассмотрен другой методический момент экспериментов с МАЭ – измерения т.н. магнитодеформационного эффекта в варианте, когда образец помещается между неподвижными обкладками реометра и намагничивается в осевом направлении. Магнитостатика, преодолевая упругость, стремится удлинить образец, однако, смещения торцов запрещены, и мерой эффекта является сила, регистрируемая тензодатчиком. Относительно этой удобной схемы активно обсуждается вопрос о том, как влияет на результат измерений шероховатость поверхности МАЭ и можно ли ослабить вредный вклад этого фактора, путём преднагрузки, то есть, осевого сжатия перед включением поля [2].

В рамках континуальной модели МАЭ была решена задача о силе, с которой торец цилиндра из МАЭ, помещённого в однородное поле, давит на неподвижную стенку. Поверхность торца не плоская, а представляет собой периодическую последовательность концентрических выступов (волн) с полусферическими вершинами (радиус R, число выступов n). Вершины выступов горизонтально срезаны сверху на величину δ. Таким образом, варьирование δ позволяет изменять тип соприкосновения МАЭ со стенкой от точечного контакта до полного прилегания. Силу, развиваемую образцом при его намагничивании, находили методом конечных разностей как производную полной энергии (упругая+магнитная) системы по перемещению торца образца. Показано, что общая «удлиняющая» сила с ростом количества волн уменьшается, стремясь к своему значению для случая плоской поверхности. Очевидно, что при экспериментах с МАЭ этот фактор может влиять на результаты измерений.

Работа выполнена в рамках госзадания, регистрационный номер темы 126020916888-9.

Литература

[1] Walter B.L., Pelteret J.-P., Kaschta J., Schubert D.W., Steinmann P. Preparation of magnetorheological elastomers and their slip-free characterization by means of parallel-plate rotational rheometry // Smart Materials & Structures. – 2017. – V. 26. – Art. no. 085004.

[2] Borin D.Yu., Odenbach S., Stepanov G.V. Stress induced by the striction of hybrid magnetoactive elastic composites // Journal of Magnetism & Magnetic Materials. – 2019. – V. 470. – P. 85–88.

ГЕНЕРАЦИЯ ИНЕРЦИОННЫХ ВОЛН НЕУСТОЙЧИВОСТЬЮ ЗОНАЛЬНОГО ТЕЧЕНИЯ ВО ВРАЩАЮЩЕМСЯ СФЕРИЧЕСКОМ СЛОЕ ЖИДКОСТИ

Субботин С.В. [1], Ширяева М.А. [1]

[1]*Пермский государственный гуманитарно-педагогический университет, Пермь*
subbotin_sv@pspu.ru, shiryaeva_ma@pspu.ru

Известно, что вращающаяся жидкость поддерживает внутреннее осциллирующее движение в виде инерционных волн, связанных с действием силы Кориолиса [1]. Эти волны могут непосредственно возбуждаться посредством внешнего гармонического воздействия, частота которого не превышает удвоенной частоты вращения системы, $|n| \le 2$. За пределами этого диапазона частот инерционные волны не существуют. Тем не менее, при переходе течения к турбулентному режиму пограничные слои могут испытывать неустойчивость и выступать в качестве источника волн [2]. В данной работе экспериментально исследуется устойчивость осреднённого зонального течения во вращающемся сферическом слое с осциллирующим ядром. При этом основное внимание уделено области частот осцилляций $n \ge 2$. Обнаружено, что повышение амплитуды колебаний приводит последовательному развитию различных мод неустойчивостей в объёме жидкого слоя. Первоначально пороговым образом возникает коротковолновая система вытянутых вдоль оси вращения валов, совершающих медленный азимутальный дрейф. При дальнейшем повышении надкритичности на смену приходят длинноволновые структуры, связанные с неустойчивостью сдвигового течения [3]. Анализ пульсационного поля скорости показывает, что неустойчивость сопровождается возникновением низкочастотных субгармоник $n \sim 0.1$, соответствующих спектру инерционных волн. Поскольку частота волны определяет направление распространения её энергии, медленное осциллирующее движение эквивалентно рождению столбчатой моды, вытянутой вдоль оси вращения системы. В работе исследуется влияние числа Экмана и безразмерной частоты колебаний ядра на пороги неустойчивостей и спектральный состав возмущений в полях скорости.

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда (проект 25-11-00358).

Литература

[1] Гринспен Х. Теория вращающихся жидкостей. – Гидрометеоиздат, 1975.
[2] Sauret A, Cébron D, Le Bars M. Spontaneous generation of inertial waves from boundary turbulence in a librating sphere // J. Fluid Mech. – 2013. – Vol. 728. – P. R5.
[3] Subbotin S., Shmakova N., Ermanyuk E., Kozlov V. Stewartson layer instability and triadic resonances in rotating sphere with oscillating inner core // Phys. Fluids. – 2022. – Vol. 34 (6). – P. 064103.

ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ И РАЗМЕРА ЗЕРНА НА ОБРАЗОВАНИЕ ТРЕЩИН В ОТЛИВКАХ ИЗ СПЛАВА ЭП202Л

Сумин А.А., Зайцев А.В.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь,
a.sumin@hotmail.com, a-zaitsev@mail.ru

Сплав ЭП202Л – это литейный никелевый сплав, который сочетает высокую жаропрочность с хорошими литейными свойствами и используется для изготовления деталей для авиационной и космической техники. В работе освоены и применены на практике методы исследования дефектной зеренной структуры отливок из жаропрочного никелевого сплава ЭП202Л. Выявлены и охарактеризованы дефекты различных типов в исследуемых отливках. Установлено, что горячие зародышевые трещины, плёны, а также газовая пористость являются основными факторами, которые приводят к образованию магистральных трещин отливок. Разработана и реализована методика подготовки образцов и анализа закономерностей зеренной структуры.

Разработана авторская методика количественной оценки размеров зерен с помощью пакета программ ImageJ, включающая выделение границ, выбор областей измерения и построение гистограмм распределения характерных размеров. Рассматривались следующие варианты определения параметров размерности длины в качестве характерных размеров: отношение площади зерен к его периметру, радиус описанной окружности, сторона квадрата или радиус круга, площади которых равны пощади зерна, диаметр Фере. Анализ распределения по размерам выявил преобладание мелкозернистой структуры. Однако было также показано наличие и количественную долю крупных и вытянутых зерен в разных образцах.

В результате проведенных исследований образцов, вырезанных из отливок жаропрочного никелевого сплава ЭП202Л до и после испытаний элементов конструкций, установлено существенное влияние размера и формы зерна на характер разрушения. Было обнаружено и экспериментально подтверждено, что: i) наличие крупных, особенно вытянутых (близких к игольчатым) зерен, а также их скоплений способствует зарождению и развитию трещин преимущественно по межзеренным границам; ii) наличие смежных областей и резкие переходы между областями с мелкозернистой и крупнозернистой структурой также способствует зарождению и развитию трещин преимущественно по межзеренным границам; iii) образование при кристаллизации равномерно распределенных мелких, средних или крупных равноосных зерен препятствует образованию трещин; iv) наличие сопутствующих дефектов (литейных плён, газовой пористости, оксидов на границах зерен) в сочетании с неблагоприятной зеренной структурой значительно усугубляет и ускоряет процесс трещинообразования.

Полученные экспериментальные результаты исследований образцов, вырезанных из отливок жаропрочного никелевого сплава ЭП202Л, позволили сформулировать важные вводы и практические рекомандации. Трещинообразование, особенно в никелевых сплавах, критически зависит от размера и формы зерен, наличия хрупких межзеренных фаз, а также чистоты сплава по примесям. Для устранения дефектов требуется комплексный подход, включающий модификацию состава сплава, оптимизацию термообработки и прецизионный контроль литейных процессов. Приоритет – создание структуры, состоящей из зерен мелкого, среднего и крупного размеров. Для решения проблемы требуется оптимизация литейных и термических процессов с акцентом на управление микроструктурой, а также коррекция режимов термообработки и контроль скорости охлаждения отливок.

ДИНАМИКА КРУПНОМАСШТАБНОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ ПРИ НАЛИЧИИ СЛАБЫХ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

Сухановский А.Н., Васильев А.Ю.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
san@icmm.ru

Турбулентная тепловая конвекция Релея-Бенара является простой системой для проверки различных гипотез и выявления основных механизмов, ответственных за формирование и развитие тепловой конвекции в различных природных и технических системах [1]. Особенностью турбулентной конвекции в замкнутой полости является формирование крупномасштабной циркуляции (КМЦ) в результате пространственной организации тепловых термиков. Важность изучения динамики КМЦ обусловлена тем, что её инверсии обеспечивают заметные низкочастотные колебания температуры, приводящие к термоциклическим нагрузкам в промышленных системах и повреждению их конструктивных элементов [2]. Недавние исследования показали, что относительно слабое воздействие двух или четырех источников с постоянными температурами может влиять на инверсии КМЦ в двумерной конвекции Релея-Бенара [3,4]. Конвективные течения в природе и в технологических устройствах обусловлены тепловыми граничными условиями второго рода, т.е. постоянным тепловым потоком, а не постоянной температурой. В данной работе представлены результаты исследования динамики КМЦ с постоянным тепловым потоком на горизонтальных границах и малым источником тепла на вертикальной стенке с периодическим во времени тепловым потоком. Исследование проводилось при помощи прямого численного моделирования конвекции Релея-Бенара в двумерной постановке. Основное внимание уделено роли расположения источника тепла и интенсивности нагрева. Обнаружено, что даже малый впрыск тепла через вертикальную стенку приводит к преимущественному направлению циркуляции. Наибольшее влияние на характеристики и динамику крупномасштабной циркуляции оказывает воздействие вблизи верхней границы. Подробно результаты исследования изложены в [5].

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024)

Литература

1. *Xia K.-Q.* Current trends and future directions in turbulent thermal convection // Theoretical and Applied Mechanics Letters. 2013. Vol. 3 P. 052001.
2. *Vasiliev A., Sukhanovskii A., Frick P., Budnikov A., Fomichev V., Bolshukhin M., Romanov R.* High Rayleigh number convection in a cubic cell with adiabatic sidewalls // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2016. Vol. 102 P. 201-212.
3. *Zhang S., Xia Z., Zhou Q., Chen S.* Controlling flow reversal in two-dimensional Rayleigh-Benard convection // Journal of Fluid Mechanics. 2020. Vol. 891. P. R4.
4. *Zhang S., Chen X., Xia Z., Xi H.-D., Zhou Q., Chen S.* Stabilizing/destabilizing the large-scale circulation in turbulent Rayleigh-Benard convection with sidewall temperature control // Journal of Fluid Mechanics. 2021. Vol. 915. P. A14.
5. *Sukhanovskii A., Vasiliev A.* Influence of local time-periodic heat forcing on the large-scale convective circulation in a square Rayleigh-Benard cell // Europhysics Letters (2025). 152 13001

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СПОСОБ ОЦЕНКИ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ УСИЛЕННОГО ЛЕДОВОГО ПОКРОВА

Сыромятников Д.И. [1], Сыромятникова А.С. [2]

[1]*Северо-Восточный федеральный университет им. М.К.Аммосова, Якутск*
[2]*Институт физико-технических проблем Севера СО РАН им. В.П. Ларионова, Якутск*
sdisoul@mail.ru, a.s.syromyatnikova@mail.ru

Цель - разработка способа оценки несущей способности ледового покрова, усиленного с применением композиционного материала на основе пресноводного льда и базальтового непрерывного волокна, разработанного авторами [1, 2].

Опытный полигон содержал 3 сектора размерами 10х5 м: I - естественный ледовый покров, II – с намороженными верхними слоями льда путем дождевания пресной водой, III – с намороженными верхними слоями льда путем дождевания пресной водой с содержанием 0,3 % (об.) базальтового волокна. Наполнитель представлял собой рубленое БНВ длиной 0,04 м и диаметром 18 мкм. Нагружение производилось ледовыми блоками, изготовленными из ледового покрова этого же водоема, что обеспечивает безопасность и экологичность испытаний и возможность контроля величины нагрузки. Толщина льда h_o (в 10^{-2} м), обеспечивающего безопасное нагружение весом P (в 10 кН), определяется по формуле $h_o=11P^{1/2}$ [3] и для h_o= 0,25-0,35 м составляет P = (60 – 70) кН. Определение упругого прогиба ледовой поверхности проводилось по показаниям оптического нивелира. Если рассматривать ледовый покров как упругую пластину на упругом основании, т.е. l считать упругим прогибом, то безопасное нагружение усиленного базальтовым материалом ледового покрова может составить P = 1016 кН, тогда как для чистого ледового покрова такой же толщины P = 650 кН, а для ледового покрова с намороженным водой слоем P = 720 кН.

Проведена экспериментальная оценка эффективности армирования БНВ ледового покрова водоемов в холодных регионах и установлено, что формирование на естественном ледовом покрове слоя толщиной 0,05 м из композиционного материала, содержащего 0,3% (об.) базальтовой фибры, позволяет увеличить несущую способность льда на 80 %.

Литература

[1] Сыромятникова А.С., Тихонравова Я.В., Местников А.Е., Сыромятников Д.И., Сибиряков М.М. Влияние содержания наполнителя и температуры кристаллизации на изгибную прочность и структуру композиционных материалов на основе пресного льда// Деформация и разрушение материалов. 2024. № 5. С.25-30.

[2] А.С.Сыромятникова, М.М.Сибиряков, Д.И.Сыромятников. Пат. RU 2799567 МПК E01D, 15/00, B32B 19/00, F25C 1/12 Композиционный материал на основе ледяной матрицы и базальтовой фибры. № 2022130808, Заявл. 28.11.2022, опубл. 06.07.2023. Бюл. № 19.

[3] ГОСТ Р 58948-2020. Дороги автомобильные общего пользования. Дороги автомобильные зимние и ледовые переправы. Технические правила устройства и содержания. – М.:Стандартинформ, 2020. – 89 с.

ДЕФОРМАЦИОННЫЙ ОТКЛИК ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ АУКСЕТИЧНЫХ СТРУКТУР ПРИ КОМБИНИРОВАННОМ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

Тарасова А.С.[1], Ташкинов М.А.[1]

[1]*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь*
a.tarasova@pstu.ru

Представлено численное исследование термомеханического поведения цилиндрической ауксетичной структуры, сформированной на основе повторно-входящих ячеек. Рассмотрено влияние геометрических параметров и свойств материала на деформационный отклик при термическом и совместном термомеханическом нагружении. Для построения моделей разработан параметрический алгоритм, позволяющий варьировать число ячеек, их конфигурацию и толщину элементов. Расчеты выполнены методом конечных элементов. Показано, что геометрия, масштаб структуры и внутреннее давление оказывают существенное влияние на радиальное расширение цилиндра, что подтверждает возможность создания конструкций с контролируемым термическим расширением.

Ауксетичные структуры с отрицательным коэффициентом Пуассона относятся к особому типу метаматериалов, которые при продольном растяжении расширяются в поперечном направлении. Такой эффект определяется их внутренней геометрией и позволяет формировать структуры с регулируемыми механическими свойствами. Цилиндрические структуры данного типа, в которых плоскость ауксетичности перпендикудярна оси цилиндра, представляют интерес для элементов, работающих при одновременном воздействии температуры и давления. Геометрия цилиндра формируется путем размещения повторяющихся ячеек между внутренним и внешним ограничивающими диаметрами. Ячейки распределяются по концентрическим окружностям и соединяются в единую решетчатую систему. Пространственная модель создается заменой линий объемными элементами с заданной толщиной и формированием узловых соединений. Основными варьируемыми параметрами являются число ячеек и толщина структурных элементов [1].

Выполнено моделирование при термическом и комбинированном нагружении. Установлено, что увеличение коэффициента термического расширения сопровождается ростом радиальной деформации, при этом ее величина существенно зависит от геометрии структуры. Случай совместного действия температуры и сжимающего давления свидетельствует о возможности компенсации температурного расширения за счет механического воздействия и, соответственно, целенаправленного управления деформационным состоянием структуры. Полученные результаты подтверждают возможность управления термомеханическим откликом цилиндрических ауксетичных структур путем задания термомеханических и геометрических параметров, а также условий нагружения.

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

Литература

[1] Tarasova A. S., Tashkinov M. A., Effect of variation of coefficient of thermal expansion on thermomechanical deformation of cylindrical in-plane auxetics based on re-entrant cells // PNRPU Mech. Bull. - 2024, no. 6. - pp. 60–71, doi: 10.15593/perm.mech/2024.6.06.

ЛОКАЛИЗАЦИЯ ОЧАГОВ ПОВРЕЖДЕНИЙ В ХРУПКИХ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛАХ

Ташкинов А.А. [1], Шавшуков В.Е. [1]

[1]*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь*
tash@pstu.ru, shavshukov@pstu.ru

Хрупкое разрушение является наиболее опасным типом разрушения конструкционных материалов в изделиях, зачастую развивающееся лавинообразно после появления первых микротрещин. Физические типы повреждений и разрушений весьма разнообразны даже для какого-либо одного класса материалов. Как правило разрушение есть многофакторный многостадийный процесс. Во многих важных случаях существенное значение имеют начальные стадии разрушений, условия и причины появления первых очагов повреждений, их последующего роста или торможения. В поликристаллических материалах хрупкие повреждения подразделяют на внутризеренные и межзеренные. В работе рассматривается внутризеренный механизм инициации хрупких разрушений. Физическим механизмом хрупкого разрушения зерен является скол по плоскостям спайности.

Поля напряжений в поликристаллических материалах являются случайными флуктуирующими полями. Первые повреждения, по тем или иным критериям, возникают в зернах с экстремальными значениями мезонапряжений. Такие состояния реализуются в случайно появляющихся при образовании поликристалла специфических группах зерен, названных экстремальными кластерами. Для вычисления вероятностей повреждений в таких зернах, необходимых для оценки надежности конструкций, требуется знание вероятностей распределения мезонапряжений в зернах. В работе применен метод интегральных уравнений для нахождения мезодеформаций в поликристаллическом теле [1]. По массивам решений для большого количества реализаций зеренных структур поликристалла восстанавливаются распределения мезодеформаций, а по ним мезонапряжений.

Вероятность появления повреждений в материале зависит от вероятностей образования экстремальных кластеров. Вероятность образования больших кластеров мала, но повреждения появляются при меньших макронагрузках. Вероятность образования малых кластеров (3-4 соседствующих зерна) существенно выше, но повреждения начинаются при больших макронагрузках. Разработанный формализм применен для анализа повреждений в углерод-углеродном материале эндопротезов человека, успешно применяемых в клинической практике.

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

Литература

[1] Шавшуков В.Е. Взаимодействие зерен и распределение упругих деформаций в поликристаллических материалах // Физическая мезомеханика. - 2024. – т. 27, № 2. – С. 112-123..

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ КОНЦЕНТРАТОРОВ НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Телепнев И.А., Романюк В.С., Кузнецова Е.В.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь
kuznetsovae@pstu.ru

Расчет на прочность деталей газотурбинных двигателей (ГТД) в настоящее время является актуальной задачей. Области применения ГТД разнообразны, но в основном такие двигатели широко используются в авиации и энергетике. Элементы двигателя работают в экстремальных условиях, а потому распределение напряженного состояния в опасных сечениях, влияние длительности воздействия агрессивных полей и сред, а также высокий уровень эксплуатационных нагрузок существенно влияют на надежность и долговечность. Особое внимание уделяется концентраторам напряжений, например, зонам геометрических неоднородностей, которые в многом и определяют ресурс конструкции [1].

Лопатки различных ступеней ГТД являются наиболее уязвимыми деталями, так как это тонкостенные детали, работающие в условиях сложнонапряженного состояния. Длительная эксплуатация, механическое воздействие, перегрузки при реализации различных полетных циклов, приводят к тому, что на наружных кромках лопаток при мониторинге и дефектоскопии фиксируются дефекты, растрескивания, так называемые забоины. Многолетний опыт эксплуатации, диагностики подобных дефектов и применение современных методов мониторинга показывают, что существует возможность ремонта и залечивания дефектов на кромках лопаток с целью продления срока эксплуатации без существенных потерь прочностных характеристик.

В работе исследуется влияние формы выреза и радиуса зачистки забоины на кромке лопатки на распределение напряженного состояния. На начальном этапе для реализации такого решения лопатка моделируется в упрощенном виде – в форме пластины, подверженной растяжению. Далее решается задача в аналитическом и численном виде с применением метода конечных элементов в программном пакете ANSYS, где проводится мультифизический анализа и визуализация распределения напряжений [2]. При моделировании нагружения пластины с вырезом для различных радиусов зачистки дефекта выявлены следующие зависимости: уменьшение радиуса скругления и сужение выреза резко повышает напряжения и коэффициент концентрации напряжений; увеличение ширины и радиуса выреза приводит к более однородному полю напряжений; а острые вырезы, трещины и дефекты являются зоной риска зарождения усталостных трещин.

Сравнительный анализ аналитического и численного решений показал, что наименьшее отличие по уровню напряжений между аналитическим и численным решениями 3–8% – для средних выемок, где максимальные значения напряжения в диапазоне 200–400 МПа. Концентрация напряжений у оснований острых выемок превышает 400 МПа, а уровень значений в аналитическом решении выше на 12–13% относительно таких же решений в численной реализации. Для пологих выемок, где значения напряжений менее 200 МПа, в аналитическом решении значения напряжений ниже на 18%, чем в численном, что является опасным для оценки прочности.

Литература

[1] Иноземцев А. А., Нихамкин М. А., Сандрацкий В. Л. Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок. – Том 1. – 2008. – 201 с.

[2] Басов К. А. ANSYS в примерах и задачах. – 2002. – 224 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕРМОЭЛАСТОПЛАСТОВ, НАПОЛНЕННЫХ УГЛЕРОДНЫМ ВОЛОКНОМ И МАГНИТНЫМИ ЧАСТИЦАМИ

Трухинов Д.К. [1], Лебедева Е.А. [1], Иванова Е.В. [1], Беляев А.Ю. [2], Свистков А.Л. [2], Астафьева С.А. [1]

[1]*«Институт технической химии Уральского отделения Российской академии наук» - филиал ПФИЦ УрО РАН, Пермь*
[2]*«Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук» - филиал ПФИЦ УрО РАН, Пермь*
dtruhinov@gmail.com, itch.elena@mail.ru, kornilicina.lena@mail.ru, belyaev@icmm.ru, svistkov@icmm.ru, astafeva.s@itcras.ru

В настоящее время термоэластопласты (ТЭП) привлекают всё большее внимание благодаря их гетерофазной структуре, которая позволяет сочетать технологические преимущества термопластов (возможность переработки методами экструзии и литья под давлением) с высокими показателями ударной вязкости и эластичности самого материала [1]. С учетом данных преимуществ ведется активная разработка полимерных композиционных материалов (ПКМ) на основе ТЭП. В числе наиболее перспективных наполнителей выделяются углеродные и минеральные материалы, способные обеспечить расширение функциональных свойств конечного ПКМ [1]. Одной из ключевых проблем при получении ПКМ на основе ТЭП является слабое межфазное взаимодействие на границе раздела полимер-наполнитель, которое осложняет переработку составов методом литья под давлением, вызывая неравномерное распределение и агломерацию дисперсной фазы, и, как следствие, снижение физико-механических и других функциональных свойств готового материала. Одним из решений этой проблемы является модификация поверхности наполнителей. Однако этот подход не универсален для разных марок ТЭП вследствие различий в химическом составе и структуре матрицы [2].

Целью работы является исследование структуры и функциональных свойств ПКМ, полученных методом литья под давлением, на основе двух различных марок ТЭП МК 120 и ТЭП МК 85А, наполненных магнетитовой рудой и короткими углеродными волокнами (УВ), прошедшими/не прошедшими стадию химического травления. Массовое соотношение компонентов (полимер:УВ:руда) для всех составов одинаково и равно 88:6:6. Определены параметры энергии активации вязкого течения расплава и физико-механические свойства ПКМ. Методом динамического механического анализа изучены вязкоупругие свойств композитов и сделаны выводы об анизотропии структуры в продольном и поперечном направлении деталей, полученных литьем под давлением.

Работа выполнена в рамках государственного задания; номер государственной регистрации темы 124022100088-6. Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Исследования материалов и вещества» ПФИЦ УрО РАН.

Литература

[1] Chang Y. W., Shin J. Y., Ryu S. H. Preparation and properties of styrene–ethylene/butylene–styrene (SEBS)–clay hybrids //Polymer international. – 2004. – т. 53. – № 8. – с. 1047-1051.

[2] Стрельников В. Н., Иванова Е. В., Лебедева Е.А., Трухинов Д. К., Астафьева С. А. Разработка и исследование свойств композиционных материалов на основе термоэластопластов с функциональными наполнителями // Авиационные материалы и технологии. – 2026. – т. 82. - № 1. – с. 195-208.

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ОБРАБОТКИ СПЛАВОВ АВИАЦИОННОГО НАЗНАЧЕНИЯ МЕТОДОМ LSP С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ ЛАЗЕРНОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ СКОРОСТИ (PDV)

Уваров С.В., Юрина А.Д.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
usv@icmm.ru

Ударно-волновое (УВ) нагружение металлических материалов, индуцированное лазерным воздействием (LSP), является перспективным методом обработки приповерхностных слоев, наиболее подверженных развитию усталостных дефектов и динамическому воздействию конструкций в аэрокосмической области, авиационном моторостроении. УВ инициируются высокоэнергетическим лазерным импульсом наносекундной Целью настоящей работы является обоснование инвариантных параметров для обоих типов нагружения и использование данного подхода для оптимизации режимов LSP применительно к обработке сплавов авиационного моторостроения. Фундаментальной основой являются результаты оригинальных экспериментальных исследований и моделирования поведения материалов при последовательных динамических (ударно-волновых) и усталостных (много- и сверхмногоцикловые) режимах нагружения. Это позволило установить связь автомодельных закономерностей формирования пластических волновых фронтов со стадийностью зарождения и развития усталостных трещин в нагруженных образцах и масштабными инвариантами, характеризующими структуру материалов, обеспечивающую различную длительную прочность. Результаты оригинальных широкодиапазонных экспериментов позволили предложить модели процессов ударно-волнового и усталостного разрушения, учитывающие структурные факторы [1;2]. На основе сопоставления данных ударно-волнового нагружения в терминах инвариантов действия и масштабных инвариантов, характеризующих режимы ударно-волновой обработки и стадийность усталостного разрушения, обсуждается подход по оптимизации условий лазерной обработки для обеспечения необходимого ресурса конструкций авиационного моторостроения. прочности [3].

Литература

[1] Naimark O. B., Bayandin Yu V, Zocher M. A. Collective properties of defects, multiscale plasticity, and shock induced phenomena in solids. Physical Mesomechanics, 2017, no.20, pp. 10-30.

[2] Naimark O., Oborin V., Bannikov M., Ledon D. Critical Dynamics of Defects and Mechanisms of Damage-Failure Transitions in Fatigue. Materials, 2021, vol.14(10), p.2554.

[3] Sundar R, Ganesh P, Gupta RK, Ragvendra G, Pant BK,

Kain V, Ranganathan K, Kaul R, Bindra KS. Laser Shock Peening and its Applications: A Review. Lasers in Manufacturing and Materials Processing, 2019, no 6, pp. 424–463 https://doi.org/10.1007/s40516-019-00098-8.

ФОРМИРОВАНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ КОМБИНИРОВАННОЙ ОБРАБОТКЕ: ЛУО И МАЛОПЛАСТИЧЕСКОЕ ВЫГЛАЖИВАНИЕ

Угольников М.В. [1], Гачегова Е.А.[1], Вшивков А.Н. [1], Изюмова А.Ю. [1], Кудряшев И.С. [1], Плехов О.А. [2]

[1] *Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*
[2] *Пермский федеральный исследовательский центр УрО РАН, Пермь*
ugolnikov.m@icmm.ru

В настоящее время для формирования технологически целесообразных сжимающих остаточных напряжений (ОН) применяются различные методы поверхностного пластического деформирования (ППД). Одним из наиболее перспективных направлений является лазерная ударная обработка (ЛУО). ЛУО является эффективным методом перераспределения остаточных напряжений в материале. При его использовании возможно образование зон растягивающий напряжений на поверхности материала. Одним из способов повышения эффективности ЛУО является его комбинация с традиционными методами ППД. Широкое распространение в качестве финишной обработки прецизионных деталей получил метод малопластического выглаживания (МПВ), относящийся к традиционным способам ППД. Его применение обеспечивает повышение размерной точности, снижение шероховатости, увеличение микротвердости и формирование сжимающих ОН в поверхностном слое [1].

Целью исследования является разработка устройства для МПВ и анализ совместного воздействия МПВ и ЛУО на формирование остаточных напряжений в титановом сплаве ВТ6. Пластины толщиной 3 мм были подвергнуты ППД в следующих вариантах: ЛУО, МПВ, МПВ (1 и 2 прохода), ЛУО + МПВ, 1 проход. Плотность мощности лазерного удара составляла 12,7 ГВт/см^2. Параметры МПВ: скорость – 80 мм/мин, усилие на инденторе – 200 Н, расстояние между линиями 0,1 мм. Измерение профиля ОН по толщине образцов для каждого типа обработки и на базовом материале проводилось методом сверления отверстия, так же была проведена оценка твердости по Роквеллу. Результаты измерения остаточных напряжений после обработки представлены в таблице 1. Твердость по Роквеллу изменилась на 13,3 % с 30 до 34 единиц.

Таблица 1. Результаты измерения остаточных измерений.

Вид обработки	Амплитуда сжимающих ОН σ_x, МПа	Амплитуда сжимающих ОН σ_y, МПа	Максимальная глубина сжимающих ОН σ_x, мм	Максимальная глубина сжимающих ОН σ_y, мм
Без обработки	-24	-49,4	0	0
ЛУО	-197,5	-250,5	0,575	0,525
МПВ (1 пр.)	-331,6	-211,7	0,4	0,4
МПВ (2 пр.)	-309,5	-217	0,35	0,35
ЛУО + МПВ	-372	-239,7	0,36	0,38

Литература

[1] Sticchi M., Schnubel D., Kashaev N., Huber N. Review of Residual Stress Modification Techniques for Extending the Fatigue Life of Metallic Aircraft Components // *ASME Applied Mechanics Reviews*. — 2015. — Vol. 67, No. 1. — Art. 010801. — DOI: 10.1115/1.4028160.

МЕТАСТАБИЛЬНОСТЬ АНТИЦИКЛОНИЧЕСКИХ ДОМЕНОВ ВО ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

Филатов С.В.

Институт Теоретической Физики им. Л.Д. Ландау РАН, Черноголовка
fillsv@issp.ac.ru

Экспериментально исследована вращающаяся турбулентность в кубическом аквариуме размером 1 м, возбуждаемая насосной накачкой без выделенной частоты. Такой способ накачки обеспечивает широкополосное возбуждение и позволяет изучать внутреннюю динамику самоорганизации потока без внешнего резонансного выбора мод. Поле скорости измерялось методом PIV в горизонтальной плоскости, перпендикулярной оси вращения.

Показано, что в зависимости от скорости вращения и интенсивности накачки система реализует три типа крупномасштабных состояний: циклонический домен, антициклонический домен и смешанный режим. Каждый домен представляет собой область с устойчивым знаком средней завихрённости, определяющим глобальное направление течения, внутри которой преимущественно циркулируют вихри того же знака. Построена фазовая диаграмма в координатах чисел Россби и Рейнольдса, демонстрирующая области существования различных режимов. Установлено, что циклонические домены реализуются при меньших значениях числа Россби, тогда как антициклонические домены возникают при больших значениях числа Россби.

Ключевым результатом является обнаружение метастабильности антициклонического режима. Показано, что он формируется только при специфических начальных условиях — при запуске вращения из состояния покоя, когда инерция жидкости приводит к образованию крупного антициклона. Однако такой режим неустойчив к внутренним флуктуациям и может спонтанно перейти в циклоническое состояние. При этом обратный переход при плавном изменении параметров не наблюдается, что свидетельствует о наличии гистерезиса и исторической зависимости динамики системы.

Полученные результаты демонстрируют, что выбор между конкурирующими крупномасштабными состояниями определяется не только текущими параметрами, но и начальными условиями.

Литература

[1] Tumachev D.D., Filatov S.V., Vergeles S.S., Levchenko A.A. Two dynamical regimes of coherent columnar vortices in rotating fluid // JETP Letters, 2023.

[2] Tumachev D.D., Levchenko A.A., Vergeles S.S., Filatov S.V. Observation of a large stable anticyclone in rotating turbulence // Physics of Fluids, 2024.

ТЕНЗОР ХИМИЧЕСКОГО СРОДСТВА В ХЕМОМЕХАНИКЕ

Фрейдин А.Б. [1], Михеев Е.В. [1], Иванова А.Б. [1,2]

[1]*Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Птербург*
[2]*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Птербург*
alexander.freidin@gmail.com, mchave21@outlook.com, alezandraivanova@mail.ru

Хемомеханика изучает взаимосвязи химических реакций, диффузии и механических напряжений. Появление напряжений вследствие деформации, сопутствующей химической реакции, и влияние напряжений на скорость химической реакции вплоть до ее блокирования – факты, подтвержденные многочисленными экспериментами и имеющие важное значение для инженерных приложений.

Рассматривается реакция между диффундирующим и деформируемым твердым компонентами, локализованная на фронте превращения. Реакция сопровождается собственной деформацией, порождающей напряжения, влияющие на скорость реакции вплоть до ее блокирования, и, вообще говоря, изменением реологических свойств материала. Получено новое выражение тензора химического сродства, позволяющее описывать влияние напряженно-деформированного состояния на кинетику химических реакций и учитывать участие в реакции диффундирующего компонента, находящегося по обе стороны фронта реакции. Введен параметр, характеризующий степень извлекаемости диффундирующего компонента, находящегося впереди фронта [1]. Исследуется, как этот параметр влияет на кинетику распространения фонта реакции. Обсуждается, как развитая модель может использоваться для описания объемных реакций при переходе от мезо- на макроуровень.

Затем, на примере превращения упругого материала в вязкоупругий, обсуждается влияние изменения реологии материала на кинетику распространения фронта реакции. Обсуждается роль релаксации напряжений в результате появления вязкоупругого продукта реакции [1,2].

Выделены два режима распространения фронта реакции: кинетический и квазиравновесный. В кинетическом режиме распространение фронта определяется нормальной составляющей тензора химического сродства, определяющей соответствующую конфигурационную силу. Квазиравновесный режим соответствует распространению фронта, при котором на фронте поддерживается химическое равновесие. Для обоих режимов получены кинетические уравнения, определяющие скорость фронта. Показано, что выбор режима определяется безразмерным параметром, определяемым коэффициентом диффузии, константой химической реакции и коэффициентом массопереноса через внешнюю границу [3] и играющим роль числа Дамкёлера, используемого в химической технологии.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 25-11-00274.

Литература

[1] Фрейдин А. Б., Михеев Е. В. О тензоре химического сродства в хемомеханике деформируемых тел // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2025. – № 5. – С. 155-167.

[2] Ivanova A. B., Freidin A. B. Coupled problems of chemo-mechanics: 1D-statements for elastic and viscoelastic solids // Lobachevskii J. Math. – 2025. – V. 46 – P. 2816-2828.

[3] Ivanova A. B., Freidin A. B. On kinetic and quasi-equilibrium modes of propagation of chemical reaction fronts in viscoelastic solids // Z Angew Math Mech. – 2026. – V.106. – e70336.

ОСОБЕННОСТИ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ЗАКРИТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ

Хмелев А.А., Мугатаров А.И., Вильдеман В.Э.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
a-khmelev.perm@mail.ru

Многие материалы в процессе деформирования вследствие накопления дефектов структуры (например, микротрещин) переходят в стадию разупрочнения [1], где проявляется закритическое деформирование материала – явление снижения действующих в физической точке напряжений при увеличении уровня деформаций [2]. При достаточной жесткости окружения физической точки напряжения в ней могут устойчиво снижаться вплоть до нуля [3]. Представляется целесообразным учет данной особенности поведения материалов при численном моделировании механического поведения ответственных конструкций для обеспечения безопасности при критических режимах работы.

Учет ниспадающей ветви диаграммы деформирования при применении метода конечных элементов связан со значительными трудностями. При использовании классических континуальных моделей возникает проблема зависимости получаемого решения от степени дискретизации конечно-элементной модели – при уменьшении размера элемента качественно изменяется поле пластических деформаций. Помимо этого, при переходе материала в стадию разупрочнения глобальная матрица жесткости системы теряет положительную определенность, что приводит к неустойчивости решения, и проявляется в появлении локализации деформаций в узких полосах шириной в один конечный элемент и реализации упругой разгрузки остального объема материала.

Данная работа посвящена исследованию проблем, связанных с зависимостью получаемого методом конечных элементов решения краевых задач с учетом закритической стадии деформирования материала от степени дискретизации конечно-элементной модели. Рассмотрены методы стабилизации решения, основанные на введении в определяющие соотношения характеристики материала с размерностью длины, а также учитывающие зависимость компонент тензора напряжений от скорости деформаций. Различными способами получены численные решения задач о растяжении плоских образцов с учетом разупрочнения материала. Определены границы применимости рассмотренных методов, проведено сопоставление расчетных полей деформаций с результатами экспериментальных исследований.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00765-П (https://rscf.ru/project/22-19-00765/).

Литература

[1] Агапов В.П., Маркович А.С., Дхар П., Голишевская Д.А. Напряженно-деформированное состояние сталефибробетона при сжатии с учетом разгрузки из области неупругих деформаций // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2024. – Т. 20, № 2. – С. 170-181.

[2] Вильдеман В.Э., Ломакин Е.В., Третьякова Т.В., Третьяков М.П. Закритическое деформирование и разрушение тел с концентраторами в условиях плоского напряженного состояния // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. – 2017. – № 5. – С. 22-29.

[3] Вильдеман В.Э., Третьяков М.П. Анализ влияния жесткости нагружающей системы на стадию закритического деформирования материалов // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2013. – № 3. – С. 49-57.

ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕЧЕНИЙ РАСПЛАВЛЕННОГО МЕТАЛЛА В ТЕПЛОМ ВЕРХЕ КРИСТАЛЛИЗАТОРА МАШИНЫ НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НА НЕГО МГД-ПЕРЕМЕШИВАТЕЛЯМИ РАЗЛИЧНОЙ КОНСТРУКЦИИ

Хрипченко С.Ю. [1], Тонков Е.Ю. [1]

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
khripch@icmm.ru, tonkov.e@icmm.ru

Улучшения качества отливаемых непрерывным способом слитков из алюминиевых сплавов, идущих для изготовления готовых изделий для автомобильной, авиационной и аэрокосмической промышленности методом прессования, можно осуществить МГД-перемешиванием жидкого металла в процессе его кристаллизации [1, 2]. МГД-перемешиватели имеют конструктивные отличия и по-разному влияют на жидкий металл, создавая течения разных топологий. Для сравнения эффективности работы данных конструкций необходимо знать картину течений, которую они создают [3].

В работе рассмотрены несколько вариантов конструкций МГД-перемешивателей, имеющих как трехфазные, так и двухфазные индукторы бегущего и вращающегося магнитного поля, а также перемешиватели, имеющие только один индуктор вращающегося поля, но создающий, как тороидальное, так и полоидальное течение жидкого металла в перемешиваемом объеме. В работе, путем численного моделирования, были получены картины течений, создаваемые различными конструкциями МГД-перемешивателей [4]. Авторами предложены динамические характеристики перемешивания, косвенно учитывающие диффузию и конвективный перенос примеси в объеме металла, и по которым можно судить об эффективности осуществляемого перемешивания. В данной работе в результате численного решения представлены поля скоростей в жидком металле с учетом формы поверхности раздела фаз. Для обеспечения интенсивного вращения без образования воронки на границе границы раздела фаз авторами данной работы предложено введение в теплый верх кристаллизатора перегородки, препятствующей переносу момента импульса вращаемого металла к его свободной поверхности в теплом верхе. Эффективность данного метода доказана путем моделирования поведения свободной поверхности при наличии перегородки в теплом верхе кристаллизатора.

Литература

[1] С.Г.Бочвар Новая концепция предельного измельчения структуры слитка алюминиевых сплавов в процессе непрерывного литья за счет внепечного комплекса модифицирования расплава. Технология легких сплавов, №1, 2011, с 12-21

[2] Borisov V.G., Production technologies of shaped articles made of aluminum alloys using the thixoforming technique// Problems and solutions. *Light Alloy Technology*. - 2016. - №. 2, pp. 48 – 51

[3] С. Ю. Хрипченко Теплоперенос в цилиндричесом тигле с жидким металлом при поочередном воздействии на него бегущего и вращающегося магнитных полей Инженерно-физический журнал// сентябрь–октябрь (2022) Том 95, № 5, с 1147-1154

[4] С.Ю.Хрипченко, Е.Ю.Тонков МГД-перемешиватели для машин непрерывного литья цилиндрических слитков Журнал технической физики, 2025, том 95, вып.8, с.1489-1497

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЕ ПАССИВНОЙ ПРИМЕСИ В ТЕПЛОМ ВЕРХЕ КРИСТАЛЛИЗАТОРА МАШИНЫ НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ КРУГЛЫХ СЛИТКОВ ПРИ ПЕРЕМЕШИВАНИИ ЖИДКОГО АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА МГД – ПЕРЕМЕШИВАТЕЛЯМИ РАЗЛИЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Хрипченко С.Ю. [1], Тонков Е.Ю. [1]

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
khripch@icmm.ru, tonkov.e@icmm.ru

При непрерывном литье круглых алюминиевых слитков важно получать равномерное распределение легирующих компонентов сплава и сторонних примесей. На распределение примесей в объеме жидкого металла можно влиять путем воздействия на жидкий металл переменным магнитным полем [1, 2]. В работе рассмотрены четыре различные конструкции МГД-перемешивателей, которые осуществляют этот процесс, и выполнен анализ их эффективности [3]. С использованием программного пакета COMSOL Multiphysics проведены численные эксперименты моделирующие процесс распространения примеси в жидком металле в теплом верхе кристаллизатора машины непрерывного литья [3, 4].

Распространение примеси в объеме моделировалось с учетом формы границы раздела фаз с учетом турбулентной диффузии, и конвективного переноса (массоперенос осущесвтляется по найденному стационарному распределению поля скорости жидкого металла [4]). В работе показана эволюция распространения примеси в жидком металле в теплом верхе кристаллизатора при воздействии на металл МГД-перемешивателями различных конструкций [3]. Для анализа эффективности работы рассматриваемых устройств введены коэффициенты неоднородности распространения примеси как во всем объеме металла, так и в области фронта кристаллизации слитка. На основе выбранных коэффициентов неоднородности распределения примеси в объеме перемешиваемого металла произведено сравнение эффективности работы рассматриваемых конструкций МГД-перемешивателей.

Литература

[1] Xun Zhang, Ye Wang∗∗, Dongrong Liu, Zesheng Ji, Hongyu Xu, Maoliang Hu, Pengxing Cui Effect of stirring rate on grain morphology of Mg-Al alloy semi-solid structure by phase field lattice Boltzmann simulation *Journal of Crystal Growth 543 (2020) 125704*

[2] Borisov V.G., Production technologies of shaped articles made of aluminum alloys using the thixoforming technique// Problems and solutions. *Light Alloy Technology*. - 2016. - №. 2, pp. 48 – 51

[3] С. Ю. Хрипченко, Е. Ю. Тонков, МГД-перемешиватели для машин непрерывного литья цилиндрических слитков, ЖТФ, 2025, том 95, выпуск 8, 1489–1497

[4] Khripchenko S. Yu., Tonkov E. Yu. Excitation of liquid metal flow in the warm top of a continuous casting machine crystallizer by a rotating magnetic field inductor with inclined poles Bulletin of the RAS: Physics DOI: 10.1134/S1062873825713820 2025, Vol. 89, Suppl. 1, pp. S41–S46

ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЯ ЛАНДАУ-ЛИФШИЦА-ГИЛЬБЕРТА ДЛЯ ОПИСАНИЯ НЕЕЛЕВСКОЙ РЕЛАКСАЦИИ

Чириков Д.Н., Зубарев А.Ю.

Уральский федеральный университет имени Б.Н. Ельцина, Екатеринбург
d.n.chirikov@urfu.ru, A.J.Zubarev@urfu.ru

Неелевский механизм перемагничивания играет ключевую роль в динамике однодоменных магнитных наночастиц, в частности при описании магнитной релаксации в коллоидных системах и биомедицинских приложениях. Аналитические оценки времени неелевской релаксации, полученные в рамках приближённых теорий, хорошо работают для одиночных частиц при ограниченных параметрах. Однако при описании систем, состоящих из большого числа магнитных частиц, применение аналитических методов становится затруднительным или невозможным, что обуславливает необходимость непосредственного численного моделирования динамики магнитного момента.

В настоящей работе проведено численное исследование неелевской релаксации однодоменной магнитной частицы на основе стохастического уравнения Ландау-Лифшица-Гильберта (ЛЛГ). В отличие от детерминированной формы уравнения ЛЛГ, стохастическая постановка требует специального численного подхода, обеспечивающего корректный учёт тепловых флуктуаций и сохранение физических свойств системы. При выборе численной схемы учитывались современные подходы к интегрированию стохастического уравнения ЛЛГ, подробно проанализированные в работе [1], посвящённой влиянию временной дискретизации на сохранение модуля магнитного момента и отсутствие нефизического дрейфа. В рамках работы разработан и реализован метод численного интегрирования стохастического уравнения ЛЛГ, применимый в широком диапазоне параметров.

Расчёты реализованы на языке программирования C с использованием технологии параллельных вычислений Open MPI, что позволило существенно сократить время моделирования. Используемая численная схема обеспечивает устойчивость расчётов и корректное воспроизведение релаксационной динамики без искусственного дрейфа магнитного момента, связанного с дискретизацией по времени.

Полученные численные значения времени неелевской релаксации по порядку величины согласуются с теоретическими оценками, приведёнными в работе [2]. Показано, что при увеличении внешнего магнитного поля согласие между численными результатами и теоретическими зависимостями улучшается, что связано с повышением применимости аналитических приближений в соответствующем параметрическом диапазоне.

Полученные результаты подтверждают корректность используемого численного подхода и демонстрируют возможность применения численного решения уравнения Ландау-Лифшица-Гильберта для исследования неелевской релаксации в широком диапазоне параметров. Разработанный программный код может быть использован для дальнейшего анализа магнитной динамики наночастиц с учётом различных механизмов диссипации.

Исследование проведено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (тема № FEUZ-2026-0016)».

Литература

[1] F. Roma, L. F. Cugliandolo, G. S. Lozano, “Numerical integration of the stochastic Landau-Lifshitz-Gilbert equation in generic time-discretization schemes”, Phys. Rev. E 90, 023203 (2014).

[2] J. Dieckhoff, D. Eberbeck, M. Schilling, F. Ludwig, “Magnetic-field dependence of Brownian and Néel relaxation times”, J. Appl. Phys. 119, 043903 (2016).

РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СВЕРХТЕКУЧИХ СИСТЕМ И МЕТОДЫ ИХ ИЗМЕРЕНИЯ

Шакиров Н.В., Судаков А.И.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
shakirov@icmm.ru

Для описания реологических свойств различных сред предложено огромное количество уравнений состояния, связывающих напряжённое и деформированное состояния. В зависимости от вида кривой течения принято разделять жидкости на вязкопластичные (содержащие в своих уравнениях предел текучести) и нелинейновязкие (псевдо пластичные). Кривые течения многих сред на некотором интервале (иногда большом) удовлетворительно могут описываться уравнениями как вязкопластичных, так и неньютоновских жидкостей. Однако реологическое поведение этих жидкостей качественно отличаются при малых скоростях сдвига ввиду присутствия предела текучести в реологическом уравнении вязкопластичной жидкости[1]. Водные суспензии бентонитовых глин являются (условно или практически) твёрдообразными системами. Эти системы при малых напряжениях сдвига обладают упругой областью, в которой они обнаруживают течение типа ползучести с практически постоянной весьма высокой вязкостью, которая на 6-7 порядков превышают измеренную вязкость при значительных скоростях сдвига. Многие расплавы и растворы полимеров характеризуются тем, что текут практически при напряжениях сдвига стремящихся к нулю [6]. В[4] обсуждаются ошибки, возникающие при применение регрессивного анализа для аппроксимации кривых течения. Аналогичные проблемы существуют при исследовании упругих сред[5]. Например, переносить результаты аппроксимации кривой течения при средних скоростях сдвига на малые скорости[2-3] Целью заявленного доклада является выявление наличия предела текучести у жидкости в процессе проведения капиллярных испытаний. Нахождение параметров выбранного уравнения состояния, аппроксимирующего кривую течения. Авторы благодарят Адамова А.А. за помощь в проведении численных расчётов.

Литература

[1] Howard A. Barnes The ‘Yield Stress Myth?’Paper – 21 Years On.// Appl.Rheol, - 2007, -№4. – p.1-4.
[2] А.Р. Хайрулин, А.А. Байдаров, А.А. Породиков, А.Г. Кучумов / A.R. Khairulin, A.A. Baydarov, A.A. Porodikov, A.G. Kuchumov. // Численный анализ гемодинамики в сонной артерии с учётом персонализированного подхода и различных моделей крови . 2020 MASTER`S JOURNAL № 1, с. 245-258.
[3] «Comparison of three rheological models of shear flow behavior studied on blood samples from post-infarction patients». A. Marcinkowska-Gapin´ska , J. Gapinski ,W. Elikowski , F. Jaroszyk , L. Kubisz 2007, Med Bio Eng Comput V. 45, p. 837-844.
[4] V.C. Kelessidis, R. Maglione, C. Tsamantaki, Y. Aspirtakis // Optimal determination of rheological parameters for Herschel–Bulkley drilling fluids and impact on pressure drop, velocity profiles and penetration rates during drilling. Journal of Petroleum Science and Engineering.- 2006, № 53, p. 203–224
[5] А.А. Адамов, Методологические проблемы экспериментального обоснования и верификации определяющих уравнений разномодульной теории упругости. // Прикладная механика и техническая физика, 2020, т.61, № 6.
[6] А.Я. Малкин, А.И. Исаев. Реология, Изд. «Профессия», С-Петербург, 2007, -.560 с..

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОЧНОСТИ ВЫСОКОНАГРУЖЕННЫХ КОМПОЗИТНЫХ КАРКАСНЫХ ПРОБИОНИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ

Шаныгин А.Н. [1]

[1]*Федеральное автономное учреждение «Центральный аэрогидродинамический институт им.профессора Н.Е.Жуковского», г.Жуковский*
info@tsagi.ru

В работе сформулирован и разработан подход по обеспечению статической ударной и длительной прочности ответственных высоконагруженных композитных конструкций применительно к объектам транспортной категории.

В рамках нового подхода рассматриваются композитные конструкции, сформированные на основе следующих бионических принципов построения:

- жёсткий каркас;
- набор эластичных обшивок;
- ударо-теплозащитные слои;
- встроенная система мониторинга технического состояния и внешнего нагружения [1].

Перечисленные выше компоненты конструкции формируют многоуровневую систему защиты для высоконагруженного композитного реберного каркаса, которая позволяет не только обеспечить ударную и длительную прочность конструкции с минимальными весовыми затратами, но и значительно снизить концентрации напряжений в зоне сочленения каркаса с обшивкой [2]. В процессе валидации предложенного подхода рассмотрены пробионическая конструкция цилиндрического отсека фюзеляжа и пробионическая конструкция панели крыла. Обе конструкции имели в качестве жёсткого каркаса – композитную сетчатую рёберную структуру, две плетёные композитные обшивки, два типа удара-тепло защитных слоёв и систему контроля деформаций конструкций с использованием оптоволоконных и пьезодатчиков.

В работе показаны основные особенности проектирования и обеспечения прочности композитных конструкций, используемые для формирования рациональных параметров пробионических конструкций, релевантных по отношению к требованиям, предъявляемым к ним и уровню внешнего нагружения. Приведены результаты решения модельных задач для пробионических отсеков фюзеляжа и панелей крыла перспективных гражданских самолетов.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение №075-15-2024-535 от 23.04.2024)

Литература

[1] S.L. Chernyshev, E.A. Dubovikov, A.A. Ionov, I.O. Kondakov, A.N. Shanygin, M.C. Zichenkov «Basic principles for creating light, efficient and safe structures for the next generation supersonic transport» Acta Astronautica 204 (2023) 728–737. https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2022.10.035 Online ISSN: 0094-5765

[2] Шаныгин А.Н. «Исследование положительной синергетики от взаимодействия однонаправленного каркаса и пространственно армированных обшивок для композитных панелей» В книге: Международный конгресс по аэронавтике. Сборник тезисов. Москва, 2023. С. 336-338.

ДЛИННОВОЛНОВАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО СЛОЯ ЖИДКОСТИ С ИНВЕРСИЕЙ ПЛОТНОСТИ ПРИ ЗАДАННОМ ТЕПЛОВОМ ПОТОКЕ С УЧЕТОМ ЭФФЕКТА МАРАНГОНИ

Шарифулин В.А., Любимова Т.П.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
vadsharif@bk.ru, lyubimovat@mail.ru

Рассмотрена линейная устойчивость плоского горизонтального слоя вязкой несжимаемой жидкости с квадратичной аппроксимацией температурной зависимости плотности, при постоянных тепловых потоках на твёрдой нижней и свободной верхней границах [1] с учётом термокапиллярного эффекта Марангони [2]. Стационарное теплопроводное состояние образует однопараметрическое семейство, параметризованное безразмерной координатой положения плоскости максимальной плотности (z_i) и числа Марангони (Ma). Выполнен длинноволновой асимптотический анализ (волновое число $k \to 0$) линеаризованной задачи. Получена аналитическая формула для критического числа Рэлея $Ra = (20/3)(48 - Ma)/(z_i - 5/9)$. Построены карты режимов в плоскости параметров (z_i, Ma). Установлена граница между областями длинноволновой и ячеистой первичной неустойчивости. Обнаружены две обычные точки двойного вырождения и одна тройная критическая точка (5/9,48) высокой коразмерности, служащая локальным организующим центром нейтральной поверхности и разделяющая окрестность на секторы с различными типами первичной неустойчивости и характера бифуркации (мягкая/жёсткая). В некоторых секторах прогнозируется субкритическое возбуждение конвекции, качественно согласующееся с известными численными [3] и экспериментальными данными.

Литература

[1] Lyubimov D.V., Lyubimova T.P., Sharifulin V.A. Onset of convection in a horizontal fluid layer in the presence of density inversion under given heat fluxes at its boundaries // Fluid Dynamics. – 2012. – Vol. 47. – N. 4. – P. 448-453.

[2] Pearson J.R.A. On convection cells induced by surface tension // Journal of Fluid Mechanics. – 1958. – Vol. 4. – N. 5. – P. 489-500.

[3] Шарифулин В.А., Любимова Т.П. Надкритические конвективные течения талой воды в открытой горизонтальной прямоугольной области с заданным вертикальным тепловым потоком // Вычислительная механика сплошных сред. – 2021. – Т. 14. – № 4. – С. 472-484.

ЛИНЕЙНАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ СТАЦИОНАРНОГО ТЕЧЕНИЯ ВЯЗКОУПРУГОЙ ЖИДКОСТИ В КВАДРАТНОЙ ПОЛОСТИ ПРИ СДВИГОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ И ПЛАВУЧЕСТИ

Шарифулин В.А., Любимова Т.П.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
vadsharif@bk.ru, lyubimovat@mail.ru

Рассматривается линейная устойчивость двумерного стационарного течения несжимаемой вязкоупругой жидкости в квадратной полости при совместном действии сдвигового воздействия на верхней границе (число Рейнольдца Re – безразмерная скорость движения крышки) и термогравитационной конвекции (число Рэлея Ra). Реология описывается моделью Oldroyd–B [1] с безразмерным временем релаксации τ и параметром ε, определяющим долю ньютоновской вязкости. Стационарное основное течение аппроксимируется одномодовой галёркинской функцией, согласованной с граничными условиями. Линеаризация относительно этого состояния и проекция Галёркина приводят к задаче на собственные значения с матрицей 5×5 для каждой продольной моды m. Показано, что целые волновых числах m вызывают блокировку матрицы: одна вязкоупругая комбинация амплитуд полностью отделяется. Это позволяет строго редуцировать задачу к матрице 4×4 без потери информации об опасных модах неустойчивости. Получены явные аналитические выражения для всех элементов редуцированной матрицы. На основе характеристического многочлена четвёртой степени сформулированы аналитические критерии монотонной и колебательной неустойчивостей. Для каждой моды m вычисляется максимальная скорость роста возмущений. Построены карты доминирующих мод и границы смены доминирования в плоскости параметров (ε, S), где $S = \mathrm{Re}\cdot\tau$. Исследован коротковолновый предел $m \to \infty$: получена асимптотика ведущего собственного значения и выявлен естественный управляющий параметр $S\cdot\tau$, определяющий порог монотонной неустойчивости независимо от номера моды. Результаты дают полную линейную фазовую диаграмму устойчивости смешенного конвективного течения вязкоупругих жидкостей и служат основой для последующего нелинейного анализа режимов [2].

Литература

[1] Bird R.B., Armstrong R.C., Hassager O. Dynamics of Polymeric Liquids. – New York: Wiley, 1987. – Vol. 1.

[2] Al-Mubaiyedh U.A., Sureshkumar R., Khomami B. Influence of viscoelasticity on the stability of Taylor–Couette flow // J. Fluid Mech. – 2002. – Vol. 462. – P. 85-114.

МНОГОУРОВНЕВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИ РАЗРАБОТКЕ СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ГОРЯЧЕГО И СВЕРХПЛАСТИЧЕСКОГО ФОРМОВАНИЯ

Швейкин А.И., Шарифуллина Э.Р., Вшивкова А.А, Вильдеман В.Э., Оглезнева С.А.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
shveykin@pstu.ru, ersharifullina@pstu.ru, aavshivkova@pstu.ru, wildemann@pstu.ru, ogleznevasa@pstu.ru

Эксплуатационные свойства изделий определяются состоянием внутренней структуры материала, поэтому для совершенствования существующих и разработки новых технологий формования изделий из металлов и сплавов необходимы модели материалов, позволяющие описывать изменение их структуры. В связи с этим сегодня одним из доминирующих направлений в механике материалов является развитие ориентированных на решение данной проблемы многоуровневых конститутивных моделей материалов [1].

При формовании перспективным является использование режима сверхпластичности, поскольку позволяет получать изделия разнообразных сложных форм со сниженным весом без сварных или клепаных соединений с гладкой поверхностью и улучшенными физико-механическими характеристиками. Это обусловливает широкое применение сверхпластической штамповки и формовки, в частности, в авиа- и ракетостроении [2].

Предлагаются модификации ранее созданных моделей алюминиевых сплавов [1], включающие описание горячего и сверхпластического деформирования, переходных режимов, путем детального учета динамической рекристаллизации, зернограничного проскальзывания и взаимодействия дефектных субструктур, влияния легирующих добавок [3], обобщения моделей на случаи повышенных температур и произвольного изменения температурно-скоростных условий. В частности, было проведены экспериментальные, материаловедческие исследования и моделирование сверхпластического деформирования из современного российского промышленного алюминиевого сплава 1565ч при различных условиях; установлено, что модель позволяет описать наблюдаемые в экспериментах закономерности при разных сценариях деформирования.

Разработан пакет модулей, реализующий созданные многоуровневые конститутивные модели, интегрируемый с решателями краевых задач МДТТ методом конечных элементов, что позволяет проводить углубленное моделирование и проектирование многостадийных технологических процессов формования и термомеханической обработки изделий. Проведено моделирование формования изделий из сплава 1565ч.

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

Литература

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

[2] Мулюков Р.Р., Имаев Р.М., Назаров А.А. и др. Сверхпластичность ультрамелкозернистых сплавов: эксперимент, теория, технологии. – М.: Наука. 2014. – 284 с.

[3] Шарифуллина Э.Р., Швейкин А.И., Трусов П.В., Вшивкова А.А. Многоуровневая модель с учетом влияния легирующих добавок для описания сверхпластичности алюминиевых сплавов // Физическая мезомеханика. – 2026. – Т. 29, №2. – Принята к печати.

РАСЧЕТ СТАТИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ МИНИМАЛЬНОЙ РАЗРУШАЮЩЕЙ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ ДИСКА 6-7 СТУПЕНИ РОТОРА КВД

Шерстобитова К.А., Кузнецова Е.В.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
ksushenz@mail.ru, kuznetsovae@pstu.ru

Диски ротора компрессора высокого давления (КВД) являются критически важными элементами газотурбинного двигателя (ГТД), работающими в условиях высоких температур и циклических нагрузок [1]. Обеспечение их надежности и ресурса требует постоянного совершенствования методик проектировочного расчета и обоснования вносимых конструктивных изменений [2].

В работе выполнена оценка влияния утолщения ступицы и замены материала диска 6-7 ступени ротора КВД на его статическую и предельную прочность. Исследование проводилось в два этапа с использованием метода конечных элементов. Расчет напряженно-деформированного состояния выполнен в программном пакете ANSYS v17.2.

На первом этапе выполнен статический расчет изолированного диска в осесимметричной постановке (используются гипотезы плоского напряженного состояния и осесимметричного нагружения). На втором этапе проведено 2D-моделирование процесса раскрутки ротора с учетом пластических деформаций, контактных взаимодействий, газовых и осевых сил для определения разрушающей частоты вращения.

В результате сравнительного анализа четырех конфигураций (две геометрии и два материала) установлено, что требования норм прочности по статической прочности выполняются только для утолщенной ступицы из нового материала. Минимальная расчетная разрушающая частота вращения ротора составила 22 871 об/мин, что обеспечивает эксплуатационный запас относительно максимальной рабочей частоты 16 100 об/мин. Расчет напряженного состояния при предельных нагрузках показал, что ступица является наиболее нагруженной зоной, что обосновывает необходимость ее конструктивного усиления.

Таким образом, комплексный расчетно-экспериментальный анализ подтвердил работоспособность предложенного в работе конструктивного решения (утолщение ступицы) в сочетании с новым материалом. Определен запас прочности и предельные характеристики диска, что вносит существенный вклад в обоснование надежности перспективных авиационных двигателей.

Литература

[1] Вьюнов С.А., Гусев Ю.И., Карпов А.В. и др. Конструкция и проектирование авиационных газотурбинных двигателей: учебник для вузов по спец. «Авиационные двигатели и энергетические установки». – Москва : Машиностроение, 1989. – 564 с.

[2] Иноземцев А.А., Нихамкин М.А., Сандрацкий В.Л. Динамика и прочность авиационных двигателей и энергетических установок: учебник для вузов по спец. «Авиационные двигатели и энергетические установки» – Москва : Машиностроение, 2007. – 204 с.

РЕАЛИЗАЦИЯ ДАЛЬНОМЕРА НА ОСНОВЕ ОПТИЧЕСКОЙ РЕФЛЕКТОМЕТРИИ ЧАСТОТНОЙ ОБЛАСТИ

Шестаков А.П., Камбур Д.А., Константинов Ю.А.,

Шардаков И.Н., Белокрылов М.Е., Клод Д.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
shap@icmm.ru, kambur.d@icmm.ru, konstantinov.y@permsc.ru,
shardakov@icmm.ru, belokrylov.m@icmm.ru, cdf750@icmm.ru

Безопасная эксплуатация природных и техногенных систем может быть обеспечена методами деформационного мониторинга. В основе которых, как правило, лежит измерение перемещений и деформаций в различных точках контролируемого объекта. На данный момент существуют различные способы измерения этих величин. Одним из них является метод оптической рефлектометрии частотной области. Обычно он применяется для непрерывного измерения деформаций вдоль оптического волокна. Однако его также можно использовать для измерения расстояний. В этом случае измерение перемещений и деформаций может выполнятся одним устройством, что снижает стоимость системы мониторинга. Кроме этого, измерение расстояний методом оптической рефлектометрии обладает достаточно высокой точностью. В рамках этой работы достигнута погрешность измерений 2 мкм. Следует отметить, строительные дальномеры позволяют определять расстояния с существенно меньшей точностью – 1мм. Этого не всегда достаточно для осуществления контроля за переходом объекта мониторинга из проектного состояния в критическое. Интерферометрические методы измерения перемещений обладают самой высокой точностью – 1нм. Однако они определяют величину перемещения а не дистанцию. В случае когда лазерный луч пересекает посторонний объект или процесс измерения прерывается, то однозначность измерений пропадает. Поэтому применение метода оптической рефлектометрии для измерения расстояний в воздушной среде имеет хорошие перспективы.

Система измерения расстояния включает в себя следующие компоненты: рефлектометр, оптическое волокно, коллиматор и уголковый отражатель. Рефлектометр подключается к оптическому волокну. На другом конце волокна устанавливается коллиматор. Он позволяет вывести оптическое излучение из волокна в воздух и направить его на уголковый отражатель. В результате образуется гетерогенная оптическая линия, одна часть которой представлена оптическим волокном а вторая воздухом. Показатели преломления и функции хроматической дисперсии этих сред существенно отличаются. Это сильно снижает точность измерений. В работе предложен метод позволяющий исключить негативное влияние этих факторов на результаты измерений. Также предложен метод калибровки измерительной системы. Он основан на сравнении показаний рефлектометра и интерферометра. В результате определен калибровочный параметр, обеспечивающий точность измерения расстояния 2мкм. Полное описание этого исследования дано в работе [1].

Литература

[1] Shestakov A., Kambur D., Konstantinov Y., Belokrylov M., Claude D., Shardakov I., Turov A., Implementation of a Length Gauge Based on Optical Frequency Domain Reflectometry (OFDR) //Sensors. – 2026. – т. 26, №. 2. – с. 393-412.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МЕЗОСТРУКТУРЫ ПОЛИМЕРНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА МАКРОДЕФОРМАЦИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ

Шипунов Г.С. [1], Паньков А.А. [1]

[1]*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь*
gsshipunov@yandex.ru

Современная авиация активно использует полимерные композиционные материалы (ПКМ), доля которых в конструкциях перспективных летательных аппаратов достигает 40–50% [1]. Однако их эксплуатация сопряжена с риском скрытых дефектов: расслоений, микроповреждений от ударных нагрузок и температурной деградации, которые традиционные методы неразрушающего контроля (НК) выявляют с запаздыванием до 30% от критического срока. Это обуславливает необходимость внедрения систем непрерывного мониторинга, интегрированных непосредственно в структуру материала.

Фотонные технологии, в частности волоконно-оптические датчики (ВОЛС) на базе брэгговских решеток, предлагают принципиально новый подход: они обеспечивают точность измерения деформаций до ±0.02% [2] и температурную стабильность в диапазоне -50…+300°C [8], что в 3 раза превосходит возможности пьезоэлектрических аналогов. Экспериментальные исследования [3,4] подтвердили их эффективность для обнаружения микродефектов размером от 0.3 мм при динамических нагрузках до 1 кГц, что критически важно для узлов авиационных двигателей.

Цель работы — разработка и промышленная апробация системы мониторинга состояния композитных конструкций на основе фотонных технологий, обеспечивающей:

Раннее обнаружение дефектов (на 15% раньше традиционных методов) за счет алгоритмов машинного обучения, анализирующих неоднородности полей деформаций.

Минимизацию влияния сенсорного слоя на механические характеристики ПКМ (снижение прочности не более 2%).

Интеграцию с системами управления летательным аппаратом через беспроводные интерфейсы с задержкой передачи данных менее 0.1 сек.

Литература

[1] Shipunov G.S., Baranov M.A., Nikiforov A.S., Khabibrakhmanova F.R. Comparison of mechanical strain measurement accuracy of fiber-optic sensor and smart-layer / Shipunov G.S., Baranov M.A., Nikiforov A.S., Khabibrakhmanova F.R. // Mater Phys Mech. Institute for Problems in Mechanical Engineering, Russian Academy of Sciences, – 2022. – Vol. 48, – № 3. – P. 342 – 354.

[2] Shipunov G.S., Baranov M.A., Nikiforov A.S. Research of the features of creating a smart layer using 3D printing technology / Shipunov G.S., Baranov M.A., Nikiforov A.S. // AIP Conference Proceedings / ed. E.A. K., V.M. F. American Institute of Physics Inc., – 2022. – Vol. 2509.

[3] Liu Y., Shen R., Niu D., Yan W., Zhang Y., Du G. A novel MFBG pressure sensor based on the thin-wall strain cylinder with temperature compensation / Liu Y., Shen R., Niu D., Yan W., Zhang Y., Du G. // https://doi.org/10.1117/12.823167. SPIE, – 2009. – Vol. 7278. – P. 312–318.

[4] Fedorov A.Y., Kosheleva N.A., Matveenko V.P., Serovaev G.S. Strain measurement and stress analysis in the vicinity of a fiber Bragg grating sensor embedded in a composite material / Fedorov A.Y., Kosheleva N.A., Matveenko V.P., Serovaev G.S. // Compos Struct. Elsevier, – 2020. – Vol. 239. – P. 111844 .

ПОВЕРХНОСТНЫЙ ЭФФЕКТ ПРИ НАКОПЛЕНИИ ВОДОРОДА В МЕТАЛЛАХ И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ

Яковлев Ю. А.

Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург

yayua@ipme.ru

Металлические конструкции химических, нефтехимических и газохимических реакторов, а также энергетического оборудования находятся под внешней нагрузкой в агрессивной внешней или внутренней среде. Для таких конструкций характерно непредсказуемое, хрупкое разрушение несущих элементов.

При испытаниях металлических образцов установлено, что в агрессивной водородосодержащей среде под поверхностью метала формируется тонкий слой, насыщенный молекулярным водородом. Концентрация водорода в этом слое достигает сотен ppm. Толщина такого слоя составляет 50–200 мкм. При этом наблюдается его сильное влияние на напряженно-деформированное состояние всего образца.

При насыщении водородом металлических конструкционных элементов, находящихся при эксплуатации под действием механических напряжений, также происходит его неравномерное накопление. Практически весь поглощённый металлом водород поначалу концентрируется в скин-слое. Сформировавшийся скин-слой приводит к замедлению дальнейшего поглощения водорода и некоторое время препятствует его более глубокому проникновению внутрь металла, оказывая пассивирующее действие.

С механической точки зрения, в стабильном положении, из-за большого содержания водорода скин-слой оказывается сжатым, тогда как внутренняя часть металла испытывает растягивающие напряжения. Возникающий градиент напряжений постепенно активирует диффузию водорода внутрь металла. При этом начинается прежде всего, диффузия слабо связанного, приповерхностного водорода в область максимальных растягивающих напряжений. Это приводит к локальному увеличению концентрации водорода в глубине металла и вызывает его объемное охрупчивание.

Наличие внешней нагрузки может ускорять этот процесс, формируя положительную обратную связь: внешняя нагрузка – увеличение поглощения водорода – снижение прочности – рост трещин.

В результате такого накопления водорода напряженно-деформированное состояние конструкционного элемента становится существенно неоднородным. При большом градиенте концентрации водорода максимум растягивающих напряжений смещается внутрь элемента. Возникают дополнительные растягивающие напряжения, достаточные для образования зародышевых трещин даже при относительно небольшой внешней нагрузке.

Таким образом, поверхностный эффект при взаимодействии металла с водородом проявляется в том, что тонкий приповерхностный слой локально изменяет напряженно-деформированное состояние и служит инициатором объемного водородного охрупчивания или ускоренного разрушения. На практике это выражается в резком снижении пластичности металла с последующим переходом к непрогнозируемому хрупкому разрушению.

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПОНИЖЕННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КАЧЕСТВЕННЫХ И ДЕФЕКТНЫХ ОБРАЗЦОВ АКП

Ганзий Ю.В. [1], Дородов П.В. [2], Чекмышев К.Э. [3], Петров В.А. [4]

1 Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН, Ижевск
2 ФГБОУ ВО «Удмуртский ГАУ», Ижевск
ganziy@udman.ru, Pvd80@mail.ru, chekk.90@mail, rupva.agrolog@mail.ru

Арматура композитная полимерная (АКП) является высокоэффективным альтернативным аналогом стальной арматуры и широко применяется в конструкциях, работающих, как на растяжение, так и на сжатие. Анализ влияния пониженной температуры на механические свойства качественных и дефектных образцов АКП диаметрами 8 и 10 мм выполнен на основании эксперимента, проведенного на прессе в лаборатории «Сопротивления материалов» ФГБОУ ВО «Удмуртский ГАУ».

Перед началом испытаний образцы выдерживались при комнатной и отрицательной температурах сутки для стабилизации материала. Образцы помещались внутрь климатической камеры, поддерживающей температуру минус *-15 C^o*. Затем образцы помещались в зажимы испытательной машины таким образом, чтобы обеспечить равномерное распределение нагрузки вдоль оси стержня. Охлажденные образцы извлекались из камеры и быстро переносились в испытательную машину, повторяя процедуру нагружения аналогично испытаниям при +20 градусах. Фиксируя деформационные характеристики образцов вплоть до разрушения, построены графики зависимости приложенной силы от изменения длины образцов. По результатам испытаний определена сила разрушения, деформация при предельной нагрузке и вычислен модуль упругости АКП.

Рисунок 1 – Дефектный образец до и после испытаний

При тех же условиях, испытаны образца, имеющие дефект внутри структуры композита вследствие внутренних напряжений, возникающих при производстве. Эти повреждения снижают прочность материала и увеличивают риск разрушения при нагрузках.По завершении всех испытаний произведена обработка экспериментальных данных.

Полученная информация позволяет оценить влияние температуры на механические свойства полимерной арматуры.

Литература

[1] Дородов, П. В. Обоснование модернизации пруткового элеватора копателя-сборщика картофеля КСК-1 путем использования композитных материалов / П. В. Дородов, П. Л. Максимов, Н. Д. Давыдов // Техника и оборудование для села. – 2017. – № 6. – С. 27-31. – EDN ZBMMQD.

[2] Численное исследование процесса нагрева композитной арматуры из непрерывных стеклянных и углеродных волокон в печи полимеризации / К. Э. Чекмышев, С. С. Макаров, М. Ю. Альес, Ю. В. Ганзий // Химическая физика и мезоскопия. – 2025. – Т. 27, № 4. – С. 526-537. – DOI 10.62669/17270227.2025.4.49. – EDN YAFNPS.

Научное издание

Механика в новых материалах, конструкциях, технологиях
Пермь, 25 – 27 марта 2026 г.
Тезисы докладов

Утверждено к печати ученым советом
«Института механики сплошных сред
Уральского отделения Российской академии наук» -
филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Пермского федерального исследовательского центра
Уральского отделения Российской академии наук

Издается в авторской редакции
Оригинал-макет - Юрлова Н.А.

614018, г. Пермь, ул. Академика Королева, 1
«ИМСС УрО РАН»

Подписано в печать 10.03.2026 Формат 60x84 1/16
Бумага офсетная. Усл. печ. л. – 12.56.
Тираж – 230 экз. Заказ № 40/2026

Отпечатано в типографии «Новопринт»
614016 г. Пермь, ул. Седова, 7 оф. 111
Тел.:(342) 204 5 992