

The background of the entire page is a photograph of a winter landscape. It shows a dense forest of trees heavily laden with snow. The sky is a pale blue with some wispy clouds. The lighting suggests a bright day, possibly near sunrise or sunset, as there's a warm glow on the horizon. The snow is thick and covers all visible surfaces, creating a serene and cold atmosphere.

XXII Зимняя школа
по механике сплошных сред
22-26 марта 2021г.

Тезисы докладов

Пермь, 2021

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Уральское отделение Российской академии наук

«Институт механики сплошных сред
Уральского отделения Российской академии наук» – филиал
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Пермского федерального исследовательского центра
Уральского отделения Российской академии наук

XXII Зимняя школа по механике сплошных сред

Тезисы докладов

22-26 марта 2021 г.

Пермь, 2021

XXII Зимняя школа по механике сплошных сред Пермь, 22 – 26 марта 2021 г.
Тезисы докладов /ПФИЦ УрО РАН. – Электронные данные. – Пермь, 2021. –
77 Мб; 362 с. – Режим доступа: <https://conf.icmm.ru/event/2/page/4>

Представлены тезисы докладов XXII Зимней школы по механике сплошных сред, проходившей на базе «Института механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук» - филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии с 22 по 26 марта 2021 г. Школа посвящена 50-летию академической науки в Перми.

Сборник отражает тематику Школы и содержит результаты исследований по актуальным проблемам вычислительной механики сплошных сред, связанным задачам механики деформируемого твердого тела, физике и механике мезо- и наноструктурных систем, функциональным материалам, конвекции, гидродинамической устойчивости и турбулентности, гидродинамике неньютоновских жидкостей и жидкостей с особыми свойствами, междисциплинарным исследованиям, горной механике.

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

Издается в авторской редакции.

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

© ИМСС УрО РАН, 2021 г.
© Авторы, 2021 г.

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Aronson I. Swimming in a superfluid	22
Baggioli M. Find the differences between solids and liquids (and understand them)	23
Eremeev V.A. On antiplane surface waves within strongly anisotropic surface elasticity	24
Giuliani A. Force matters: some notes on mechano-biology	25
Plourabouè F. Recent developments on Ionic wind analysis	26
Proud W.G., Tear G., Sory D., Rankin S. and Brown K. The Dynamic Response of Non-linear materials: Damage in Biological and Engineering materials	27
Sevostianov I. Effective properties of heterogeneous materials in relation to their microstructures and cross-property connections	28
Ахатов И.Ш. Гидродинамика дисперсных систем: основы и приложения	29
Василевский Ю.В., Никитин К.Д., Янбарисов Р.М., Терехов К.М., Ольшевский М.А. Трёхмерные течения ньютоновских и неньютоновских жидкостей со свободной поверхностью	30
Ватульян А.О. Об определении переменных физических характеристик упругих тел	31
Георгиевский Д.В. Элементы теории определяющих соотношений и линеаризованные постановки задач устойчивости	32
Кукушкин С.А., Осипов А.В. Микромеханика гетероструктур и управляемый синтез новых материалов: Наномасштабный монокристаллический карбид кремния на кремнии и его уникальные свойства	33
Ломакин Е.В., Федулов Б.Н. Зависимость характеристик предельного состояния тел от условий нагружения	34
Лурье С.А., Васильев В.В. Исследование прочности пластин с трещинами в терминах концентрации напряжений, определенных в нелокальной теории упругости	35
Мелешко С.В., Пухначев В.В. Уравнения пограничного слоя в динамике полимерных растворов	36
Мизонов В.Е. Применение теории цепей Маркова к моделированию физико-химических процессов в сплошных и дисперсных средах	37
Милейко С.Т. Композиты с металлической матрицей: современное состояние, нерешённые задачи, перспективы	38
Носков Б.А. Поверхность жидкости в двадцать первом веке	39
Тучин В.В. Оптическое просветление биологических тканей: на пути к мультимодальной медицинской диагностике	40
Чупахин А.П. Геометрия и энергетика моделей гемодинамики и роста мозга	41
Awad Hamdy A.M., Nastavkin A.V. Physical and mechanical studies of granite	42

rocks in UM Taghir Area, Eastern desert, Egypt	
Golbraikh E., Shtemler Y.M. A few words about the role of ocean foam covered air-sea interface in hurricanes	43
Kleeorin N., Rogachevskii I., Кузання К.М., Степанов Р.А. Квази-двухлетние колебания солнечной активности и волны Россби	44
Адамов А.А., Каменских А.А., Панькова А.П. Оценка влияния фрикционных свойств материалов опорной части на деформирование конструкции при разной толщине антифрикционной прослойки	45
Адамов А.А., Келлер И.Э. Основные критерии работоспособности антифрикционных полимерных материалов в опорных частях с шаровым сегментом	46
Алабужев А.А. Влияние неоднородности подложки на радиальные колебания зажатога газового пузыря	47
Алексеев А.А., Зубчанинов В.Г., Гульятев В.И. Моделирование процессов упругопластического деформирования сталей по сложным многозвенным траекториям	48
Аллахвердиев Р.Р., Юшков Е.В., Соколов Д.Д. Уравнения среднего поля и турбулентного динамо в рамках мультипликативного подхода.	49
Амбаров А.В., Елфимова Е.А., Зверев В.С. Численное моделирование динамического отклика системы взаимодействующих обездвиженных дипольных частиц на переменное поле произвольной амплитуды	50
Андрейко С.С., Мальцев В.М., Аникин В.В. Математическое моделирование действия взрыва заряда с радиальным зазором	51
Андрюкова В.Ю., Тарасов В.Н. Об устойчивости криволинейных стержней, подкрепленных нерастяжимыми нитями	52
Бабайцев А.В., Никитин А.Д., Рипецкий А.В. Применение методов испытаний на сверхмногоцикловую усталость для исследования механических свойств материалов, полученных методом послойного лазерного плавления	53
Баландин В.В., Баландин Вл.Вл., Брагов А.М., Пархачёв В.В. Исследование проникания цилиндрических ударников в сухой песок с использованием радиоинтерферометра миллиметрового диапазона	54
Банников М.В., Юрина А.Д. Исследование процессов накопления повреждений в сплаве титана ВТ-3 при гигацикловой усталости	55
Банникова И.А., Уваров С.В. Экспериментальное исследование фрагментации кварцевых цилиндров в условиях квазистатического нагружения с регистрацией фрактолюминесценции	56
Барях А.А., Самоделкина Н.А., Коносовский П.К. Предотвращение прорыва пресных вод в горные выработки калийных рудников	57
Басалин А.В., Константинов А.Ю. Использование метода прямого удара для определения динамических диаграмм деформирования упругопластических материалов при больших деформациях	58
Баталов В.Г., Степанов Р.А., Васильев А.Ю. Измерение размеров капель распыленной жидкости по яркости отраженного света	59
Баяндин Ю.В., Ледон Д.Р., Уваров С.В., Наймарк О.Б. Верификация	60

математической модели твердого тела с дефектами по данным динамических экспериментов

Белова О.Н., Степанова Л.В. Атомистическое моделирование распространения трещины в пластине	61
Бельтюков Н.Л. Исследование возможности использования эффекта Кайзера для оценки напряжений в породном массиве скважинным гидродомкратом	62
Беляев А.Ю., Комар Л.А., Свистков А.Л. Численное моделирование нагрева полимерного материала на основе неравновесной термодинамики с релаксирующими потоками тепла	63
Билалов Р.А., Сметанников О.Ю. Численное моделирование гидродинамики насоса с учетом кинематического взаимодействия шестерней	64
Биллер А.М., Столбов О.В., Райхер Ю.Л. Взаимодействие нелинейно намагничивающихся частиц, заключённых в эластомер	65
Боброва Е.П., Столбов О.В. Генерация рельефа поверхности магнитоактивного эластомера	66
Бондаренко А.В., Казаков А.В., Труфанова Н.М. Моделирование многослойного течения полимерных материалов в кабельной головке секторной формы с учетом вязкоупругих свойств	67
Бочкарёв С.А., Лекомцев С.В. Анализ устойчивости композитной цилиндрической оболочки, содержащей вращающуюся жидкость	68
Бояршинов Д.А., Сметанников О.Ю. Численное моделирование процесса обжига известняка во вращающейся печи	69
Браун Д.А., Бузмаков М.Д. Стохастическое моделирование белковых полей с запаздывающей обратной связью	70
Бублик С.А., Семин М.А., Левин Л.Ю. Исследование физических процессов, происходящих в монолитной бетонной крепи шахтного ствола, в условиях переменных тепловых нагрузок	71
Бурмашева Н.В., Дьячкова А.В. Влияние ветра на изотермическое течение вязкой несжимаемой вертикально завихренной жидкости	72
Бурмашева Н.В., Ларина Е.А. Изотермическое течение двуслойной вязкой жидкости под воздействием ветра	73
Бурмашева Н.В., Просвиряков Е.Ю. Класс точных решений для описания неоднородных течений с учетом внутреннего трения	74
Ваганов М.В., Райхер Ю.Л. Магнитоактивные эластомеры с высококоэрцитивным наполнителем: особенности намагничивания	75
Васильев А.П., Охлопкова А.А., Стручкова Т.С., Алексеев А.Г. Исследование влияния углеродных волокон с бентонитом на физико-механические и триботехнические свойства ПТФЭ	76
Васильев А.Ю., Сухановский А.Н. Турбулентная тепловая конвекция при неоднородных тепловых граничных условиях	77
Вассерман И.Н. Влияние деформации миокарда на возникновение в нем источников возбуждения	78
Ватульян А.О., Недин Р.Д. моделирование и Восстановление распределений	79

остаточных напряжений в двумерных постановках

Ватульян А.О., Нестеров С.А., Юров В.О. Решение задачи градиентной термоупругости для цилиндра с тонкослойным покрытием	80
Ватульян А.О., Плотников Д.К. Контактная задача для неоднородной ортотропной полосы	81
Ватульян А.О., Юров В.О. О волновых процессах в неоднородном волноводе с дефектами с учетом затухания	82
Ведерникова А.И., Плехов О.А. Прогнозирование прочности конструкций с концентраторами напряжений при динамическом нагружении методами многопараметрической механики разрушения	83
Вертгейм И.И., Закс М.А., Сагитов Р.В. Устойчивость, нелинейные режимы и динамика лагранжевых частиц в конечномерных моделях двумерных двоякопериодических течений	84
Вильдеман В.Э., Лобанов Д.С., Староверов О.А., Третьякова Т.В. Деформирование и разрушение пространственно-армированных композитов в опытах на сжатие после удара	85
Вильчевская Е.Н. Моделирование структурных изменений в микрополярных средах	86
Власова О.А., Соломенников М.Н. Поведение сферы в неравномерно вращающемся закрытом вертикальном цилиндре с жидкостью	87
Володин И.В., Алабужев А.А. Моделирование многофазных систем методом решеточных уравнений Больцмана	88
Вшивков А.Н., Изюмова А.Ю., Прохоров А.Е., Мубассарова В.А., Пантелеев И.А. Плехов О.А. Аппроксимация диссипации тепла в вершине усталостной трещины в нержавеющей стали	89
Вяткин А.А., Козлов В.Г. Сабиров Р.Р. Параматрические колебания неизотермической жидкости во вращающемся горизонтальном цилиндрическом слое	90
Вяткин А.А., Козлов В.Г. Экспериментальное исследование тепловой конвекции в цилиндрическом слое с продольной перегородкой при модулированном вращении	91
Вяткин В.А., Брацун Д.А. Влияние концентрационной зависимости коэффициентов диффузии на устойчивость двухслойной системы смешивающихся растворов	92
Галышев С.Н. Композит с алюминиевой матрицей и углеродным волокном	93
Гаришин О.К., Пелевин А.Г., Соколов А.К. Моделирование испытаний лопаточных и кольцевых эластомерных образцов с учетом скорости деформирования их рабочей части	94
Гачегова Е.А., Сихамов Р., Фенцке Ф., Кашаев Н., Плехов О.А. Влияние лазерной ударной проковки на усталостный ресурс титанового сплава ОТ4-0	95
Герасимов Р.М., Волегов П.С. Математическое моделирование захвата микротрещиной примесных атомов в Fe-C: атомистический подход	96
Гилева О. С., Левицкая А.Д., Мудрова О.А., Зуев А.Л., Мирсаева Ф.З. Упруго-прочностные и микроструктурные характеристики очага деминерализации	97

эмали до и после стандартного и модифицированного инфильтрационного лечения	
Глебова П.А. Некоторые подходы к оценке нагрузки на междукламерные целики в условиях неполной подработки	98
Глот И.О., Шардаков И.Н., Шестаков А.П., Цветков Р.В., Гусев Г.Н., Епин В.В. Результаты мониторинга инклинометрических измерений высотной металлической конструкции	99
Голдобин Д.С., Пермякова Э.В., Клименко Л.С. Моментные и кумулянтные подходы к описанию активных броуновских частиц с малой инерцией	100
Гольцов Е.С., Труфанова Н.М. Моделирование процесса теплообмена при силановой сшивке в двухкомпонентной среде вода-газ с применением volume of fluid модели	101
Горшков А.В., Просвирыков Е.Ю. Неоднородное течение Пуазейля в экваториальной зоне мирового океана	102
Грибов Д.С., Трусов П.В., Янц А.Ю. Многоуровневая упруговязкопластическая модель: приложение к анализу влияния энергии дефекта упаковки на сложное циклическое деформирование	103
Григорьева П.М., Яковлев Ю.А., Полянский В.А. Механическое описание экстракции водорода из его соединений с титаном	104
Губанова Е.А. Влияние истории деформирования на процесс разрушения соляного массива	105
Гулин В.В., Никитин А.Д. О естественной концентрации напряжений в поликристаллических материалах	106
Гусев Г.Н., Глот И.О., Епин В.В., Цветков Р.В., Шардаков И.Н., Шестаков А.П. Особенности использования тензорезистивных датчиков деформации в условиях агрессивных сред	107
Гусев Г.Н., Глот И.О., Епин В.В., Цветков Р.В., Шардаков И.Н., Шестаков А.П. Организация вибрационного мониторинга на инженерной металлоконструкции	108
Данилова С.Н., Охлопкова А.А., Ярусова С.Б., Гордиенко П.С. Исследование влияния модификации поверхности базальтового волокна при получении композитов на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена	109
Девятков С.Ю. Оценка деформаций земной поверхности при столбовой системе отработки	110
Демин В.А., Меньшиков А.И., Марышев Б.С. Модели конденсационных процессов в пористых средах	111
Демин В.А., Петухов М.И., Пономарев Р.С., Топова А.В. Отжиг и нелинейные эффекты при диффузионном формировании волноводов в кристалле ниобата лития	112
Демин В.А., Петухов М.И., Шмыров А.В., Шмырова А.И. Механизм образования азимутальных вихрей при натекании радиально-симметричного течения на пленку неподвижного сурфактанта	113
Денисова М.О., Костарев К.Г. Деформация капли в условиях гидроневесомости	114

Денисова М.О., Костарев К.Г. Диффузия ПАВ из медленно всплывающей капли	115
Денисюк Е.Я. Термодинамика деформирования полимерных гелей в поле массовых сил	116
Дмитриев С.В., Бачурина О.В., Семенов А.С., Корзникова Е.А., Наймарк О.Б. Влияние дискретных брызгов на макроскопические свойства нелинейных цепочек	117
Долгих В.М., Павлинов А.М. Экспериментальное исследование МГД - насоса с наклонными перегородками в плоском канале	118
Долгих Д.А., Ташкинов М.А. Оптимизация топологии биомиметических полимерных материалов со случайной структурой	119
Дорошенко О.В., Голуб М.В., Еремин А.А., Вильде М.В. Применение бегущих волн в определении поврежденности интерфейсов в слоистых композитах	120
Дударев В.В. Исследование колебаний цилиндра с вязкоупругим покрытием	121
Дятлов И.Я., Труфанова Н.М. Анализ влияния размеров заготовки на процесс вулканизации резиновой изоляции	122
Евграфова А.В., Сухановский А.Н. Исследование нестационарного теплопереноса с учетом неоднородного городского рельефа	123
Евсеев А.В. Оценка устойчивости междуканальных щелей на основе контроля скоростей горизонтальной конвергенции очистных камер и оседания земной поверхности	124
Евсина А.В., Кузнецова Е.В. Анализ распределения остаточных напряжений в прутковых металлоизделиях после волочения с учетом технологических параметров	125
Еленская Н.В., Ташкинов М.А. Моделирование деформационного поведения неоднородных полимерных решетчатых структур с градиентом пористости	126
Ельищев В.А., Павлинов А.М., Колесниченко И.В. Турбулентные характеристики ЭВТ в цилиндрическом канале: эксперимент	127
Епин В.В., Глот И.О., Гусев Г.Н, Цветков Р.В., Шардаков И.Н., Шестаков А.П. Система гидростатического нивелирования для мониторинга надшахтной конструкции скипового ствола	128
Ерофеев В.И., Леонтьева А.В. Нелинейная волновая динамика пористых жидконасыщенных сред	129
Ефремов Д.В., Банникова И.А., Баяндин Ю.В. Исследование вязкоупругих свойств жидкостей для гидроразрыва пласта	130
Жаббаров Р.М., Степанова Л.В. Метод квазилинеаризации для решения задач механики деформируемого твердого тела. уточненное решение задачи об установившейся ползучести вращающегося диска	131
Желнин М.С., Костина А.А., Прохоров А.Е., Плехов О.А., Левин Л.Ю. Численное моделирование искусственного замораживания грунтовых слоев для проходки шахтного ствола	132
Зданчук Е.В., Лалин В.В. Точечный источник в пространстве редуцированной среды Коссера	133

Зеленцов В.Б., Лапина П.А., Айзикович С.М. Определение экспоненциального модуля сдвига в упругом полупространстве	134
Зубарев А. Ю., Чириков Д. Н., Хужир П. Теоретическое исследование течения магнитной жидкости в переменном магнитном поле	135
Зубарев А.Ю., Чириков Д.Н. Реологические свойства магнитных жидкостей с композитными частицами	136
Зуев А.Л., Судаков А.И., Шакиров Н.В., Мишланов В.Ю. Применение регистрации электрического импеданса биологических жидких сред для дистанционного электронного мониторинга состояния пациентов	137
Иванов А.О. Кузнецова О.Б., Камп Ф. Проблема магнитогранулометрического анализа феррожидкостей на базе динамической начальной восприимчивости	138
Иванов А.С., Хохрякова К.А. Плавание немагнитных тел в феррожидкостях: пристеночные эффекты	139
Иванов С.Г. Простые модели в современной науке о композитах	140
Иванова М.Д., Никитин В.Н. Биомеханическая модель для определения усилий в мышцах шеи	141
Иванцов А.О., Клименко Л.С., Любимова Т.П., Ру Б. Численное моделирование работы системы активного шумоподавления двигателя внутреннего сгорания	142
Иванцов А.О., Любимова Т.П., Хлыбов О.А. Влияние бегущего магнитного поля на процесс выращивания кристалла кремния методами направленной кристаллизации	143
Исюмова А.Ю., Вшивков А.Н., Прохоров А.Е., Мубассарова В.А., Пантелеев И.А., Костина А.А., Плехов О.А. Исследование процесса накопления энергии в титановых сплавах под действием циклических нагрузок	144
Илларионов Е.А., Соколов Д.Д. Рост магнитной энергии на начальной стадии динамо	145
Ильиных Г.В., Сметанников О.Ю., Марамыгин А.В. Прогнозирование остаточных деформаций композитной панели в процессе изготовления	146
Казаков К.Е. Задачи взаимодействия труб с покрытиями и втулок с учетом сложных профилей контактирующих тел	147
Казанцев П.Н., Краузин П.В. Применение базиса векторных сферических функций для определения порога термомагнитной конвекции в шаровой полости	148
Казимарданов М.Г., Любимова Т.П. Конвекция вязкопластической жидкости в квадратной полости	149
Кайгородцева А.А., А.В. Шутов А.В., Захарченко К.В., Капустин В.И. Анализ чувствительности параметров моделей пластического вышагивания к ошибкам эксперимента	150
Калугин А.Г., Павлов Д.В. О влиянии поверхностной энергии на ориентационную неустойчивость слоя нематического жидкого кристалла	151
Каменских А.А., Носов Ю.О. Моделирование сферических опорных частей мостов с разной геометрической конфигурацией углублений под смазочный материал	152

Каменских А.А., Носов Ю.О. О контактном взаимодействии полимерного слоя с полированной стальной поверхностью	153
Каменских А.А., Струкова В.И. Сравнительный анализ влияния положения сферического слоя скольжения относительно стальных плит опорной части мостового строения на деформирование конструкций	154
Каменских А.О., Лекомцев С.В., Ошмарин Д.А., Юрлов М.А. Активное подавление резонансных колебаний двух параллельных пластин, содержащих жидкость	155
Карасев Т.О., Теймуразов А.С., Перминов А.В. Численное моделирование тепловых режимов стенки реторты в аппарате для производства титана	156
Карпунин И.Э., Козлов Н.В., Plouraboué F. Динамика фазового включения в односвязной полости при вращательных вибрациях	157
Кашина М.А., Алабужев А.А. Влияние свойств поверхности пластин на собственные колебания зажатой капли	158
Кащенко М.П., Кащенко Н.М., Чашина В.Г. Сателлитная роль ориентационных соотношений питча при ГЦК-ОЦК (γ - α) мартенситных превращениях	159
Кащенко М.П., Семеновых А.Г., Нефедов А.В., Кащенко Н.М., Чашина В.Г. Кристонные источники сдвига и формирование полос Чернова-Людерса	160
Келлер И.Э., Адамов А.А., Подкина Н.С. Идентификация КЭП-модели пластичности гибкого графита	161
Кислицын В.Д., Изюмов Р.И., Свистков А.Л. Новый способ представления карт параметров, полученных при исследовании образцов с помощью атомно-силовой микроскопии	162
Ключанцев В.С., Шутов А.В. Нелокальные модели интегрального типа для анализа распространения зоны разрушений в металлах	163
Князев Д.В. О существовании интеграла уравнений осесимметричного течения вязкой жидкости	164
Козлов В.Г., Власова О.А. Динамика сферического тела в жидкости вблизи осциллирующей стенки	165
Козлов В.Г., Власова О.А., Карпунин И.Э. Пальчиковая неустойчивость границы раздела жидкостей, осциллирующих в щелевых каналах	166
Козлов Н.В., Мошева Е.А. Изучение хемоконвекции в поле вибраций	167
Колесниченко Е.В., Хохрякова К.А. Волны на свободной поверхности магнитной жидкости во внешнем переменном магнитном поле	168
Колесов Е.В., Семин М.А. Исследование закономерностей конвективного расслоения воздушных потоков в шахтных стволах	169
Колчанов Н.В., Евграфова А.В., Казакова Е.А., Колчанова Е.А. Влияние примесей NaCl на расход протекающей сквозь пористую среду воды	170
Колчанова Е.А., Колчанов Н.В. Вибрационная конвекция в слое бинарной жидкости с пористой зоной в нулевой гравитации	171
Кондратьев Н.С., Трусов П.В. Многоуровневая модель для описания неупругого деформирования с учетом динамической рекристаллизации	172

Коновалов В.В. Эффект вязкости воздуха на точность измерения материальных параметров сред методом левитирующей капли	173
Корелин А.А., Труфанова Н.М. Математическое моделирование и численный анализ процесса пероксидной сшивки изоляции кабелей на среднее напряжение	174
Корепанов В.В., Корепанова Т.О. Численный анализ сингулярности напряжений в вершине пространственных непересекающихся трещин	175
Корниевский А.С., Наседкин А.В. Конечно-элементный анализ пен, моделируемых регулярными и нерегулярными решетками из ячеек Гибсона-Эшби	176
Косков М.А., Пшеничников А.Ф. Стационарная термомагнитная конвекция в замкнутом контуре	177
Костарев К.В., Брацун Д.А. О биоконвекции высших животных	178
Костарев К.Г., Торохова С.В. Контракция в жидкости	179
Костарев Н.А., Труфанова Н.М. Моделирование режимов работы греющего кабеля при депарафинизации нефтяных скважин	180
Костина А.А., Желнин М.С., Плехов О.А., Левин Л.Ю. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния ледопородного ограждения при его размораживании	181
Котельникова Н.В. Применение многоуровневой математической модели для описания межкристаллитного разрушения металлов	182
Котов В.Л., Линник Е.Ю. Численное исследование движения неосесимметричных тел в грунтовых средах	183
Кочурин Е.А. Моделирование волновой капиллярной турбулентности в плоско-симметричной геометрии	184
Красняков И.В., Брацун Д.А., Писмен Л.М. Математическое моделирование инвазивной карциномы: биомеханика малых групп раковых клеток	185
Кузнецов А.А. Магнитовязкий эффект в суспензии магнитных нанокластеров	186
Кузнецова Ю.Л. Эволюция размера растворимой аэрозольной частицы во влажном воздухе	187
Кузьминых В.С. Исследование прочностных и деформационных свойств соляных пород под действием растягивающих усилий	188
Курмоярцева К.А. Моделирование зарождения микротрещин в поликристаллических материалах в рамках дислокационно-ориентированного подхода	189
Кучинский М.О., Любимова Т.П., Рыбкин К.А., Козлов М.В. Экспериментальное исследование распределения акустического давления в сонохимическом реакторе	190
Лалин В.В., Лалина И.И., Вавилова А.М., Ле Т.К.Ч., Нго Х.Х. Методы оценки вклада высших форм колебаний в задачах динамики конструкций	191
Лебедев А.В., Лысенко С.Н. Динамика плоских частиц гексаферрита бария в лиотропном жидком кристалле.	192
Левицкая А.Д., Гилева О.С., Даурова Ф.Ю., Акмалова Г.М. Метод лазерной	193

голографической интерферометрии для анализа микродеформаций деминерализованной эмали в процессе лечения	
Ледон Д.Р., Оборин В.А., Банников М.В., Баяндин Ю.В. Численное моделирование разрушения алюминиевых и титановых сплавов при комбинированных воздействиях: динамическое и усталостное нагружение	194
Лепихин А.П., Мирошниченко С.А., Богомолов А.В., Ляхин Ю.С., Тиунов А.А., Любимова Т.П., Паршакова Я.Н. Особенности гидродинамики поверхностных водных объектов в зонах активного техногенеза (на примере Верхне-Зырянского водохранилища)	195
Лесникова Ю.И., Труфанов А.Н. О влиянии геометрии многослойного защитно-упрочняющего покрытия на работу волокна типа PANDA	196
Литвинов В.В., Чудинов В.С., Шардаков И.Н., Солодников С.Ю., Галкин С.В., Савицкий Я.В., Кондюрин А.В. Ионно-плазменная обработка протеза кровеносного сосуда	197
Литвинов В.Л. Математическое моделирование колебаний неограниченной струны с движущейся границей в нелинейной постановке	198
Лобанов С.Ю. Оценка устойчивости водозащитной толщи в условиях глубоких калийных рудников	199
Локтева Н.А., Сердюк Д.О., Скопинцев П.Д. Нестационарная функция прогиба для полубесконечной анизотропной цилиндрической оболочки	200
Ломакин И.С., Цаюков А.А. Оценка влияния процессов расслоения технологического междупластья на устойчивость междукламерных целиков	202
Лосев Г.Л., Колесниченко И.В., Ельтищев В.А. Особенности моделирования многофазных сред в задачах электромагнитной генерации течений	203
Любимова Н.Ю., Нуруллаев Э., Герцен Т.А. Теоретические и экспериментальные результаты разработки морозостойких полимерных материалов	204
Любимова Т.П., Лепихин А.П., Богомолов А.В., Ляхин Ю.С., Тиунов А.А., Паршакова Я.Н. Влияние внутрисуточной неравномерности работы Камской ГЭС на качество забираемой воды на Чусовском водозаборе г. Перми	205
Любимова Т.П., Паршакова Я.Н., Колчанов В.Ю., Лепихин А.П., Ляхин Ю.С., Богомолов А.В., Тиунов А.А. Применение сопряженных 1D-2D-3D гидродинамических моделей для анализа устойчивости систем водоснабжения из поверхностных водных объектов	206
Любимова Т.П., Рушинская К.С., Зубова Н.А. Конвекция бинарной смеси с коэффициентом термодиффузии, зависящим от температуры	207
Макаревич Е.С., Подсердцев А.Н., Кондратьев Н.С., Трусов П.В. О критериях мартенситных превращений в прямой физически-ориентированной модели	208
Максимов П.В., Конотоп Д.А. Использование связанной модели МДТТ и МЖГ для расчета демпфирования маятникового акселерометра	209
Мамыкин А.Д., Теймуразов А.С., Колесниченко И.В. Температурные корреляции как метод оценки скорости потоков жидких металлов различной природы	210

Мандрыкин С.Д., Ельтищев В.А., Колесниченко И.В. Влияние стержня-катода на электровихревое течение: расчет и эксперимент	211
Матвиенко Ю.Г., Разумовский И.А., Федоров А.А. Расчётное моделирование влияния статического индентирования на скорость и изменение траектории усталостного роста трещины	212
Меленев П.В., Рыжков А.В. Моделирование намагничивания образцов феррогеля с разной структурой связующего	213
Мизёв А.И., Шмыров А.В., Мизева И.А., Шмырова А.И., Пшеничникова И.М. Сбор и анализ образцов легочного аэрозоля для оценки функционального состояния легких	214
Мизева И.А., Дремин В., Потапова Е.В., Козлов И. Вейвлет-анализ временной динамики спекл-контрастного изображения микроциркуляции крови	215
Мизева И.А., Шмыров А.В. Алгоритм обработки изображений в модифицированном методе капиллярных волн	216
Миронов А.В. Коэффициенты многопараметрического разложения ряда Уильямса для прямоугольной пластины с двумя боковыми горизонтальными надрезами	217
Митрополит И.Ю., Янц А.Ю. Прямая двухуровневая упруговязкопластическая модель: приложение к описанию процессов сложного нагружения	218
Митюшов Е.А., Мисюра Н.Е. Численное моделирование ориентации структурных элементов многофазных систем в параметрах ось-угол	219
Морозов И.А. Атомно-силовая микроскопия подповерхностных свойств неоднородного полимера	220
Морозов И.А., Паньков И.Л., Токсаров В.Н. Исследование устойчивости капитальных выработок в массивах пород с резко отличающимися прочностными и деформационными характеристиками	221
Мохирева К.А., Свистков А.Л., Шадрин В.В. Формирование анизотропных свойств в эластомерных нанокompозитах	222
Мошева Е.А., Мизёв А.И., Шмыров А.В. Влияние неустойчивости двойной диффузии на процесс смешения жидкостей в проточном канале	223
Мубассарова В.А., Вшивков А.Н., Изюмова А.Ю., Пантелеев И.А., Плехов О.А. Особенности акустической эмиссии при усталостном деформировании титановых сплавов	224
Наймарк О.Б. Множественные метастабильные состояния, индуцированные дефектами, и механизмы переноса импульса в конденсированных средах	225
Наймарк О.Б., Игнатова А.М., Никитюк А.С., Баяндин Ю.В., Гришко В.В. Анализ рельефа опухолевых клеток MCF-7 при апоптических изменениях основе фазово-контрастных изображений, полученных методом лазерной интерференционной микроскопии	226
Наседкин А.В., Нассар М.Э. Численное исследование влияния объемной доли металлических включений на эквивалентные свойства пористых пьезокompозитов с металлизированными поверхностями пор	227
Наседкин А.В., Толмачева Я.В. Компьютерный дизайн пористых	228

пьезокерамик различной сегнетожесткости при случайной структуре пористости и неоднородности поля поляризации	
Никитин В.Н. Биомеханические гипотезы распределения усилий мышц зубочелюстной системы человека при гипертонусе	229
Никитин И.С., Бураго Н.Г., Никитин А.Д., Стратула Б.А. Математическое моделирование усталостного разрушения при высокочастотных колебаниях по схеме «трёхточечный изгиб»	230
Никитин И.С., Никитин А.Д., Стратула Б.А. Исследование резонансных крутильных колебаний корсетных образцов в режиме СВМУ	231
Никитин И.С., Никитин А.Д., Стратула Б.А. Резонансные колебания и усталостное разрушение круглой опертой пластинки при испытаниях на пьезоэлектрической установке	232
Никитюк А.С., Баяндин Ю.В., Наймарк О.Б. Исследование нелинейной динамики молекулы ДНК	233
Николаев А.Л., Голушко И.Ю., Митрин Б.И., Васильев А.С. Особенности структурных и оптических свойств наностержней оксида цинка, полученных методом карботермического синтеза при разных температурах	234
Никулин И.Л., Демин В.А. Численное моделирование тепломассопереноса в металлическом расплаве и диэлектрической плёнке при индукционной плавке	235
Никулина С.А., Перминов А.В., Любимова Т.П. Влияние высокочастотных вертикальных вибраций на конвективные режимы в квадратной полости	236
Нихамкин М.Ш., Соломонов Д.Г., Балакирев А.А., Воронков А.А., Головкин А.Ю. Экспериментальное исследование накопления усталостных повреждений в ламинированных углепластиках	237
Новиков А.А., Макаров Д.В. Ориентационные переходы мягкого феррохолестерика во вращающемся магнитном поле	238
Оборин В.А., Баяндин Ю.В., Савиных А.С., Гаркушин Г.В., Разоренов С.В., Наймарк О.Б. Долговечность сплавов АМГ6 и ВТ6 при комбинированном ударно-волновом и последующем сверхмногоцикловом нагружении	239
Огорельцева Н.В., Федорова Е.Н., Нагибин Г.Е., Пузанов И.И., Завадяк А.В. Закономерности разрушения защитных покрытий на основе композиций TiB ₂ -C	240
Озерных В.С., Колесниченко И.В. Действие электромагнитной силы на вытянутую частицу в электропроводной жидкости	241
Окатыев Р.С., Лосев Г.Л., Озерных В.С., Колесниченко И.В. Электромагнитные силы, действующие на среду с неоднородной электропроводностью	242
Оконечников А.С., Федотенков Г.В., Феоктистова Е.С. Нестационарный контакт жесткого штампа с мембраной при учете влияния сил адгезионного притяжения	243
Ольховский Д.В., Кузьминых Е.Г., Семин М.А., Зайцев А.В. Исследование тепло- и массопереноса в вентиляционных стволах глубоких рудников в условиях реверсирования воздушной струи	244
Осипенко М.А. Новый тип нагрузки, в том числе контактной, в теории изгиба	245

балок

Остапович К.В., Трусов П.В. Многоуровневая упруговязкопластическая модель: приложение к созданию поликристаллических изделий с рациональной текстурой методами интенсивной неупругой деформации	246
Ошмарин Д.А., Юрлова Н.А., Севодина Н.В., Юрлов М.А. Управление механическим откликом электровязкоупругих конструкций в режиме вынужденных колебаний путем подачи на пьезоэлемент электрического сигнала	247
Палкин Д.Д. Влияние структуры полимерных композиционных материалов на коэффициент трения	248
Панфилов Г.П., Зайцев Д.В., Панфилов П.Е., Кисеев В.М. Влияние жидкости на поведение пористых неорганических материалов при сжатии	249
Панфилов П.Е., Миленина И.В., Ермаков А.В. О возможности механической обработки рения при комнатной температуре	250
Паньков И.Л. Разработка критериев прочности горных пород при сложном напряженном состоянии	251
Панькова С.А., Кузнецова Е.В. Влияние экстремальных условий на преждевременное растрескивание циркониевых оболочек тепловыделяющих элементов в атомных реакторах	252
Пермякова Э.В. Голдобин Д.С. Метод экспоненциальных временных разностных схем для уравнений длинноволновой конвекции	253
Пестренин В.М. , Пестренина И.В. , Перельман О.М., Фадейкин А.С. Ограниченные цилиндрическим отбойником изгибные колебания составного тяжелого горизонтального вращающегося вала	254
Петров Д.А., Скоков П.К. Возвратные переходы в бинарной смеси углеродных нанотрубок и жидкого кристалла	255
Петрова Д.М. Извлечение коэффициентов многопараметрического асимптотического разложения уильямса для пластины с двумя коллинеарными трещинами разной длины	256
Петрова О.В. Перспективы применения угле-никелевых композитов в конструкциях аэрокосмической техники	257
Петухов Д.С. Келлер И.Э. Эволюционная модель накопления повреждённости и её применение для оценки времени жизни детали с полем остаточных напряжений	258
Петухов И.Д. О возможности защиты жаропрочных оксид-молибденовых композитов от окисления	259
Пешин С.Е., Няшин Ю.И. Биомеханика карпального туннельного синдрома	260
Пинягин Д.С. Численное исследование тепловых процессов в скважине с призабойным нагревателем	261
Полежаев Д.А. Экспериментальное изучение дрейфа рельефа в горизонтальном либрирующем цилиндре с жидкостью и тяжелой сыпучей средой	262
Поперечный И.С. Продольное перемангничивание антиферромагнитных наночастиц со спонтанным магнитным моментом	263

Попов Ф.С., Чечулина Е.А. Описание взаимодействий атомов примеси с дислокациями при возникновении эффекта Портевена – Ле Шателье	264
Прокопьев С.А., Любимова Т.П., Шевцова В.М., Мьяльдун А. Конвекция трехкомпонентной смеси с суммарным отношением разделения, близким к нулю	265
Прохоров А.Е., Плехов О.А., Кашаев Н., Жеребцов С.В. Экспериментальное исследование поведения материала после лазерного ударного упрочнения поверхности	266
Радушнов Д.И., Елфимова Е.А., Зубарев А.Ю. Соловьева А.Ю. Намагничивание полимера с внедренными магнитными наночастицами	267
Радченко В.П., Шишкин Д.М. Метод расчёта остаточных напряжений в поверхностно упрочнённой балке с надрезами в упругой и упругопластической постановках	268
Ременников С.Е., Шадт А.К. Влияние изменения конструктивных частей чувствительного элемента акселерометра на динамические характеристики навигационных систем	269
Роговой А.А., Салихова Н.К. Численное моделирование эволюции микроструктуры никелевого сплава в процессе динамической рекристаллизации при горячей пластической деформации	270
Роговой А.А., Столбов О.В., Столбова О.С. Микроструктурная модель описания процесса намагничивания ферромагнитного сплава	271
Роготнев А.А., Никитюк А.С., Баяндин Ю.В., Наймарк О.Б. Режимы с обострением в задачах температурной кинетики молочной железы	272
Русаков В.В., Райхер Ю.Л. Нелинейный магнитный отклик вязкоупругого ферроколлоида в поле смещения	273
Русаков С.В., Гилев В.Г. Неизотермическая полимеризация эпоксидного связующего аэрокосмического назначения	274
Русанов М.С., Зверев В.С., Елфимова Е.А. Аналитическая формула динамической восприимчивости феррожидкости в переменном поле малой и средней амплитуды	275
Рыжков А.В., Райхер Ю.Л. Отклик сфероидальных и многослойных магниточувствительных везикул на приложенное поле	276
Ряполов П.А., Полунин В.М., Баштовой В.Г., Соколов Е.А. Магнитофорез в магнитных жидкостях в неоднородных магнитных полях, создаваемых осевыми магнитными системами	277
Савин А.В., Корзникова Е.А., Дмитриев С.В. Твистоны в графеновых нанолентах на подложке	278
Садиллов Е.С. Слабонелинейные конвективные режимы в горизонтальном слое с границами низкой теплопроводности, с вязкостью, зависящей от температуры, для случая, когда одна из границ свободна от касательных напряжений	279
Саженов Н.А., Нихамкин М.Ш., Воронов Л.В. Экспериментальное исследование высокоскоростного ударного нагружения многослойного композиционного материала на основе стекловолокна с защитным покрытием	280

Сальников К.М., Яковкин В.Н. Выбор оптимального натяга колец подшипника в опоре ротора газотурбинного двигателя	281
Самоделкина Н.А. Влияние геологических аномалий на безопасное ведение горных работ	282
Самойлова А.Е., Непомнящий А.А. Управление при помощи обратной связи конвекцией в тонкой пленке жидкости на нагретой подложке	283
Сахнова А.О., Никитин В.Н., Няшин Ю.И. Биомеханическое моделирование влияния нарушений прикуса на состояние шейного отдела позвоночника	284
Свистков А.Л., Комар Л.А., Беляев А.Ю. Рациональная термодинамика. Моделирование тепловой волны	285
Севодина Н.В., Юрлова Н.А., Ошмарин Д.А. Алгоритм определения собственных частот колебаний вязкоупругой конструкции из материала с частотно-зависимыми механическими характеристиками	286
Селуков Д.Г., Степанов Р.А. Проблема замыкания в каскадной модели турбулентной вязкости для пограничного слоя	287
Семин М.А., Паршаков О.С., Пугин А.В. Анализ математических моделей, используемых при мониторинге формирования ледопородных ограждений стволов шахт	288
Сердюк А.О., Сердюк Д.О., Федотенков Г.В. Нестационарная динамика жестко защемленной анизотропной полосы	289
Сероваев Г.С., Кошелева Н.А., Гусев Г.Н. Регистрация деформаций и дефектов встроенными в цементный образец вод	291
Скибина Н.П. Численное исследование течения газа в канале, моделирующем участок ПВРДТТ	292
Скульский О.И. Особенности течения концентрированных суспензий	293
Слепцова С.А., Охлопкова А.А. Разработка триботехнических материалов на основе ПТФэ и СВМПЭ в лаборатории СВФУ	294
Сметанников О.Ю., Сахабутдинова Л.Р. Исследование термовязкоупругого поведения системы оправка-композитная оболочка в процессе изготовления	295
Смирнов С.В., Вичужанин Д.И., Коновалов Д.А., Пестов А.В. Влияние напряженного состояния и температуры на разрушение адгезивных материалов	296
Смольянов И.А., Шмаков Е. И., Бакке Э. Предварительные настройки модели в задаче Гартмана	297
Смольянов И.А., Шмаков Е.И., Бакке Э. Верификация модели для расчет гартамановских потоков в бегущем магнитном	298
Собянин К.В., Шардаков И.Н. Определение эффективных характеристик виброизоляторов	299
Созонов Н.С., Шардаков И.Н. Влияние потери устойчивости подложки датчика деформации на его показания	300
Сокоиков М.А., Симонов М.Ю., Оборин В.А., Чудинов В.В., Уваров С.В., Наймарк О.Б. Изучение механизмов локализации пластической деформации и разрушения при различных видах динамического воздействия	301

Соколов А.К., Изюмов Р.И., Свистков А.Л. Анализ возможности получения информации с помощью асм о контурах включений, расположенных внутри эластомерного материала	302
Соколов А.С., Трусков П.В. Оценка отклика поликристаллических образцов при замене анизотропных упругих свойств кристаллита на эквивалентные изотропные	303
Соколов Е.А., Шабанова И.А., Васильева А.О., Калюжная Д.А., Ряполов П.А. Поведение капель немагнитной жидкости в магнитной в магнитном поле кольцевого магнита	304
Сокольский С.А., Соловьева А.Ю., Елфимова Е.А. Межчастичное взаимодействие в ансамбле неподвижных суперпарамагнитных феррочастиц	305
Сомов С.А., Иванов А.С. Экспериментальное исследование конвекции осушенного воздуха голографическим методом	306
Сорокин Ф.Д. «Роторный» способ описания больших поворотов и его приложения к решению различных задач механики	307
Степанов В.И., Райхер Ю.Л. Ферронематодинамика: статистический подход vs феноменология	308
Степанов Р.А. Численное моделирование двумерной МГД турбулентности за решеткой в кольцевом канале	309
Степанова Л.В., Долгих В.С. Интерференционно-оптические методы в механике и их приложения в механике разрушения	310
Столбов О.В., Райхер Ю.Л. Деформация сферы из магнитоактивного эластомера в однородном магнитном поле	311
Субботин С.В., Ширяева М.А., Козлов В.Г. О роли инерционных волн в генерации зонального течения во вращающейся сфере с осциллирующим ядром	312
Субботин С.В., Ширяева М.А. Исследование структуры течения в неравномерно вращающемся цилиндре с наклонными торцами	313
Сухановский А.Н., Васильев А.Ю. Физический механизм интенсификации теплообмена в случае неоднородных граничных условий	314
Тагильцев И.И., Шутов А.В. Гибридный экспериментально-теоретический подход к определению остаточных напряжений	315
Тихвинский Д.В., Куянова Ю.О., Паршин Д.В. Предоперационная оценка рисков возникновения осложнений в эндоваскулярной нейрохирургии: численное моделирование на основе клинических данных	316
Токарев А.А., Янц А.Ю. Прямая двухуровневая упруговязкопластическая модель: определение представительного объема поликристалла металла	317
Токсаров В.Н. Анализ основных факторов, влияющих на естественное напряженное состояние массивов соляных пород	318
Третьяков Д.А., Беляев А.К. Акустоупругий эффект при пластическом деформировании и усталостном разрушении металлов	319
Труфанов А.Н. Коэффициент теплового расширения тонких пленок фотополимеров	320

Тюлькина И.В., Голдобин Д.С., Клименко Л.С., Поперечный И.С., Райхер Ю.Л. Макроскопическая намагниченность ХУ-макроспиновой системы в рамках обобщенной теории Отта-Антонсена	321
Уваров С.В., Баяндин Ю.В., Банникова И.А. Исследование расширения полости в воде при электровзрыве	322
Ударцев А.А. Анализ деформирования соляных пород Гремячинского месторождения в режиме ползучести	323
Устинов К.Б. Задачи об интерфейсных трещинах. Некоторые точные решения	324
Уткин А.О., Яковкин В.Н., Келлер И.Э. К рациональному проектированию оснастки при резонансных испытаниях объекта	325
Уточкин В.Ю., Брацун Д.А., Сираев Р.Р. Надкритические движения в равномерно вращающемся слое смешивающихся реагирующих жидкостей	326
Ушканов А.А., Слепцова С.А. Исследование свойств армированных композитов на основе политетрафторэтилена	327
Фасхутдинова Ю.Б., Сметанников О.Ю. Исследование термомеханического поведения полимерных термоусаживаемых трубок с памятью формы	328
Фатталов О.О., Любимова Т.П., Рыбкин К.А., Кучинский М.О. Экспериментальное исследование процессов образования, дрейфа и коалесценции парогазовых пузырьков в водных растворах солей и ПАВ в сонохимическом реакторе	329
Фатталов О.О., Любимова Т.П., Рыбкин К.А., Кучинский М.О., Козлов М.В. Исследование динамики роста одиночного пузырька в водных растворах солей и ПАВ различных концентраций под действием ультразвука	330
Фёдоров А.Ю., Виндокурова Е.Р. Анализ изменений деформаций при размещении на поверхности конструкций волоконно-оптических датчиков на подложках	331
Федосеев А.К. Влияние гидроизоляционного тампонажа на сохранность водозащитной толщ	332
Фетисов К.В., Максимов П.В. Методика проектирования и анализа деталей из ячеистого материала переменной плотности	333
Фролова К.П., Вильчевская Е.Н., Полянский В.А. Поверхностный эффект при диффузии водорода в микрополярной среде	334
Фроловская О.А. Задачи со свободной границей в модели водного раствора полимера	335
Хабин М.Р., Колчанов Н.В., Евграфова А.В., Марышев Б.С. Идентификация параметров переноса примеси при закупорке пористой среды	336
Халилов Р.И. Проводящий цилиндр во внешнем магнитном поле	337
Хасаева Т.Т., Михайлов Е.А., Тепляков И.О. Моделирование инверсий галактического магнитного поля на больших расстояниях от центра с использованием вычислений на видеокартах	338
Хегай Е.И. Численное моделирование пространственного течения вязкой жидкости с применением метода VOF	339
Хохрякова К.А., Шмырова А.И., Шмыров А.В., Мизева И.А. Измерение	340

поверхностного натяжения магнитной жидкости в магнитном поле

- Хрипченко С.Ю., Долгих В.М., Кисельков Д.М. Эксперимент по введение
нано частиц SiC и BN в алюминиевый сплав с помощью МГД перемешивания
с последующей кристаллизацией расплава 341
- Цветков Р.В., Глот И.О., Гусев Г.Н., Епин В.В., Шардаков И.Н., Шестаков
А.П. Прогноз наклона земной поверхности по данным неравномерного
осаживания зданий 342
- Чебоксарцева М.А., Зайцев Д.В., Мандра Ю.В., Ивашов А.С., Жолудев С.Е.,
Григорьев С.С. Прочностные свойства керамических реставрационных
материалов для CAD/CAM технологии 343
- Чикова Т.Н., Тверье В.М. Моделирование адаптации губчатой костной ткани 344
- Чудинов В.С., Шардаков И.Н. Углеродное покрытие на поверхности
гемаконтейнеров из поливинилхлорида 345
- Чупин А.В. Свободная научная база Scholia применительно к механике
сплошных сред. 346
- Шавшуков В.Е., Ташкинов А.А. Экстремальные микроструктуры в
поликристаллах 347
- Шалимов А.С., Ташкинов М.А. Моделирование влияния морфологии
структуры на деформирование нанопористых металлов 348
- Шарифуллина Э.Р., Трусов П.В., Швейкин А.И. Многоуровневая
конститутивная модель для описания сверхпластического деформирования
алюминиевых сплавов 349
- Швейкин А.И., Трусов П.В., Романов К.А. Численная оценка устойчивости
многоуровневых конститутивных моделей 350
- Швыдкий Е.Л., Смольянов И.А., Бааке Э. Моделирование конвективных
потокaв при горизонтальной направленной кристаллизации 351
- Шельдешова Е.В., Полунин В.М., Чураев А.А., Ряполов П.А. Динамика
объема магнитной жидкости в неоднородном магнитном поле 352
- Шестаков А.В. Особенности каскадных процессов в турбулентности на фоне
стратифицированной по плотности жидкости 353
- Шишкин Д.А., Щербинин А.Г. Сравнительный анализ математических
моделей процесса изотермического течения в винтовом канале экструдера с
учетом утечек через зазор 354
- Шмырова А.И., Шмыров А.В. Экспериментальное исследование
неустойчивости течения на поверхности пузырька газа 355
- Шулятникова О.А., Рогожников Г.И., Порозова С.Е., Рогожников А.Г.
Экспериментальное исследование прочностных характеристик
модифицированного полимерного базисного материала для использования в
ортопедической стоматологии 356
- Шумихина А.Ю. Методика геомеханического контроля подработанного
соляного массива 357
- Юрлова Н.А., Севодина Н.В., Ошмарин Д.А., Юрлов М.А. Управление
демпфированием колебаний электровязкоупругих конструкций
использованием различных механизмов диссипации энергии 358

Яковенко А.А., Горячева И.Г. Моделирование поведения мягких биологических тканей при индентировании	359
Яковлев Ю.А. Энергия связи водорода в образцах высокопрочной стали	360
Янц А.Ю., Токарев А.А. Прямая упруговязкопластическая модель поликристаллического образца: влияние внутренних и внешних границ зерен	361

SWIMMING IN A SUPERFLUID

Aronson I.S.

Pennsylvania State University, USA

isa12@psu.edu

The propulsion of living microorganisms ultimately relies on viscous drag for body-fluid interaction. The self-locomotion in a superfluid such as ^4He seems impossible due to apparent lack of the viscous resistance. We investigate the self-propulsion of a Janus (two-face) light-absorbing particle suspended in superfluid helium ^4He (often called He-II). The particle is energized by the heat flux due to the absorption of light from an external source. We show that a quantum mechanical propulsion force originates due to the transformation of the superfluid to normal fluid on the heated particle face. The theoretical analysis is supported by the numerical solution of the Ginzburg-Landau-Khalatnikov model for a superfluid. Our results shed light on the dynamics of inclusions in a superfluid and stimulate new experiments.

FIND THE DIFFERENCES BETWEEN SOLIDS AND LIQUIDS & UNDERSTAND THEM

M. Baggioli

Jiao Tong university, Shanghai, China

b.matteo@sjtu.edu.cn

The vibrational, thermodynamical and mechanical properties of solids are well-understood since Debye's work in 1912. On the contrary, the same understanding for amorphous systems, liquids and glasses, has remain elusive for more than a century and it is still a mystery. In this lecture, I will propose a new distinction between solids and liquids based on non-affine displacements and a topological higher form symmetry which can be quantified by using the concept of Burgers vector applied to the dynamical displacement fields.

The breaking of such a symmetry results in a macroscopic phase relaxation rate for the Goldstone modes, which consequently acquire a finite propagation length. I will show how this theory reproduces perfectly the k -gap dynamics for shear waves and the positive sound dispersion phenomenon for longitudinal sound in liquids.

ON ANTIPLANE SURFACE WAVES WITHIN STRONGLY ANISOTROPIC SURFACE ELASTICITY

Eremeyev V.A.

Gdańsk University of Technology, Gdańsk, Poland

University of Cagliari, Cagliari, Italy

eremeyev.victor@gmail.com

The aim of the lecture is to discuss a new model of surface elasticity called strongly anisotropic. The model was motivated by consideration of certain inhomogeneous microstructured coatings. The motivation of these surface structures is at least twofold. The first relates to polymeric brushes. The interest to modelling of coatings made polymeric brushes relates to recent developments in superhydrophobic and superoleophobic surfaces used for manufacturing of so-called self-cleaning and bactericide coatings. Another example of such coating is hyperbolic metasurfaces.

First, we briefly recall discuss the structure of a coating. Then we present a continuum model with surface energy density. From the physical point of view this model corresponds to a coating made of a family of parallel long fibres possessing bending and extensional stiffness in one preferred direction. Finally, using the variational Lagrange principle we derive the equilibrium equations and the corresponding natural boundary conditions. The presented 2D model can be treated as a highly anisotropic 2D strain gradient elasticity. The surface strain energy contains both first and second derivatives of the surface field of displacements. So, it represents a class of 2D models of the surface elasticity which is intermediate between the Gurtin-Murdoch and Steigmann-Ogden ones. Finally, we discuss the propagation of antiplane surface waves.

FORCE MATTERS: SOME NOTES ON MECHANO-BIOLOGY

Giuliani A.

Istituto Superiore di Sanità, Roma, Italy

alessandro.giuliani@iss.it

The investigation of the effect of mechanical forces on living matter is shaking the bases of biological thought. At odds with a long standing tradition positing the ultimate causal origin of any manifestation of living at the genetic level, there is increasing evidence gene expression can be intended as a response to microenvironment changes. Mechanical forces have a predominant role in cell microenvironment. Here I will discuss some examples going from microgravity effects to chromosome structure and resonance phenomena.

RECENT DEVELOPMENTS ON IONIC WIND ANALYSIS

Plouraboué F.

Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse, Toulouse, France

fplourab@imft.fr

Ionic wind is of interest in several applications such as electrostatic precipitators, gas pumps, particle analyzers, miniaturized heat coolers, electro-photography and more recently Aero-Electro-Dynamic (AED) propulsion. During this presentation a short survey of recent advances in the field will be first presented, especially Focusing on propulsive applications.

From a more fundamental viewpoint, the presentation will also discuss the physics of corona discharge, and its modeling.

Some new modeling results will then be presented associated with two distinct approaches. On the one hand, the use of Kaptzov approximation at emitters permits a modeling of the drift-region using a self-adapted mesh-refinement strategy within a finite-element solver permitting the exploration of many emitters/collectors configurations. This approach albeit approximated, already provide interesting predictions for the main quantities of interest, i.e, the predicted current and the propulsion force. On the other hand, a new approach, based upon a multi-polar expansion of the photo-ionization kernel, permits to split the corona discharge/drift region modelling issue into two local (non-linear) coupled problems. Some example of coupled solutions and their comparison with Kaptzov approximation at emitters will be provided. Perspective for the domains will be discussed at the end of the presentation.

THE DYNAMIC RESPONSE OF NON-LINEAR MATERIALS: DAMAGE IN BIOLOGICAL AND ENGINEERING MATERIALS

Proud W.G., Tear G., Sory D., Rankin S., Brown K.

Imperial College, London, UK

Shock Wave Institute, Edmonton, Canada

w.proud@imperial.ac.uk, g.tear12@imperial.ac.uk, d.sory14@imperial.ac.uk,

s.rankin@imperial.ac.uk, k.brown@imperial.ac.uk

This presentation will consider the measurement of damage to three types of material, the damage process and the consequences of each. The materials come from different sources and are heterogeneous in nature. Cement where microwave-induced microcracks have a marked effect on the dynamic strength. Polymers where a combination of strain-rate, temperature and structure produce a complex strength and damage response and, finally, the loading of human STEM cells where pressure, strain-rate and environment have a marked influence. In each case the emphasis will be on the need to consider the type of measurement required, adaption of loading systems and how measurements can be used to characterise non-linear materials.

EFFECTIVE PROPERTIES OF HETEROGENEOUS MATERIALS IN RELATION TO THEIR MICROSTRUCTURES AND CROSS-PROPERTY CONNECTIONS

Sevostianov I.

New Mexico State University, New Mexico, US
igor@nmsu.edu

The presentation focuses on the proper quantitative characterization of microstructures of heterogeneous materials in the context of modeling their effective properties. This is a broad subject that covers different physical properties (elastic, thermal, electric, etc.), as well as various types of microstructures. Proper microstructural parameters must correctly represent the individual inhomogeneity contribution to the considered property. They may differ for different physical properties. The key problem is to identify the mentioned individual contributions. The possibility of explicit cross-property connections, which relate changes in different physical properties caused by various inhomogeneities (cracks, pores, inclusions), depends on the possibility to express the two properties in terms of the same or similar microstructural parameters. Practical usefulness of the cross-property connections lies in the fact that one physical property (say, electrical conductivity) may be easier to measure than the other (say anisotropic elastic constants). This allows one to bypass difficulties of expressing the elastic properties in terms of relevant microstructural information (that, in addition, may not be available). Such connections are also helpful in the design of microstructures for the combined conductive/mechanical performance and in monitoring of accumulated damage. We also discuss the possibilities of cross-property connections involving strength and plasticity parameters. Theoretical results are illustrated by multiple applications recently developed in the Center of Micromechanics at New Mexico State University

ГИДРОДИНАМИКА ДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМ: ОСНОВЫ И ПРИЛОЖЕНИЯ

Ахатов И.Ш.

Сколковский институт науки и технологий, Москва

I.Akhatov@skoltech.ru

Динамика дисперсных систем — это раздел механики, который изучает аэрозоли (капли жидкости, диспергированные в газе), эмульсии (капли жидкости, диспергированные в другой жидкости), суспензии (твердые частицы, диспергированные в газе или жидкости), порошки (упакованные пористые среды) и пузырьковые жидкости (пузырьки рассеяны в жидкости). Благодаря своей практической значимости динамика дисперсных систем на протяжении многих лет разрабатывалась многими исследовательскими группами по всему миру и успешно использовалась в России и за рубежом для решения проблем ядерной, нефтяной, химической и экологической инженерии.

В этой презентации обсуждаются прикладные, но фундаментальные проблемы гидродинамики дисперсных систем, имеющие отношение к промышленным приложениям. А именно: (1) конвективное горение и детонация в порошковых взрывчатых веществах; (2) коллапсирующие пузырьки и сонолюминесценция; (3) акустическая кавитация и пузырьковые облака; (4) коллимация аэрозольных пучков; (5) капиллярное осаждение; и многие другие.

ТРЕХМЕРНЫЕ ТЕЧЕНИЯ НЬЮТОНОВСКИХ И НЕНЬЮТОНОВСКИХ ЖИДКОСТЕЙ СО СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Василювский Ю.В.¹, Никитин К.Д.¹, Янбарисов Р.М.², Терехов К.М.¹, Олышанский М.А.³

¹*Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, Москва*

²*Сеченовский Университет, Москва*

³*Московский физико-технический институт, Долгопрудный*

vasilevs@dodo.inm.ras.ru

В лекции рассматриваются вопросы моделирования трехмерных течений ньютоновских и неньютоновских жидкостей со свободной поверхностью. Основопологающим принципом моделирования являются минимальные предположения об особенностях жидкости и течения, поэтому модель основана на уравнениях Навье-Стокса и уравнении переноса функции уровня для отслеживания эволюции свободной поверхности.

Высокое разрешение свободной поверхности обеспечивается за счет использования динамических адаптивных сеток типа восьмеричное дерево.

Численные примеры иллюстрируют решение различных задач — от осцилляции эллиптической капли до расчета штормовой нагрузки на морские сооружения и модели схода селя.

ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ ПЕРЕМЕННЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК УПРУГИХ ТЕЛ

Ватульян А.О.

Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону

aovatulyan@sfedu.ru

Рассмотрен ряд обратных задач механики деформируемого твердого тела по определению нескольких переменных характеристик – модулей упругости, плотности по измеренным на границе тела амплитудно-частотным характеристикам. Сформулированы общие принципы исследования нелинейных некорректных задач, которые возникают при решении. Представлена формулировка операторных соотношений в обратных задачах, построены итерационные процессы, на каждом шаге которого решается прямая задача с известными характеристиками и находятся поправки из решения операторных уравнений и систем с компактными операторами. Изучена чувствительность входной информации относительно искомых функций. В качестве примеров реконструкции представлены задачи для продольно неоднородных стержней, радиально неоднородных цилиндрических структур (круговых цилиндров и волноводов). Представлены результаты вычислительных экспериментов, сформулированы некоторые принципы нагружения, для которых реконструкция наиболее эффективна.

ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ СООТНОШЕНИЙ И ЛИНЕАРИЗОВАННЫЕ ПОСТАНОВКИ ЗАДАЧ УСТОЙЧИВОСТИ

Георгиевский Д.В.

МГУ имени М.В. Ломоносова, Научно-исследовательский институт механики, Москва
georgiev@mech.math.msu.su

В докладе будут изложены элементы теории определяющих соотношений. Касательный модуль и касательная податливость. Физическая линейность, тензорная линейность (квазилинейность) и нелинейность. Материальные функции. Реономные и склерономные среды. Однородные и неоднородные среды. Композиты. Упругие тела. Вязкие жидкости. Среда с памятью. Нелокальные среды.

Тензорные функции и их инварианты в теории определяющих соотношений. Потенциальные среды и условия потенциальности. Несжимаемые материалы.

Нелинейные упруговязкопластические модели. Классификация несжимаемых сред (квазилинейные модели, тела Бингама, идеально пластические среды, ньютоновские вязкие жидкости).

Постановка линеаризованной краевой задачи устойчивости течения относительно малых возмущений начальных данных.

МИКРОМЕХАНИКА ГЕТЕРОСТРУКТУР И УПРАВЛЯЕМЫЙ СИНТЕЗ НОВЫХ МАТЕРИАЛОВ: НАНОМАСШТАБНЫЙ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЙ КАРБИД КРЕМНИЯ НА КРЕМНИИ И ЕГО УНИКАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА

Кукушкин С.А., Осипов А.В.

Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург
sergey.a.kukushkin@gmail.com, andrey.v.osipov@gmail.com

На основе основных положений механики деформируемого твердого тела теоретически предложен и экспериментально реализован принципиально новый метод управляемого синтеза с заданными свойствами и структурой монокристаллических, низкодефектных полупроводниковых пленок на подложках при большом рассогласовании параметров решетки пленки и подложки. На основе данного метода разработана технология получения нового материала монокристаллической нанопленки карбида кремния на кремнии. Метод основан на открытии нового механизма релаксации упругих механических напряжений при росте эпитаксиальных пленок за счет предварительного внедрения в решетку подложки ансамбля нанообъектов – дилатационных диполей – устойчивых комплексов, состоящих из притягивающихся центров дилатации – атома углерода в межузельной позиции кремния и кремниевой вакансии. Впервые в мировой практике реализован метод последовательной замены атомов одного сорта другими прямо внутри исходного кристалла без разрушения его кристаллической структуры. Метод напоминает “генетический синтез” белковых структур в биологии. Качество структуры слоев, полученных данным методом, значительно превосходит качество пленок карбида кремния, выращенных на кремниевых подложках ведущими мировыми компаниями. Метод дешев и технологичен. В настоящее время технология прошла стадию НИОКР. Впервые в мире создан работающий лабораторный макет (излучающей свет) светодиодной структуры на кремнии с подслоем нанокарбида кремния. В настоящее время развернуты работы по созданию в России производства светодиодов на кремниевой основе. Начаты работы по созданию тонкопленочного транзистора с высокой подвижностью носителей заряда (HEMT), пьезоэлектрических датчиков и датчиков ночного видения стабильно работающих в широком диапазоне температур. Развернуты работы по созданию высоко чувствительных пьезодатчиков и акустических мембран.

Теоретически предсказано и экспериментально подтверждено образование новой фазы Si, находящейся в состоянии «полуметалла» на границе раздела SiC(111)/Si(111). Образование Si в состоянии «полуметалла» на границе раздела SiC/Si (111) связано с большими, кратковременно возникающими (время импульса порядка 10^{-5} – 10^{-4} сек.) «импульсами сдвливания» при переходе Si в SiC. Показано, что давления сжатия, возникающие тонком приграничном слое толщиной порядка нескольких нанометров, могут достигать величин порядка 200-250 GPa. Давления подобной величины приводят к образованию особых, ранее неизвестных, свойств границы раздела SiC(111)/Si(111).

Работа выполнена в рамках проекта РФФИ: 20-12-00193.

ЗАВИСИМОСТЬ ХАРАКТЕРИСТИК ПРЕДЕЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ТЕЛ ОТ УСЛОВИЙ НАГРУЖЕНИЯ

Ломакин Е.В.^{1,2}, Федулов Б.Н.¹

¹*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва*

²*Московский авиационный институт, Москва*

evlomakin@yandex.ru, fedulov.b@mail.ru

Сопротивление многих материалов пластическому деформированию зависит от вида внешних воздействий. Это связано с тем, что механизмы необратимого деформирования материалов включают не только механизмы скольжения дислокаций, но также развитие существующих дефектов и образование новых нарушений сплошности в структуре материалов, перемещение структурных элементов и другие внутренние процессы. При этом пластическое деформирование сопровождается необратимым изменением объема. Для исследования пластического деформирования и предельного состояния тел, обладающих такими свойствами, предложено условие пластичности в соответствующем обобщенном виде с использованием параметра вида напряженного состояния, представляющего собой отношение гидростатической компоненты напряжения к эквивалентному напряжению Мизеса, характеризующему, в среднем, соотношение между нормальными и касательными напряжениями в среде, названному в литературе трехосностью напряжений. Данное условие пластичности включает известные условия пластичности, такие как условие Губера – Мизеса, условие Друкера – Прагера, условие Грина. Согласно ассоциированному закону течения, скорость остаточной объемной деформации пропорциональна эквивалентной скорости деформации с коэффициентом пропорциональности, зависящем от параметра вида напряженного состояния, т.е. принимающем различные значения для разных условий нагружения. Особенности пластического деформирования рассматриваемого класса материалов проиллюстрированы применительно к условиям плоской деформации. В рамках жесткопластической модели получены решения ряда краевых задач для полос с вырезами, о действии штампов на поверхности тела. Получены аналитические выражения для значений предельных нагрузок в зависимости от геометрических параметров тел и степени чувствительности их свойств к виду напряженного состояния. Установлено, что значения предельных нагрузок зависят от степени чувствительности свойств тел к виду напряженного состояния и существенно отличаются от значений, полученных в предположениях о пластической несжимаемости материалов и инвариантности их свойств к условиям нагружения. При этом расчеты с использованием упругопластической модели показали, что учет упругих деформаций не оказывает заметного влияния на значения предельных нагрузок.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 20-01-00356).

Литература

- [1] Lomakin E.V., Fedulov B.N. Plane strain extension of a strip made of a material with stress state type dependent material properties and weakened by cuts with circular base – *Mechanics of Solids*, 2013, **48**(4). – P. 424-430. Спивак Л.В., Скрыбина Н.Е., Кац М.Я. Водород и механическое последствие в металлах и сплавах – Пермь, 1993. – 343 с.
- [2] Lomakin E.V., Fedulov B.N., Melnikov A.M. Constitutive Models for Anisotropic Materials Susceptible to Loading Conditions. Belyaev A.K., Irschik H., Krommer M. (eds.), *Mechanics and Model-Based Control of Advanced Engineering Systems*, 2014. P. 209-216.
- [3] Vildeman V. E., Lomakin E. V., Tret'yakova T. V., Tret'yakov M.P. Supercritical Deformation and Fracture of Bodies with Concentrators under Plane Stress State Conditions – *Mechanics of Solids*, 2017, **52**(5). – P. 488–494.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ ПЛАСТИН С ТРЕЩИНАМИ В ТЕРМИНАХ КОНЦЕНТРАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ, ОПРЕДЕЛЕННЫХ В НЕЛОКАЛЬНОЙ ТЕОРИИ УПРУГОСТИ

Лурье С.А.^{1,2}, Васильев В.В.¹

¹*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва*

²*Институт прикладной механики РАН, Москва*

salurie@mail.ru, vvvsal@bk.ru

В последние годы широко обсуждается проблема сингулярностей в задачах теории упругости и механики трещин. Сингулярность решений для напряжений в линейной теории упругости исключает возможность применения критериев прочности тел с концентрацией напряжений. Альтернативные подходы, развиваемые с привлечением моделей когезионных зон, теории размерных эффектов, перидинамической теории упругости, теории критических раскрытий трещин, и т. д. привлекают большое внимание в последние десятилетия.

Градиентная упругость и нелокальная теория, используемая в данной работе (близкая к перидинамической теории) обеспечивает регуляризацию сингулярных решений дифференциальных уравнений теории упругости, позволяет описывать размерные эффекты и допускает возможность использования традиционных подходов к оценке прочности. В работе анализируется вариант обобщенной теории упругости, построенный с использованием техники нелокального дифференцирования, где решение краевой задачи расщепляется в случае статических краевых условий на последовательность решения классической упругости и краевой задачи для уравнения Гельмгольца. В общем случае, предлагается строить несингулярные решения для тензора напряжений через решения неоднородных обобщенных уравнений Гельмгольца для обобщенной функции напряжений. Этим решается проблема согласованности компонент обобщенных напряжений. При этом критерий разрушения формулируется в локальных напряжениях Коши. Рассматриваются изотропные и ортотропные материалы.

Предлагается концепция концентрации напряжений для механики трещин, которая позволяет прогнозировать и предельные напряжения для хрупких трещин и начало предела текучести для нехрупких материалов. Предлагаемый подход включает экспериментальное определение масштабного параметра модели среды, входящего в уравнения обобщенной теории, и вычисление коэффициента концентрации напряжения в окрестности конца трещины.

Делается попытка обработки известных результатов экспериментальных испытаний материалов с трещинами с использованием концепции концентрации напряжений и метода конечных элементов, реализованного для градиентной теории упругости. Используются критерии разрушения для напряжений, которые имеют конечные значения во всей области, включая вершину трещины. Другими словами, стандартный метод оценки прочности по концентрации напряжений, используемый в классической теории упругости для тел с регулярной геометрии, переносится на тела с трещинами с учетом эффектов градиента деформаций.

Работа поддержана грантом РФФИ: 19-01-00355.

УРАВНЕНИЯ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ В ДИНАМИКЕ ПОЛИМЕРНЫХ РАСТВОРОВ

Мелешко С.В.¹, Пухначев В.В.^{2,3}

¹ *School of Mathematics, Institute of Sciences, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand,*

² *Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск, Россия,*

³ *Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия*

pukhnachev@gmail.com

Необычные свойства, которые обнаруживаются в движении воды при внесении в нее небольшого количества растворимого полимера, существенно проявляются в пограничном слое вблизи обтекаемых твердых поверхностей. В докладе формулируются уравнения плоского нестационарного ламинарного пограничного слоя для двух моделей в динамике полимерных растворов – модели Павловского и модели Ривлина – Эриксона. Изучаются качественные свойства указанных моделей на основе их точных решений. Обе указанные модели содержат единственный эмпирический параметр – нормализованный коэффициент релаксационной вязкости κ с размерностью квадрата длины. Величина $\kappa^{1/2} / \delta$, где δ – толщина пограничного слоя Прандтля, показывает относительный вклад релаксационного фактора в динамику процесса. Модель Павловского обладает очень богатыми групповыми свойствами, подобно классической модели Прандтля. Характерной особенностью модели Ривлина – Эриксона, в отличие от модели Павловского, является зависимость давления в пограничном слое от вертикальной координаты. Подтверждение этой зависимости или ее отсутствия в эксперименте могло бы служить аргументом в пользу выбора одной или другой конкурирующих теоретических моделей.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-01-00096).

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ ЦЕПЕЙ МАРКОВА К МОДЕЛИРОВАНИЮ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В СПЛОШНЫХ И ДИСПЕРСНЫХ СРЕДАХ

Мизонов В.Е.

Ивановский государственный энергетический университет, Иваново
mizonov46@mail.ru

Изложены научные основы применения теории цепей Маркова к математическому моделированию процессов переноса в сплошных и дисперсных средах. Эта теория соприродна процессам переноса. Она изучает эволюцию распределения вероятностей состояний в некотором выбранном пространстве состояний. Задачей же моделирования процессов переноса является изучение эволюции распределения некоторого исследуемого свойства в некотором выбранном пространстве состояний этого свойства. При этом пространство изменения этого свойства разбивается на конечное число малых ячеек идеального перемешивания с равномерным распределением этого свойства внутри каждой ячейки. Это распределение описывается вектором состояния, а его эволюция – переходной матрицей (матрицей переходных вероятностей), которая является математическим образом исследуемого процесса или аппарата и строится по стандартным правилам. Несомненным достоинством этой стратегии является то, что весьма разнородные процессы моделируются на основе универсального алгоритма, доступного в инженерной практике. Приведены примеры использования теории к моделированию конкретных процессов: формирование многокомпонентных смесей разнородных дисперсных материалов, нелинейная теплопроводность в многослойной среде с фазовыми переходами в слоях и нелинейная теплопроводность в среде с подвижной границей (задача Стефана).

КОМПОЗИТЫ С МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ МАТРИЦЕЙ: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ, НЕРЕШЁННЫЕ ЗАДАЧИ, ПЕРСПЕКТИВЫ

Милейко С.Т.

Институт физики твёрдого тела РАН, Черноголовка

mileiko@issp.ac.ru

Современное композитоведение обязано своим появлением композитам с металлической матрицей (КММ), послужившим А. Келли в середине 60-х годов прошлого столетия модельными материалами. Однако, родившись, по-видимому, несколько преждевременно, КММ далее ушли в тень в результате всеобъемлющего, агрессивно-полезного распространения углепластиков (УП), обязанных своим рождением, во-первых, возникшему после работ Келли и его современников пониманию в научных, инженерных и в правительственных кругах России советского периода её Истории и стран по противоположную сторону железного занавеса, - пониманию необходимости замены в наиболее развитых и важных для общества областях техники (авиационной, ракетно-космической и др.) достигающих своего предельного уровня металлических сплавов (МС) принципиально новыми материалами, могущими обеспечить качественный скачок характеристик техники; во-вторых, изобретению в то же самое время процесса производства углеволокна путём переработки существовавших полимерных волокон.

Успехи в разработке композитов с керамической матрицей также способствовали этому «прозябанию» КММ в тени; они лишь изредка выходили в свет, в частности, боро-алюминий продемонстрировал свои уникальные возможности, например, при запуске первых спутников системы ГЛОНАСС, и, одновременно - слабости, связанные, главным образом, с дороговизной соответствующих армирующих волокон. Сегодняшние «взаимоотношения» в паре КММ-УП напоминают о ситуации в паре УП-МС полвека назад: углепластики по уровню своего развития приближаются к металлическим сплавам и следующий качественный скачок в характеристиках жизненно-важных областей техники невозможен без скачка в характеристиках конструкционных материалов. Таковыми должны послужить волоконные композиты с металлической матрицей.

В докладе на примере композитов углеволокно-титановая матрица и оксидное волокно-молибденовая матрица, разрабатываемых в исследовательской группе автора, показываются (1) некоторые нерешённые задачи технологической механики композитов, (2) перспективы разработки новых КММ, (3) технологический, экономический и экологический эффект применения КММ-конструкций в авиационной и ракетно-космической технике.

ПОВЕРХНОСТЬ ЖИДКОСТИ В ДВАДЦАТЬ ПЕРВОМ ВЕКЕ

Носков Б.А.

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург
b.noskov@spbu.ru

Механика жидкости со свободной поверхностью неизбежно должна учитывать поверхностные свойства. Примерно до середины прошлого века единственной характеристикой жидкости, учитываемой в гидродинамических задачах, было поверхностное (межфазное) натяжение. Во второй половине двадцатого века стали рассматриваться задачи, в которых также необходимо учитывать поверхностные реологические свойства. Классический пример представляет задача о затухании поверхностных волн. Расчет коэффициента затухания без учета дилатационной поверхностной упругости приводит к значениям, в несколько раз меньшим экспериментально определяемой величины. В физической химии поверхностных явлений использование дилатационной поверхностной реологии позволило получить новую информацию о процессах в поверхностном слое растворов поверхностно-активных веществ. Для двадцать первого века характерно расширение арсенала экспериментальных методов химии поверхностных явлений и одновременно применение этих методов к более сложным системам, содержащим макромолекулы и наночастицы. Нано- и микрочастицы могут адсорбироваться из объемной фазы, но могут и самопроизвольно образовываться на межфазной границе, приводя к новым эффектам, влияющим на течение жидкости. С другой стороны, интерпретация экспериментальных результатов, в частности, по эффективному поверхностному натяжению и поверхностной реологии оказывается более сложной. Планируется представить краткий обзор результатов последних лет по свойствам адсорбционных и нанесенных поверхностных нано-и микрогетерогенных пленок на границе жидкость-газ.

Работа поддержана РФФИ: 18-29-19100 мк.

ОПТИЧЕСКОЕ ПРОСВЕТЛЕНИЕ БИОЛОГИЧЕСКИХ ТКАНЕЙ: НА ПУТИ К МУЛЬТИМОДАЛЬНОЙ МЕДИЦИНСКОЙ ДИАГНОСТИКЕ

Тучин В.В.

Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г.

Чернышевского, Саратов

Институт проблем точной механики и управления РАН, Саратов

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск

Университет ИТМО, Санкт-Петербург

Федеральный научный центр Биотехнологии РАН, Москва

tuchinvv@mail.ru

В лекции будет дано краткое описание оптики биологических тканей, концепции «окон прозрачности биотканей» и метода оптического просветления (ОП), основанного на контролируемой и обратимой модификации структурных и оптических свойств ткани путем ее иммерсии в биосовместимых оптических просветляющих агентах (ОПА). Будут представлены основы и механизмы ОП, позволяющие существенно повысить качество оптической визуализации и эффективность лазерного воздействия на живые объекты. Будет проанализирован перенос воды в тканях и изменение их свойств под действием ОПА, включая обратимое обезвоживание и усадку, баланс свободной и связанной воды. Увеличение глубины зондирования (или воздействия) и контраста оптического, КТ и МРТ изображения для различных тканей человека и животных, включая кожу, склеру глаза, твердую мозговую оболочку, ткани мозга, миокард, мышечную ткань, хрящевую и костную ткани, кровь и др. ткани, будет продемонстрировано на примерах исследований с использованием спектрофотометрии, ОКТ, фотоакустической микроскопии, линейной и нелинейной флуоресценция, ГВГ и КР микроскопии и динамической спекл-визуализации полного поля. Будут представлены экспериментальные данные по коэффициентам диффузии и проницаемости глюкозы, глицерина, ПЭГ, Omnipaque, Gadovist, альбумина и других ОПА для нормальных и патологических тканей. Будут обсуждены перспективы использования иммерсионного ОП/контрастирования для улучшения визуализации живых объектов с использованием различных методов визуализации, работающих в сверхшироком диапазоне длин волн от возбуждения пучками свободных электронов (черенковское излучение) до терагерцевых волн.

ГЕОМЕТРИЯ И ЭНЕРГЕТИКА МОДЕЛЕЙ ГЕМОДИНАМИКИ И РОСТА МОЗГА

Чупахин А.П.

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск

Новосибирский государственный университет, Новосибирск

chupakhin@hydro.nsc.ru

В работе рассмотрены геометрический и энергетический подход к исследованию гемодинамики церебральных сосудов и росту мозга плода человека. Основой для анализа гемодинамики церебральных сосудов являются данные внутрисосудистого мониторинга кровотока, разработанного совместно с медиками Федерального медицинского центра Клиника им. Ак. Мешалкина. Важным результатом этого мониторинга является разработка и использование диаграмм “давление-скорость” (P-V), характеризующих релаксационные колебания гидроупругой системы “поток крови-упругая стенка сосуда” как в норме, так и при наличии аномалии. Разработан вычислительный комплекс для расчета такой гидроупругой системы. При расчете с использованием этого комплекса системы, моделирующей сосуд с аневризмой и дивертикулом (маленькой субаневризмой), получено совпадение с реальными (P-V) данными нейрохирургического мониторинга. Показана роль различных энергетических характеристик системы: энергий кинетической, вязкой диссипации, изгиба.

Выполнена обработка и анализ клинических данных магнито-резонансной томографии мозга плода человека, полученных в Томографическом центре СО РАН. Обнаружены базисные закономерности роста мозга плода в норме: линейный закон роста, разделение структур мозга на три группы по значениям скоростей роста, высокая степень корреляции скоростей роста для пар структур во втором триместре развития и большая индивидуализация в третьем.

Обсуждаются вопросы взаимосвязи геометрии структур мозга плода, таких как мозолистое тело и мозжечок, с изопериметрическим отношением (куб площади к квадрату объема) и энергией УиллмораХеллфриха.

PHYSICAL AND MECHANICAL STUDIES OF GRANITE ROCKS IN UM TAGHIR AREA, EASTERN DESERT, EGYPT

Awad H.A.M.^{1,2}, Nastavkin A.V.¹

¹*Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia*

²*Al-Azhar University, Geology Department, Faculty of Science, Egypt*

hamdiawaad@gmail.com, nastavkin@sfedu.ru

Granitic rocks are considered one of the most important economic materials that use as building materials, ornamental stones and for other purposes. According to the radiological studies carried out on these granites, the activity concentrations of ^{226}Ra , ^{232}Th and ^{40}K of the different types of granitic rocks were found to be normal as well as harmful radiation effects as a result of the natural radioactivity of investigated granites do not pose a danger to the public and in the field of construction, adornment and the extent of their impact on those who use them in their homes or for other purposes [1]. The current study aims to determine some of the physical and mechanical properties of granites in Um Taghir area to detect suitability of these rocks for ornamental stones. The samples of the granitic rocks were cut according to the American Society for Testing and Materials specifications (cubic shape) for the detection of mechanical properties including uniaxial compressive strength in addition to Some of the physical properties were determined such as specific gravity, water absorption, porosity, abrasion resistance, thermal expansion, weather resistance, frost resistance and acid resistance (HCl & H_2SO_4) were also determined for each sample. The natural stones unlike in their nature from human-made materials, are not necessarily restricted or confined in mechanics, structure and/or behavior. Usually some of them need to conservation treatment, which may be recommended for uses of the horizontal surfaces of the table or kitchen tools. Their surface is characterized by waterproof and resistant to corrosive liquids. Substantially the ornamental stones are widespread in Egypt, they represent in Eastern Desert, Sinai and the Nile Valley [2]. Generally, granitic rocks are resistant well to both the pollution and weathering as well as having a distinctive beautiful appearance [3]. We concluded that solid rock samples gave a good result due to mechanical and physical tests. So that economical appearances of the granite samples of study area were assembled to give an idea of how much we can save costs due to quarry, ease of loading and transportation and later use for an economic purpose.

References

- [1] Awad H.A., Zakaly H.M.H., Nastavkin A.V., El-Taher A. Radioactive content in the investigated granites by geochemical analyses and radiophysical methods around Um Taghir, Central Eastern Desert, Egypt // Journal of Physics: Conference Series. 2020. V. 1582(1). 012007.
- [2] Raimondo Ciccu and Hany Hamdy (2005). Strategic study on the Egyptian Marble and Granite Sector, <http://www.imc-egypt.org>, August 2005.
- [3] Bates R.L. Geology of the industrial rocks and mineral. - New York: Harper & Brother, 1960. - 441 p.

A FEW WORDS ABOUT THE ROLE OF OCTAN FOAM COVERED AIR-SEA INTERFERENCE IN HURRICANES

Ephim Golbraikh¹ and Yuri M. Shtemler²

¹*Department of Physics, Ben-Gurion University of the Negev, P.O. Box 653, Beer-Sheva 84105, Israel*

²*Department of Mechanical Engineering, Ben-Gurion University of the Negev, P.O. Box 653, Beer-Sheva 84105, Israel*

The role of the water-foam-air three-layer configuration in the energy dissipation and momentum transfer between the atmosphere and the ocean has been first studied in [1,2]. As shown in [3-5] the behavior of the total momentum transfer coefficient depends on the foam-coverage coefficient and average size of the foam bubble. Here, we will discuss behavior of the surface momentum and enthalpy transfer coefficients, C_D and C_K , varied with the hurricane wind speed. Both the momentum- and enthalpy-fluxes through the ocean-atmosphere interface are reduced in hurricane conditions by the effect of the foam layer, and the effective size and water-film thickness of the foam bubbles are considered as the drag- and heat-resistance elements of the interface, respectively.

The effect of the foam layer sandwiched between the atmosphere and the ocean allows explaining some principal features in the behavior of both surface-transfer coefficients, as a well-known significant discrepancy between the measurement data for the total momentum- and heat-transfer across air-sea interface observed in the laboratory and open-sea conditions. Indeed, the laboratory measurements of the momentum- and enthalpy-transfer coefficients are carried out in foam-free conditions, but in the presence of both the wave and spray effects. Although they were aimed to simulate the momentum- and heat-transfer coefficients in the open-sea hurricane conditions, the resulting transfer coefficients measured in both conditions strongly differ from each other at high wind speeds.

[1] Powell MD, Vickery PJ, and Reinhold TA (2003) Reduced drag coefficient for high wind speeds in tropical cyclones. *Nature* **422**:279–283

[2] Shtemler Yu, Golbraikh E, and Mond M (2010) Wind–wave stabilization by a foam layer between the atmosphere and the ocean. *Dyn. Atmosph. and Oceans* **50**: 1–15

[3] Golbraikh E, and Shtemler Yu (2016) Foam input into the drag coefficient in hurricane conditions. *Dyn. Atm. Oceans* **73**: 1–9

[4] Golbraikh E, and Shtemler Yu (2018) Correlation between foam-bubble size and drag coefficient in hurricane conditions, *Ocean Dyn.* **68**:817–824

[5] Golbraikh E, and Shtemler Yu (2020) Momentum and heat transfer across the foam-covered air-sea interface in hurricanes, *Ocean Dyn.* **70**:683–692

КВАЗИ-ДВУХЛЕТНИЕ КОЛЕБАНИЯ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ И ВОЛНЫ РОССБИ

Kleeorin N. ¹, Rogachevskii I. ¹, Кузанын К. М. ², Степанов Р.А. ³

¹ Ben-Gurion University of the Negev, Beer-Sheva, Israel
nat@bgu.ac.il, gary@bgu.ac.il

² Институт Земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, Москва
kuzanyan@izmiran.ru

³ Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
rodion@icmm.ru

Волны Россби [1] проявляются повсеместно как атмосферных и океанических гидродинамических течениях, а также возможно и в магнитно-гидродинамических течениях в конвективных оболочках Солнца и звезд. Привлекательная сторона этого явления в том, что волны Россби могут существовать как в конвективной зоне, так и в лучистом ядре.

В настоящей работе мы изучаем проявление волн Россби в конвективной оболочке под влиянием среднего (крупномасштабного) магнитного поля Солнца. Эффекты, связанные с волнами Россби, могут в основе природы квази-двухгодичных колебаний [2] различных индикаторов солнечной активности и солнечно-земных связей. Мы провели вейвлет-анализ известных наблюдательных данных солнечной активности с целью определения фазы солнечного цикла, в которой эти колебания наиболее выражены. С теоретических позиций показано, что существует несколько мод (около 38) волн Россби, обеспечивающих двухгодичные колебания. Среди них выделенной модой является мода с $l=7$, $m=1$. Именно эта мода может существовать одновременно как в конвективной, так и в лучистой зоне Солнца, влияя одновременно как на солнечную активность, так и, возможно, на нейтринный поток, модулируя ядерные реакции в центральной части лучистой зоны.

Исследование проводится при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант РНФ-21-72-20067)

Литература

- [1] C. G. Rossby // J. Mar. Res. 1939 V. 2, P. 38.
- [2] Bazilevskaya G., Broomhall A.-M., Elsworth Y., Nakariakov V. M., 2014, Space Sci. Rev., 186, 359

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ФРИКЦИОННЫХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ ОПОРНОЙ ЧАСТИ НА ДЕФОРМИРОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ПРИ РАЗНОЙ ТОЛЩИНЕ АНТИФРИКЦИОННОЙ ПРОСЛОЙКИ

А.А. Адамов¹, А.А. Каменских², А.П. Панькова²

¹Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь;

²Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь;
adamov.aa@ya.ru, anastasia_pankova@mail.ru, anna_kamenskih@mail.ru

Отмечается, что геометрическая конфигурация сферических опорных частей мостов, изучение свойств антифрикционных материалов в частности и работа их в качестве относительно тонких слоев скольжения конструкций являются современными проблемами механики, связанными с прогрессом в сфере строительства и мостостроения [1].

В работе рассматривается фрикционное контактное деформирование полимерной антифрикционной прослойки сферической опорной части, на примере конструкции производства ООО «АльфаТех» (г. Пермь, Россия). В качестве прослойки опорной части, рассматривается три материала: сверхвысокомолекулярный полиэтилен производства Германия; антифрикционный композиционный материал на основе фторопласта со сферическими бронзовыми включениями и дисульфидом молибдена; модифицированный фторопласт. Физико-механические и фрикционные свойства исследуемых материалов были получены экспериментально [2]. Моделирование выполнено в рамках осесимметричной постановки при номинальной вертикальной нагрузке 1000 кН. Математическая постановка была ранее описана в [1] и дополняется учетом больших деформаций в материале антифрикционного слоя скольжения.

В рамках исследования выполнена серия численных экспериментов для прослоек толщиной 4, 6 и 8 мм с коэффициентами трения без учета и с учетом смазки по сопрягаемым поверхностям. Анализ влияния трения на параметры контакта и деформационные характеристики элементов сферической опорной части выполнен в сравнении с фрикционным контактом элементов конструкции при справочном значении коэффициента трения 0,04. Установлено, что фрикционные свойства антифрикционных материалов значительно влияют на контактные параметры: площадь полного сцепления контактных поверхностей, контактное касательное напряжение и площадь поверхности, находящейся в состоянии «полное отлипание». Наблюдается снижение уровня контактных параметров, уменьшение площади полного сцепления контактных поверхностей при увеличении толщины слоя скольжения. При всех рассмотренных вариантах значений коэффициента трения минимальные перемещения по нормали к поверхности относительно свободного торца слоя скольжения наблюдается в прослойке из модифицированного фторопласта.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант №18-08-00903).

Литература

- [1] Адамов А.А., Каменских А.А., Панькова А.П. Численный анализ геометрической конфигурации сферической опорной части с антифрикционной прослойкой из разных материалов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2020. – № 4. С. 15-26.
- [2] Адамов А.А., Каменских А.А., Носов Ю.О. Математическое моделирование поведения современных антифрикционных полимеров // Прикладная математика и вопросы управления. 2019. № 4. С. 46-59.

ОСНОВНЫЕ КРИТЕРИИ РАБОТОСПОСОБНОСТИ АНТИФРИКЦИОННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ОПОРНЫХ ЧАСТЯХ С ШАРОВЫМ СЕГМЕНТОМ

Адамов А.А., Келлер И.Э.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

adamov@icmm.ru

Опорные части с шаровым сегментом (ОЧШС) широко применяются при строительстве мостов, эстакад и т.п. сооружений для минимизации усилий и моментов, передаваемых от мостовых пролетов на опоры мостов. Классическая ОЧШС различного назначения (неподвижная, линейно-подвижная или всесторонне подвижная) содержит два основных тонких (отношение толщины к диаметру < 0.05) слоя антифрикционного полимерного материала (АПМ), размещенных в углублениях плоской и сферической формы. При угловых и линейных смещениях мостового пролета относительно опоры слои АПМ работают в парах трения с полированной нержавеющей сталью 12Х18Н10Т или с полированным хромированным шаровым сегментом при возвратно-поступательном циклическом сдвиговом деформирования (деформация сдвига порядка $\pm 1\%$) силами трения с контактным давлением до 60 МПа. Срок службы ОЧШС — до 50 лет, рабочий диапазон температур $\pm 50^\circ\text{C}$ в естественных условиях окружающей среды, изменение толщины слоев АПМ вследствие износа и ползучести не должно превышать минимальных зазоров между стальными элементами ОЧШС, смещающимися относительно друг друга.

Сравнительный анализ различных АПМ по механическим характеристикам, коэффициентам трения [1], ползучести и старению, доступности для массового производства ОЧШС оказался недостаточным для оценки работоспособности конкретных АПМ в составе ОЧШС. Например, Арфлон 204 – радиационно-модифицированный фторопласт 4, наполненный углеволокном (ТУ 20.16.30-002-06335753-2017) был оценен как перспективный АПМ для ОЧШС, но при испытаниях на установке [2] (износостойкость при возвратно-поступательном движении с рабочим давлением 60 МПа) после первых ~ 200 м пути скольжения проявил неприемлемые структурные изменения, обусловленные расслоением по границам углеволокно - фторопласт. Поэтому при разработке новых композитных антифрикционных материалов для ОЧШС на основе фторопласта или сверхвысокомолекулярного полиэтилена необходимо обеспечить структурную стабильность АПМ в рабочих условиях эксплуатации за счет различных механизмов взаимодействия частиц наполнителей с макромолекулами полимерной матрицы.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 20-48-596012 р_НОЦ_Пермский край).

Литература

- [1] Адамов А.А. Экспериментальное изучение механического поведения и трения полимерных антифрикционных материалов при давлениях до 60 МПа. // Сб. докл. XI Всеросс. съезда по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики, г. Казань, 20-24 августа 2015 г. – С. 79-81.
- [2] Пат. 2692130 Российская Федерация, МПК8 G01N 3/56. Испытательная установка реверсивного трения / Ипанов А.С., Адамов А.А., Светлаков А.В., Василенко В.Д., Патраков И.М., Непеин И.В., заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью (ООО) "АльфаТех" (RU). - № 2017137155; заявл. 24.10.2017; опубл. 21.06.2019. - Бюл. № 18. - 1 с. <https://findpatent.ru/patent/269/2692130.html>

ВЛИЯНИЕ НЕОДНОРОДНОСТИ ПОДЛОЖКИ НА РАДИАЛЬНЫЕ КОЛЕБАНИЯ ЗАЖАТОГО ГАЗОВОГО ПУЗЫРЬКА

Алабужев А.А.

Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

alabuzhev@icmm.ru

Исследуются собственные и вынужденные колебания газового пузырька, окруженного несжимаемой жидкостью конечного объема. Пузырек ограничен в осевом направлении двумя параллельными твердыми плоскостями и имеет форму кругового цилиндра в состоянии равновесия. Равновесный краевой угол между боковой поверхностью пузырька и твердой плоскостью прямой. Внешняя поверхность жидкости является недеформируемой, т.е. на такой поверхности поверхностное натяжение мало и не учитывается. На систему действует внешнее однородное пульсационное поле давления. Динамика линии контакта учитывается с помощью эффективного граничного условия [1]: скорость движения контактной линии предполагалась пропорциональной отклонению краевого угла от равновесного значения. Коэффициент пропорциональности, так называемый параметр смачивания (постоянная Хоккинга), характеризует свойства жидкости и материала подложки и является в рассматриваемом случае функцией координат. Такой подход позволяет описывать неоднородность поверхности подложки, по которой движется линия контакта трех сред [2]. Влияние одинаковых однородных пластин на радиальные колебания газового пузырька изучалось в работе [3], а разных однородных в [4].

Неоднородность поверхностей оказывает существенное влияние на собственные колебания. При однородных поверхностях, частота радиальных колебаний может обращаться в ноль на некотором интервале значений параметра смачивания. Длина этого интервала растет с увеличением геометрического параметра. Эта частота уменьшается с увеличением радиуса свободной поверхности внешней жидкости и увеличивается с ростом давления газа в пузырьке. Из-за неоднородности поверхности этот интервал может исчезать, а частота объемных собственных колебаний всегда отлична от нуля.

Осциллирующее внешнее давление приводит к появлению вынужденных объемных колебаний пузырька в случае однородных пластин. Из-за неоднородности появляются и другие четные азимутальные моды. Но большая часть энергии распределена в радиальной моде, и такие колебания вносят основной вклад в амплитуду колебаний и форму пузырька. Амплитуды азимутальных мод существенны только вблизи соответствующих резонансных частот.

Литература

- [1] Hocking L.M. The damping of capillary-gravity waves at a rigid boundary // J. Fluid Mech. – 1987. – V. 179. – P. 253-266.
- [2] Alabuzhev A.A. Influence of heterogeneous plates on the axisymmetrical oscillations of a cylindrical drop // Microgravity Sci. Technol. – 2018. – V. 30, Iss. 1–2. – P. 25–32.
- [3] Алабужев А.А. Поведение цилиндрического пузырька под действием вибраций // Вычислительная механика сплошных сред. – 2014. – Т.7, № 2. – С. 151-161.
- [4] Alabuzhev A.A. Influence of surface properties on axisymmetrical oscillations of a cylindrical bubble // Interfac. Phenom. Heat Transfer. – 2019. – V. 7, iss. 3. – P. 255-268.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ СТАЛЕЙ ПО СЛОЖНЫМ МНОГОЗВЕННЫМ ТРАЕКТОРИЯМ

Алексеев А.А.¹, Зубчанинов В.Г.¹, Гулятьев В.И.¹

¹Тверской государственный технический университет, Тверь
alexeew@bk.ru

В работе представлены результаты экспериментальных исследований и численного моделирования процессов сложного упругопластического деформирования конструкционных сталей по плоским многоцветным траекториям деформирования в девиаторном пространстве А.А. Ильюшина, а также оценка достоверности предлагаемых математических моделей теории упругопластических процессов при сравнении модельных и экспериментальных данных. Для численного моделирования использовались определяющие соотношения теории процессов [1], учитывающие скалярные и векторные свойства материалов.

Предложены математические модели теории упругопластических процессов для класса траекторий деформирования типа многозвенных прямолинейных ломаных траекторий [2, 3], криволинейных траекторий с участками постоянной кривизны [4], а также криволинейных траекторий переменной кривизны типа спираль Архимеда. В математической модели использованы аппроксимации функционалов, зависящие от всех параметров внутренней геометрии рассматриваемых траектории деформирования. Основные уравнения математической модели были приведены к задаче Коши, для численного решения которой был использован метод Рунге-Кутты четвертого порядка точности.

Для оценки достоверности полученных результатов расчета по предложенным математическим моделям было проведено их сопоставление с данными макроэкспериментов, проведенных на трубчатых стальных образцах. Экспериментальные исследования выполнены на автоматизированном испытательном комплексе на сложное нагружение СН-ЭВМ в лаборатории механических испытаний кафедры «Сопротивление материалов, теории упругости и пластичности» Тверского государственного технического университета. Экспериментальные результаты и модельные данные приведены в векторном представлении напряжений и деформаций по А.А. Ильюшину. Показано, что предлагаемые математические модели качественно и количественно удовлетворительно описывают основные эффекты сложного пластического деформирования для рассмотренных классов сложных многозвенных траекторий деформирования, в том числе с криволинейными участками.

Литература

- [1] Зубчанинов В.Г. Механика процессов пластических сред. М.: Физматлит, 2010. – 352 с.
- [2] Зубчанинов В.Г., Алексеев А.А., Гулятьев В.И. Моделирование процессов упругопластического деформирования материалов по многозвенным кусочно-ломаным прямолинейным траекториям // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2017. № 3. – С. 203–215. DOI: 10.15593/perm.mech/2017.3.12
- [3] Алексеев А.А., Зубчанинов В.Г., Гулятьев В.И.. Экспериментальное и теоретическое исследование процессов сложного упругопластического деформирования материалов по некоторым многозвенным траекториям // Вестник ЧГПУ им. И.Я. Яковлева Серия: Механика предельного состояния. 2020. № 3 (45). – С. 64–71
- [3] Zubchaninov V.G., Alekseev A.A., Gultiaev V.I., Alekseeva E.G.. Modeling of elastoplastic deformation of structural steel by a trajectory containing three circles touching internally // Materials Physics and Mechanics. No 5, Vol. 42, 2019. – P. 528-534. DOI: 10.18720/MPM.4252019_6

УРАВНЕНИЯ СРЕДНЕГО ПОЛЯ И ТУРБУЛЕНТНОГО ДИНАМО В РАМКАХ МУЛЬТИПЛИКАТИВНОГО ПОДХОДА.

Аллахвердиев Р.Р.¹, Юшков.Е.В.^{2,3,4}, Соколов.Д.Д.^{3,4}

¹Бакинский филиал МГУ, Баку, Азербайджан

²ИКИ РАН, Москва, Россия

³МГУ имени М.В.Ломоносова, Москва, Россия

⁴Центр фундаментальной и прикладной математики, Москва, Россия
ramin.a.vedi@gmail.com , yushkov.msu@mail.ru , sokoloff.dd@gmail.com

Усреднение уравнения магнитной индукции по случайному полю скорости лежит в основе теории динамо, описывающей формирование крупномасштабных астрофизических магнитных полей. Стандартным подходом к усреднению является асимптотический метод, предложенный Краузе и Рэдлером для двухмасштабной турбулентности, то есть для такого случайного поля скорости, которое можно представить, как сумму крупномасштабной медленно меняющейся составляющей и мелкомасштабной флуктуирующей компоненты. Именно этим методом были получены классические системы солнечного динамо Паркера и галактического дискового динамо. В настоящем докладе мы расскажем об ином методе усреднения, предложенном Молчановым, Рузмайкиным и Соколовым в 1985 году, для работы с короткокоррелирующим во времени случайным потоком. Этот метод весьма близок к методу функциональных интегралов, используемому в квантовой механике. Он не требует предположения о пространственной двухмасштабности поля скорости и позволяет вывести уравнения динамо для первых и вторых моментов поля в анизотропных и неоднородных условиях. Будут продемонстрированы достоинства и недостатки мультипликативного подхода и возможные области приложения полученных результатов в теории мГД-динамо.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ОТКЛИКА СИСТЕМЫ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ ОБЕЗДВИЖЕННЫХ ДИПОЛЬНЫХ ЧАСТИЦ НА ПЕРЕМЕННОЕ ПОЛЕ ПРОИЗВОЛЬНОЙ АМПЛИТУДЫ

Амбаров А.В.¹, Елфимова Е.А.¹, Зверев В.С.¹

¹Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,
Екатеринбург

alexander.ambarov@urfu.ru, ekaterina.elfimova@urfu.ru, vladimir.zverev@urfu.ru

Внедрение большого количества магнитных наночастиц в жидкую или полимерную матрицу позволяет управлять свойствами композитного материала с помощью внешнего магнитного поля. Такие материалы, так называемые магнитные мягкие вещества, включают феррожидкости, магнитные эластомеры, феррогели и различные биосовместимые магнитные наполнители. Эти сложные системы вызывают значительный интерес у исследователей, медиков и инженеров, поскольку они активно используются в прогрессивных высоких промышленных и биомедицинских технологиях.

В работе численно исследуется динамический отклик системы взаимодействующих феррочастиц, находящихся в линейно-поляризованном переменном магнитном поле. Предполагается, что оси легкого намагничивания феррочастиц расположены параллельно друг другу. Рассмотрены два случая взаимной ориентации осей легкого намагничивания и магнитного поля: (1) параллельное и (2) перпендикулярное расположение. Релаксация магнитных моментов феррочастиц происходит по неелевскому механизму.

Вращательное движение магнитного момента случайной феррочастицы определяется из решения уравнения Фоккера-Планка-Брауна, в которое вводится дополнительное слагаемое, позволяющее учесть межчастичные диполь-дипольные взаимодействия на уровне модифицированной теории среднего поля первого порядка [1]. Полученные решения для плотности вероятности ориентации магнитного момента случайной частицы используются для определения динамической восприимчивости. Численное решение уравнения Фоккера-Планка основано на безусловно устойчивой схеме для задач конвекции-диффузии.

Численно исследованы намагниченность, восприимчивость и время релаксации. Показано, что увеличение амплитуды переменного поля существенно ускоряет релаксационные процессы в рассматриваемой системе, а увеличение магнитной анизотропии частицы и межчастичных диполь-дипольных взаимодействий замедляет их. Численные результаты хорошо согласуются с аналитическими решениями [2], надежными в слабом переменном поле.

Полученные результаты представляют собой важную информацию при проектировании и синтезе новых функциональных материалов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-02-00358.

Литература

- [1] Ivanov A.O., Zverev V.S., Kantorovich S.S., Soft Matter, 12(15), 3507-3513 (2016).
- [2] Ambarov A.V., Zverev V.S., Elfimova E.A., Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 497 (2020) 166010.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕЙСТВИЯ ВЗРЫВА ЗАРЯДА С РАДИАЛЬНЫМ ЗАЗОРОМ

Андрейко С.С., Мальцев В.М., Аникин В.В.

Горный институт, Пермь

ssa@mi-perm.ru, vmml@bk.ru, anikin@mi-perm.ru

При проходке горных выработок в выбросоопасных пластах горных пород для предотвращения внезапных выбросов пород и газа производится торпедирование массива для приведения его в безопасное состояние. При расчёте параметров торпедирования необходимо определять радиус зоны трещинообразования, образующейся при взрыве вокруг одиночной «торпеды» - шпура (скважины). В данной работе основным фактором разрушения принят импульс давления взрывных газов (импульс взрыва), равный произведению давления на длительность его воздействия на объект разрушения [1]. Установлено, что на величину импульса давления влияет радиальный зазор шпурового заряда взрывчатого вещества (ВВ). При оптимальном относительном радиальном зазоре Δ , равном 0,32 радиуса патрона ВВ, импульс взрыва за счёт отражений волн давления от стенок шпура увеличивается на порядок относительно случая полного заряжания при равенстве диаметров шпура и патрона [2]. В данной работе изменения импульса взрыва в шпуре предлагается учитывать с помощью коэффициента зазора $K_z = \lambda \times \Delta^{-m}$. Здесь m зависит от условий взрывания, λ характеризует уменьшение давления в зазоре за счёт расширения объёма газов по закону высоких давлений, а Δ - его увеличение за счёт отражений волн давления газов, образующихся при взрыве заряда ВВ. При использовании импульса в критерий прочности пород должна входить характеристика интенсивности разрушения (дробления) от конкретного динамического воздействия. Такой критерий разработан [3] и опробован на практике при ведении взрывных работ на пластах, опасных по газодинамическим явлениям, в калийных рудниках на Верхнекамском и Старобинском месторождениях калийных солей [4-5]. Однако лабораторное определение этого критерия для крепких пород вызывает определённые трудности. В данной работе предлагается математическая модель динамической прочности для любых пород, включающая в себя их важнейшие физико-механические характеристики и степень спада напряжения в массиве в зависимости от расстояния до центра взрыва. Физически данная модель адекватна критерию [3]. Приводится метод определения степени спада напряжения на основе известной степени некоторой эталонной породы. Радиус зоны трещинообразования определяется расстоянием, при котором взрывной импульс становится равен расчетному показателю динамической прочности породы. Это расстояние определяется методом последовательных приближений. По данной методике рассчитаны радиусы зон трещинообразования для следующих типов горных пород: 17 горных пород со статической прочностью от 30 до 335 МПа в шпурах диаметром 42 мм, длиной заряда 1,6 м, для ВВ типа аммонит 6ЖВ в патронах диаметром 32 мм; четырёх доломитовых пород для ВВ типа аммонит АП-5ЖВ в патронах диаметром 36 мм и длиной заряда 1,2 м, для которых радиусы зон трещинообразования известны из опытных работ. Сходимость расчётных значений с натурными измерениями находилась в пределах 6%.

Литература

- [1] Ханукаев А.Н. Энергия волн напряжений при разрушении горных пород взрывом. – М.: – 1962.–200 с.
- [2] Баум Ф.А., Григорян С.С., Санасарян Н.С. Определение импульса взрыва скважинного заряда. – Взрывное дело.–1964.– №54–11.– С.53–102.
- [3] Мальцев В.М. Нормированный импульс дробления как показатель дробимости горных пород / П.А.Лыхин, В.М.Мальцев // Физические проблемы разрушения массивов горных пород: сб. докл. Международной конференции. – М.: РАН.–1999.–С.174–176.
- [4] Руководство по ведению взрывных работ на калийных рудниках Верхнекамского месторождения. – Пермь: 1984.–195 с.
- [5] Щерба В.Я. Управление газодинамическими процессами на Старобинском месторождении калийных солей/В.Я. Щерба, А.Н. Башура, С.С. Андрейко. – М.: Изд-во МГГУ.–2004.–194 с.

ОБ УСТОЙЧИВОСТИ КРИВОЛИНЕЙНЫХ СТЕРЖНЕЙ, ПОДКРЕПЛЕННЫХ НЕРАСТЯЖИМЫМИ НИТЯМИ

Андрюкова В.Ю., Тарасов В.Н.

Физико-математический институт ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар

veran@list.ru, vntarasov@dm.komisc.ru

Рассматриваются задачи устойчивости круговых арок, подкреплённых нерастяжимыми нитями так, что расстояние между точками прикрепления концов нитей в результате деформации не может увеличиться. В [1] подробно изложены исследования арок различных очертаний. В данной работе исследованы задачи: арка, подкреплённая вертикальными нитями так, что один конец нити прикреплен к оси арки, а другой к хорде окружности арки, соединяющей ее концы (Рис. 1). Во второй задаче рассматривается составная арка, представляющая две дуги окружности, связанных между собой нерастяжимыми нитями, которые не выдерживают сжимающих нагрузок (Рис. 2).

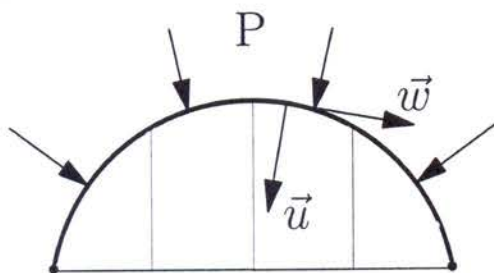


Рис.1.

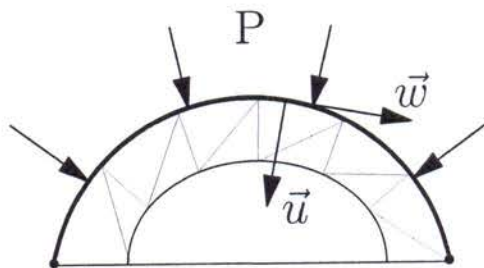


Рис.2.

Другие задачи устойчивости упругих систем при наличии односторонних неудерживающих связей ранее были рассмотрены в [2, 3].

Приведем некоторые результаты вычислений. Для арки, представляющей собой половину дуги окружности, нагруженной нормальной силой при граничных условиях жесткой заделки, безразмерный критический коэффициент P равен (M – число подкрепляющих нитей):

$M=2$	$P=12.30$
$M=3$	$P=18.17$
$M=4$	$P=27.91$

Критическая сила без ограничений на перемещения равна $P = 8.0$.

Литература

- [1] Динник А.Н. Устойчивость арок – М.: Гостехиздат, 1946. – 126 с.
- [2] Андрюкова В.Ю. Некоторые конструктивно-нелинейные задачи устойчивости упругих систем при односторонних ограничениях на перемещения // Выч. мех. сплош. сред. – 2014. – Т.7, № 4. – С. 412-422.
- [3] Тарасов В.Н. Об устойчивости подкреплённых арок // Выч. мех. сплош. сред. – 2019. – Т.12, № 2. – С. 202-214.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ИСПЫТАНИЙ НА СВЕРХМНОГОЦИКЛОВУЮ УСТАЛОСТЬ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ПОСЛОЙНОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕНИЯ

Бабайцев А.В., Никитин А.Д., Рипецкий А.В.

Московский Авиационный Институт, Москва

Ar77eny@gmail.com, nikitin_alex@bk.ru, a.ripetskiy@mail.ru

В настоящей работе проводится исследование влияния направления построения объекта на усталостные характеристики материала в области сверхмногоциклового усталости (СВМУ). Для этого методом послойного лазерного плавления были изготовлены две серии образцов для СВМУ испытаний из алюминиевого сплава (AlSi₁₀Mg). Первая партия образцов синтезировалась в плоскости построения печати, а вторая – перпендикулярно. Все образцы печатались при одинаковых параметрах печати. После печати для снятия возможных остаточных напряжений платформы с образцами подвергались кондиционированию в печи при температуре 270°C в течении 120 мин. и дальнейшем естественном остывании в закрытой камере. После остывания образцы срезались ленточной пилой и фрезеровались. Механическая обработка рабочей области проводилась таким образом, чтобы шероховатость поверхности соответствовала значению не выше Ra 0,4.

Испытания проводились в режиме растяжения-сжатия в лабораторных условиях при комнатной температуре. Поверхности излома всех разрушенных образцов были исследованы с применением методов электронной сканирующей микроскопии. Результаты испытаний на образцах, полученных методом послойного лазерного плавления, сравниваются с результатами СВМУ испытаний аналогичного алюминиевого сплава, произведенного из горячекатаных прутков [5]. Анализ полученных данных показывает значительное снижение усталостных характеристик материала, полученного методом спекания по сравнению с традиционными технологиями. На поверхности излома явным образом наблюдаются морфологические особенности, связанные со слоистой структурой таких образцов.

Работа проводилась при финансовой поддержке государственного проекта Министерства образования и науки РФ "Код проекта FSFF-2020-0017".

Литература

- [1] Orekhov, Alexander A.; Ripetskiy, Andrey V.; Fedoseev Denis V. Surface Roughness Assessment Based On Discrete Model Representation For Additive Manufactured Parts// PERIÓDICO TCHÊ QUÍMICA, vol. 15. special issue - 1 – 2018, ISSN 2179-0302, p 514.
- [2] Andrey Ripetskiy, Sergey Zelenov, Ekaterina Kuznetsova. Current Issues of Developing Methodology and Software Solutions Used in Different Phases of Modelling Additive Production Processes/ // Key Engineering Materials. – 2018. –Vol. 771. – P. 97–102.
- [3] Babaytsev A.V., Prokofiev M.V., Rabinskiy L.N. Mechanical properties and microstructure of stainless steel manufactured by selective laser sintering // International Journal of Nanomechanics Science and Technology. Volume 8, Issue 4, 2017, Pages 359-366. DOI: 10.1615/NanoSciTechnolIntJ.v8.i4.60
- [4] Babaytsev A.V. Orekhov A. Rabinskiy L.N. Properties and microstructure of AlSi₁₀Mg samples obtained by selective laser melting. Nanoscience and Technology: An International Journal, Volume 11, Issue 3 pp. 213-222, DOI: 10.1615/NanoSciTechnolIntJ.2020034207
- [5] Шаняевский А.А., Никитин А.Д., Palin-Luc Т. Сверхмногоцикловая усталость алюминиевого сплава Д16Т, Вестник ПНИПУ, 23 (3), – 2020. сс. 43 - 53.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОНИКАНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ УДАРНИКОВ В СУХОЙ ПЕСОК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАДИОИНТЕРФЕРОМЕТРА МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА

Баландин В.В.¹, Баландин Вл.Вл.¹, Брагов А.М.¹, Пархачёв В.В.²

¹Научно-исследовательский институт механики Национального исследовательского
Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород

²Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И.
Лобачевского, Нижний Новгород

vbalandin99@gmail.com, RustyDog2007@yandex.ru, bragov@mech.unn.ru, vypl111@mail.ru

Экспериментальное изучение ударного взаимодействия деформируемых и твёрдых тел с грунтовыми средами имеет важное научное и прикладное значение. При проведении экспериментальных исследований проникания твердых тел в прямой постановке чаще всего проводят измерения таких параметров процесса, как зависимости перемещения ударника от времени, скорости ударника и его замедления. В данной работе для измерения перемещения и скорости цилиндрических ударников с различными оголовками используется радиоинтерферометр миллиметрового диапазона [1] – устройство, предназначенное для измерения перемещений и скоростей физических объектов, способных отражать радиоволны. Данный интерферометр реализует схему Майкельсона в радиодиапазоне на длине волны 3,2 мм. Для определения перемещения заднего торца ударника в экспериментах также использовалась высокоскоростная киносъемка.

С использованием радиоинтерферометра проведено исследование проникания цилиндрических ударников в сухой песок естественно гранулометрического состава при скоростях удара до 250 м/с. По результатам проведенных экспериментов определены зависимости перемещения и скорости проникания ударников от времени. Сравнение данных по перемещению ударника, полученных с использованием высокоскоростной киносъемки и радионтерферометра, показывает, что результаты совпадают в пределах погрешности измерения высокоскоростной съемки. Данный метод позволяет регистрировать перемещение и скорость ударника, проникающего в грунтовую преграду, на длительном временном интервале, в том числе при полном погружении ударника в материал мишени, когда съемка процесса в оптическом диапазоне невозможна. По зависимостям скорости движения ударников от времени можно идентифицировать все основные этапы движения ударника: свободный полет, начальную нестационарную стадию внедрения, уменьшение скорости по закону Понселе и движение с постоянным ускорением при уменьшении скорости проникания менее 100 м/с. По результатам проведенных экспериментов определены коэффициенты сопротивления на участке внедрения, следующем за нестационарной стадией проникания, и силы сопротивления на участке проникания с постоянным ускорением.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект 0729-2020-0054).

Литература

[1] Баландин В.В., Баландин Вл.Вл., Пархачёв В.В. Измерение перемещения и скорости ударника радиоинтерферометром – Проблемы прочности и пластичности, т.81, вып.1, 2019 - с.118-128

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ В СПЛАВЕ ТИТАНА ВТ-3 ПРИ ГИГАЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ

Банников М.В.¹, Юрина А.Д.²

¹Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

²Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь
mbannikov@icmm.ru

Требования по прочности и долговечности к материалам в областях авиакосмического, железнодорожного машиностроения подразумевают разрушение при высоких нагрузках и длительных испытаниях. При таком режиме работы проявляются особые механизмы зарождения и роста трещин, которые проявляются в объеме материала в процессе накопления микроповреждений [1-3]. Классическое уравнение Пэриса не подходит для оценки долговечности в таких испытаниях [2] и его необходимо модифицировать с оценкой структурных параметров. В работе исследовались процессы формирования усталостных трещин при гигацикловой усталости сплава титана ВТ-3 с применением методики «insitu» определения накопления необратимых усталостных повреждений, основанная на анализе нелинейных проявлений сигнала обратной связи в замкнутой системе ультразвуковой усталостной установки [4-5]. Поверхности разрушения анализировались с помощью оптического микроскопа и профилометра NewView для оценки кинетики накопления повреждений. Установлена величина напряжения, при котором образуется внутренняя трещина в титановом сплаве ВТ-3, исследуемые образцы имеют поверхность разрушения в виде «рыбьего глаза» [2], но отличаются глубиной залегания очага и размером зоны медленного роста усталостной трещины. Определены параметры кинетического уравнения зарождения и роста трещины [6] на основе разработанной методики и анализа морфологии поверхностей разрушения.

Литература

- [1] Ботвина Л.Р. Гигацикловая усталость – новая проблема физики и механики разрушения / Л. Р. Ботвина // Зав. лаб. Диагн. матер. – 2004. – Т. 70, № 4. – С. 41-51.
- [2] Bathias C. Gigacycle Fatigue in Mechanical Practice / C. Bathias, P. C. Paris. – Marcel Dekker Publisher Co. – 2005. – 305 p.
- [3] Betekhtin V.I., Kadomtsev A.G., Narykova M.V., Bannikov M.V., Naimark O.B., Abaimov S.G., Akhatov I.S., Palin-Luc T., Experimental and theoretical study of multiscale damage-failure transition in very high cycle fatigue //Physical Mesomechanics. 2017, V. 20. № 1. P. 78-89.
- [4] Kumar A., Torbet C.J., Pollock T.M., Jones J.W., In situ characterization of fatigue damage evolution in a cast Al alloy via nonlinear ultrasonic measurements // ActaMaterialia, 2010, 58, P. 2143–2154
- [5] Банников М.В., Оборин В.А., Билалов Д.А., Наймарк О.Б. Нелинейная динамика и стадийность поврежденности титановых сплавов Ti6Al4V и Ti45Nb при сверхмногоцикловой усталости // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2020. № 2. С. 145-153. DOI: 10.15593/perm.mech/2020.2.12
- [6] Bannikov M. V., Oborin V. A., Bilalov D. A., Naimark O. B. A kinetic equation for fatigue crack initiation and growth in the very high cycle range based on fractography and nonlinear dynamics // AIP Conference Proceedings 2315, 040005 (2020); <https://doi.org/10.1063/5.0036885> Published Online: 17 December 2020

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФРАГМЕНТАЦИИ КВАРЦЕВЫХ ЦИЛИНДРОВ В УСЛОВИЯХ КВАЗИСТАТИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ С РЕГИСТРАЦИЕЙ ФРАКТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ

Банникова И.А., Уваров С.В.

ИМСС УрО РАН, Пермь
malgacheva@icmm.ru, usv@icmm.ru

Проведены квазистатические испытания на одноосное сжатие и анализ фрагментации цилиндров из плавленого кварца. Образцы имели высоту 13.78 мм и диаметр от 11.89 до 12.17 мм. Испытания выполнялись на электромеханической универсальной испытательной машине Shimadzu AGX-Plus со скоростью 2 мм/с. Регистрация разрушения производилась высокоскоростной камерой Photron FASTCAM SA-Z 2100K на частоте 6×10^4 кадр/с. В большинстве экспериментов было зафиксировано два этапа разрушения. На первом этапе происходило распространение вертикальных трещин по всему объему. При этом интенсивность фрактолюминесценции была относительно низкой. На втором этапе происходило полное разрушение образца с интенсивным разлётом фрагментов. Второй этап разрушения сопровождался также интенсивной фрактолюминесценцией. Собранные фрагменты можно было разделить по форме на три типа: крупные удлиненные объекты – I тип формы, тонкие пластинки – II тип формы и трехмерные объемные фигуры, напоминающие октаэдр – III тип формы. Фрагменты разрушенного образца просеивались через систему лабораторных сит и взвешивались методом [1, 2]. Для всех образцов кумулятивные распределения фрагментов по массе имели слабый перегиб и хорошо описывались степенными функциями с высокой достоверностью аппроксимации ~ 0.97 . На примере анализа фрагментов на двух ситах (с характерными размерами фрагментов $0.63 \text{ мм} < d < 1.6 \text{ мм}$) предполагаем, что фрагменты первого типа образовались на первом этапе разрушения при фрагментации образца вертикальными трещинами. Фрагменты второго и третьего типов образовались в процессе финального разрушения образца. При этом очагами разрушения являлись дочерние микротрещины на поверхности фрагментов первого типа [3].

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № АААА-А19-119013090021-5).

Литература

- [1] Davydova M., Uvarov S. Fractal statistics of brittle fragmentation // Fracture and Structural Integrity. – 2013. – Vol. 24. – P. 60-68.
- [2] Bannikova I.A., Naimark O.B., Uvarov S.V. Transition from multi-center fracture to fragmentation statistics under intensive loading // Procedia Structural Integrity. – 2016. – Vol. 2. – P. 1944-1950.
- [3] Naimark O.B., Uvarov S.V., Davydova M.M., Bannikova I.A. Multiscale statistical laws of dynamic fragmentation // Physical Mesomechanics. – 2017. – Vol. 20, No.1. – P. 90-101.

ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ ПРОРЫВА ПРЕСНЫХ ВОД В ГОРНЫЕ ВЫРАБОТКИ КАЛИЙНЫХ РУДНИКОВ

Барях А.А., Самоделкина Н.А., Коносовский П.К.

Горный институт УрО РАН, Пермь

bar@mi-perm.ru

Особенность разработки месторождений калийных солей связана с необходимостью защиты рудников от прорыва пресных вод в горные выработки. Несмотря на применяемые меры охраны, достаточно многочисленными в мировой горной практике являются случаи аварийного затопления рудников, зачастую приводящих к их гибели.

Современные средства мониторинга, методы расчетов позволяют выявлять участки потенциально опасные по нарушению сплошности водозащитной толщи. Впервые предложен и находится в стадии проектирования способ предотвращения прорыва пресных вод в горные выработки. Его суть заключается в следующем. Потенциально опасный участок изолируется путем возведения специальных перемычек, перекрывающих капитальные горные выработки, и его выработанное пространство заполняется относительно насыщенными рассолами. Поскольку плотность пресных вод ниже плотности рассолов, то даже в случае нарушения сплошности водозащитной толщи пресные воды не будут поступать в отработанное пространство рудника и, соответственно, не приведут к массовому растворению соляных пород. Вместе с тем, закачиваемые в выработанное пространство рассолы не являются полностью насыщенными по NaCl и KCl. Они будут донасыщаться уже в процессе затопления горных выработок. В этой связи уже на стадии проектных работ должны быть получены оценки степени растворения целиков и сохранения устойчивости водозащитной толщи в процессе мокрой ликвидации потенциально-опасного участка.

Оценка деградации целиков вследствие растворения производилось на основе фильтрационно-миграционная моделирования в программном пакете PM8 (Processing Modflow). Рассматривалась трехслойная модель – по количеству пластов, включенных в разработку. Процесс движения рассолов в выработанном пространстве моделировался посредством задания высоких значений проницаемости среды. Плотностной эффект, связанный с насыщением рассолов имитировался снижением коэффициентов фильтрации в затопленных на текущий момент зонах участка. Численный расчет деградации междокамерных целиков производился, исходя из расчетного значения текущей концентрации в каждом модельном блоке. Суммарная деградация междокамерных целиков рассчитывалась нарастающим итогом вплоть до полного насыщения рассолов и использовалась в качестве исходной информации при геомеханическом моделировании.

Геомеханическая модель отражала весь комплекс горно-геологических и горнотехнических условий отработки, а также группу факторов, связанных с растворением соляных пород. Численная реализация математического моделирования напряженно-деформированного состояния подработанного массива в трехмерной постановке основывалась на модифицированном полуаналитическом методе конечных элементов. Параметрическое обеспечение реологического анализа базировалось на данных маркшейдерских наблюдений за сдвигами земной поверхности. На каждом временном шаге анализ напряженно-деформированного состояния подработанного массива проводился в упругопластической постановке. В качестве условия прочности (пластичности) для трехмерного напряженного состояния принимался критерий, учитывающий совместное действие двух видов разрушения: сдвига за счет касательных напряжений и отрыва под действием нормальных напряжений.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА ПРЯМОГО УДАРА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ДИАГРАММ ДЕФОРМИРОВАНИЯ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ БОЛЬШИХ ДЕФОРМАЦИЯХ.

Басалин А.В.¹, Константинов А.Ю.¹

*Научно-исследовательский институт механики Национального Исследовательского
Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского
(Нижний Новгород, Россия)*

a-basalin@mail.ru, constantinov.al@yandex.ru

Для оснащения математических моделей деформирования упругопластических материалов необходимыми параметрами и константами необходима обширная экспериментальная информация, требования к которой зависят от решаемой задачи. Для оценки прочности динамически нагруженных конструкций значимыми является учет влияния скорости деформации на радиус поверхности текучести. Экспериментальные схемы для исследования подобного влияния могут быть построены на базе техники мерных стержней. Одним из таких методов является хорошо известный метод Кольского [1]. У данной экспериментальной схемы есть методические ограничения, которые, приводят к необходимости разработки альтернативных вариантов для расширения диапазона исследования по реализуемым скоростям деформации.

В данной работе приводятся описание и результаты анализа экспериментального метода, реализующего так называемую схему прямого удара, построенную на базе техники мерных стержней. Метод используется для определения диаграмм деформирования упругопластических конструкционных материалов в условиях высокоскоростного сжатия при более высоких, чем в традиционном методе Кольского, скоростях деформаций. Особое внимание уделено варианту метода, в котором применяется ударник того же диаметра, что и мерный стержень, поскольку в данном случае появляется возможность использования оборудования стандартной схемы испытаний по методу Кольского (в частности нагружающие устройства) и, таким образом, на единой аппаратной платформе строится система базовых испытаний материалов в широком диапазоне скоростей деформаций. Был выполнен численный анализ указанной схемы. Показано, что деформация в образце определяется точно только на временном интервале, соответствующем двойному пробегу упругой волны по ударнику. Предложена модификация алгоритма обработки экспериментальной информации, которая позволяет учитывать интерференцию упругих волн в ударнике и позволяет расширить диапазон деформаций, для которого данный эксперимент дает достоверную информацию о кривой деформирования материала. С использованием данной методики были получены кривые деформирования стали 20 и А500С при ударном сжатии

Численный анализ выполнен при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №20-38-70091.

Экспериментальная часть выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 19-38-90217)

Литература:

1. Kolsky H. (1949), An investigation of the mechanical properties of materials at very high rates of loading // Proc. Phys. Soc. London, Sect. B 62, 676–700.

ИЗМЕРЕНИЕ РАЗМЕРОВ КАПЕЛЬ РАСПЫЛЕННОЙ ЖИДКОСТИ ПО ЯРКОСТИ ОТРАЖЕННОГО СВЕТА

Баталов В.Г.¹, Степанов Р.А.¹, Васильев А.Ю.¹

¹Институт Механики Сплошных Сред УрО РАН, Пермь

vbatalov@icmm.ru, rodion@icmm.ru, vasiliev.a@icmm.ru

В работе представлены результаты лабораторных и численных экспериментов по измерению размеров капель прозрачной жидкости (воды), распыленной в воздухе. Данные лабораторных экспериментов получены, в основном, с использованием оптического метода Glare Point Technique (GPT) [1], в котором исследуемая область распыленной жидкости освещается вспышкой света от лазера. Образы капель фиксировались цифровой видеокамерой с получением информации об интенсивности (яркости) рассеянного каплями света [2]. Интенсивность рассеянного (отраженного и преломленного) каплями света пропорциональна площади поверхности капель. Если размеры капель порядка 10 – 100 микрон, то в воздухе они очень быстро превращаются в сферические объекты. Тогда возникает однозначная геометрическая связь между площадью поверхности и диаметром капли [3]. Соответственно, интенсивность рассеянного сферической каплей света пропорциональна квадрату диаметра капли. Параметры оптической схемы и иные факторы входят в это соотношение, как старший (постоянный) коэффициент параболической функции. В связи с этим по интенсивности рассеянного каплями света можно восстановить размер (диаметр) капель. Теоретическая возможность такого подхода была проанализирована с использованием расчетов методом Монте-Карло. В численном эксперименте моделировался ансамбль капель с некоторым случайным распределением по размерам, попадающих в луч света с гауссовским распределением интенсивности в направлении поперечном распространению света, подобно тому, как это было в лабораторном эксперименте. Далее для каждой капли в зависимости от ее диаметра и положения относительно освещенной области рассчитывалась интенсивность отраженного света. Полученные распределения капель яркости были сопоставлены и исходными распределениями по размерам. Показано, что квадратичная зависимость яркости от размера капли справедлива только для самых ярких капель. Аналогичные результаты были получены и в лабораторном эксперименте. По результатам лабораторного эксперимента были построены зависимости средней интенсивности света, рассеянного каплями некоторой выбранной области распыла, от среднего размера капель этой области. Показано, что в некоторых случаях по средней интенсивности рассеянного света можно судить о среднем размере капель. Результаты работы могут быть использованы для экспресс-оценки качества распыла, различных распыливающих устройств, например, топливных форсунок, в том числе для случая распыления непрозрачных жидкостей.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-08-00574

Литература

- [1] Van de Hulst H. and Wang R., Applied optics, 1991, vol. 30, pp. 4755–4763.
- [2] Баталов В.Г., Степанов Р.А., Сухановский А.Н. Оптические измерения размеров капель в реальных потоках-Пермь, Вестник Пермского университета. Физика. 2017. № 3 (37). 40–47с.
- [3] Бильский А.В., Ложкин Ю.А., Маркович Д.М. Интерферометрический метод измерения диаметров капель – Теплофизика и аэромеханика, 2011, т.18, №1 – 1-13 с.

ВЕРИФИКАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТВЕРДОГО ТЕЛА С ДЕФЕКТАМИ ПО ДАННЫМ ДИНАМИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Баяндин Ю.В., Ледон Д.Р., Уваров С.В., Наймарк О.Б.

ИМСС УрО РАН, Пермь

buv@icmm.ru, ledon@icmm.ru, usv@icmm.ru, naimark@icmm.ru.

В работе представлена разработанная ранее математическая модель поведения твердых тел при квазистатических, циклических и динамических нагрузках с учетом развития поврежденности и накопления дефектов (микросдвигов, микротрещин). Модель основана на статистической теории среды с мезоскопическими дефектами и развитых на ее основе определяющих соотношениях твердого тела с дефектами. Предложенные определяющие соотношения позволяют описывать деформационное поведение типичных упруговязкопластических материалов (металлов и сплавов) в широком диапазоне скоростей деформаций, температур и напряжений. Идентификация неизвестных параметров разработанной математической модели основана на решении ряда задач минимизации невязки между расчетными и экспериментальными данными, в том числе с привлечением данных независимых экспериментов по квазистатическому и динамическому нагружению стандартных образцов. Верификация разработанной модели проводилась по данным ранее выполненных натурных экспериментов, включающих ударноволновое нагружение плоских образцов, пробивание преграды цилиндрическим ударником, динамические тесты для цилиндрических образцов (модифицированные тесты Гопкинсона-Кольского и Тейлора).

Проведены эксперименты по высокоскоростному соударению с преградой цилиндрического образца из алюминиево-магниевого сплава АМг6 в форме стержня (тест Тейлора–Гопкинсона) с регистрацией поля температуры в процессе деформирования. Полученные экспериментальные данные использовались для верификации разработанной математической модели [1]. Краевая задача о соударении цилиндрического образца из АМг6 со стальным стержнем решалась численно методом конечных элементов как в осесимметричной постановке, так и в трехмерной постановке. Получено достаточно хорошее соответствие результатов численного моделирования с экспериментом, погрешность для радиальных перемещений образца составила 7%, для температуры – 11%. Это свидетельствует об адекватности разработанной математической модели и возможности ее использования для решения задач механики деформируемого твердого тела. Разработанные широкодиапазонные определяющие соотношения учитывают накопление дефектов и диссипацию энергии за счет неупругих деформаций. Разработанная математическая модель поведения деформируемого твердого тела при квазистатических и динамических нагружениях верифицирована, а разработанные определяющие соотношения позволяют описывать деформирование материалов в широком диапазоне скоростей нагружения с учетом накопления повреждений и диссипации энергии.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № АААА-А19-119013090021-5).

Литература

[1] Баяндин Ю.В., Билалов Д.А., Уваров С.В. Верификация широкодиапазонных определяющих соотношений для упруговязкопластических материалов с использованием теста Тейлора–Гопкинсона // Вычислительная механика сплошных сред. – 2020. – Т. 13, № 4. – С. 449-458. <https://doi.org/10.7242/1999-6691/2020.13.4.35>

АТОМИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТРЕЩИНЫ В ПЛАСТИНЕ

Белова О.Н.¹, Степанова Л.В.¹

¹Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева,
Самара

BelovaONik@yandex.ru, StepanovaLv2015@yandex.ru

С помощью метода молекулярной динамики моделируется процесс распространения центральной трещины в медной пластине, находящейся под действием смешанного нагружения. В работе проведено исследование влияния размеров модели и длины трещины, температуры, скорости деформирования и параметра смешанности нагружения на распространение трещины в пластине. Проведен анализ изменений в системе перед разрушением. Для описания межатомного взаимодействия в меди используется модель многочастичного потенциала погруженного атома (EAM - Embedded Atom Model). В начальный момент времени ячейка моделирования имеет гранецентрированную кубическую структуру FCC (face centred cubic).

Моделирование реализовано при помощи программного пакета LAMMPS (Large-scale Atomic/Molecular Massively Parallel Simulator), расчеты проведены на суперкомпьютере Самарского университета «Сергей Королев».

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 20-31-90082).

Литература

- [1] Stepanova L.V., Bronnikov S.A., Belova O.N. Estimation of crack propagation direction angle under mixed-mode loading (mode I and mode II): generalized fracture mechanics criteria and atomistic modeling (molecular dynamics method) // PNRPU Mechanics Bulletin. 2017. – № 4. – P. 189–213.
- [2] Stepanova L.V., Belova O.N. Estimation of crack propagation direction angle under mixed mode loading in linear elastic isotropic materials by generalized fracture mechanics criteria and by molecular dynamics method // Journal of Physics: Conference Series. 2018. – Vol. 1096 (1). – P. 012060.
- [3] Stepanova L.V., Bronnikov S.A. A computational study of the mixed-mode crack behavior by molecular dynamics method and the multi-Parameter crack field description of classical fracture mechanics // Theoretical and Applied Fracture Mechanics. 2020. – Vol. 109. – P. 102691.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭФФЕКТА КАЙЗЕРА ДЛЯ ОЦЕНКИ НАПРЯЖЕНИЙ В ПОРОДНОМ МАССИВЕ СКВАЖИННЫМ ГИДРОДОМКРАТОМ

Бельтюков Н.Л.

Горный институт УрО РАН, г. Пермь

bnl@mi-perm.ru

В экспериментальной геомеханике при измерениях напряжений в породных массивах все чаще применяются методы, основанные на эффекте Кайзера. Предлагаемый подход [1] использования эффекта заключается в разгрузке некоторой области массива посредством бурения скважины и повторном нагружении ее стенок скважинным гидродомкратом. За величину компоненты поля напряжений, действующую в направлении нагружения, принимают значение давления в гидросистеме, при котором наблюдается прежде всего значительное увеличение параметра активности акустической эмиссии (АЭ) – количества импульсов в единицу времени. С целью обоснования данного способа измерения напряжений проведены исследования по моделированию напряженного состояния, испытываемого породами нагружаемого околоскважинного пространства.

Математическое моделирование напряжений при нагружении стенок горизонтальной скважины гидродомкратом в направлении главной компоненты σ_1 или σ_3 естественного поля выполнено для условий нетронутого соляного массива Верхнекамского месторождения калийных солей. В результате численного расчета установлено, что восстановление радиальной компоненты σ_r в областях сжатия околоскважинного пространства происходит, когда давление гидродомкрата достигает первоначальных значений σ_1 или σ_3 в зависимости от направления нагружения. При этом концентрация тангенциальной компоненты σ_θ на контуре скважины сохраняется.

Исследование особенностей проявления эффекта Кайзера в данных условиях производилось посредством камеры трехосного сжатия, в которой соляные образцы циклически нагружались в режимах подобных напряженному состоянию пород околоскважинного пространства. Обнаружено, что в тестовом цикле нагружения восстановление первоначальных значений вертикальной компонентой $\sigma_{верт}$ поля напряжений образца, разгруженной после установочного цикла, приводит к увеличению активности АЭ. Данная закономерность справедлива для случая, когда между циклами не производилось повышения бокового давления $\sigma_{бок}$ на образец. В режиме с возрастанием бокового давления $\sigma_{бок}$ между установочным и тестовым циклами эффект Кайзера установлен при более высоких значениях компоненты $\sigma_{верт}$, чем первоначальные. Также показано, что природа эффекта зависит от вида исходного напряженного состояния образца и обусловлена возобновлением роста продольных трещин или закрытием поперечных трещин в зависимости от соотношения $\sigma_{верт}$ и $\sigma_{бок}$ в установочном цикле.

Таким образом, в результате проведенных численных расчетов и лабораторных экспериментов подтверждено, что увеличение активности АЭ, наблюдаемое при нагружении пород околоскважинного пространства гидродомкратом [1] и рассматриваемое как эффект Кайзера, может быть использовано для определения напряжений в породном массиве.

Литература

[1] Асанов В.А., Евсеев А.В., Токсаров В.Н., Бельтюков Н.Л. Опыт изучения акустоэмиссионных эффектов в соляных породах с использованием скважинного гидродомкрата Гудмана // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2010. – №10. – С. 144-148.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРЕВА ПОЛИМЕРНОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ НЕРАВНОВЕСНОЙ ТЕРМОДИНАМИКИ С РЕЛАКСИРУЮЩИМИ ПОТОКАМИ ТЕПЛА

Беляев А.Ю.¹, Комар Л.А.¹, Свистков А.Л.¹

¹ *«Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук» – филиал Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук («ИМСС УрО РАН»), Пермь
belyaev@icmm.ru, komar@icmm.ru, svistkov@icmm.ru*

Феномен возникновения волнообразной поверхности на границе полиуретанового образца при ионно-плазменной обработке не может быть объяснен с точки зрения классической термоупругости [1]. Энергии ионов недостаточно для существенного разогрева материала. Однако, если учесть тот факт, что явление имеет место на очень малых размерах (толщина слоя измеряется десятками нанометров) и временах (продолжительность импульса 20 мкс), уравнение теплопроводности может иметь другой вид, отличный от того, который используется при моделировании тепловых явлений на макроскопическом уровне.

В основу модели неравновесной термодинамики легла гипотеза о том, что в эластомерном материале существует характерное время релаксации теплового потока. Это может быть следствием деформирования полимерных клубков. Тепловые потоки могут повлиять на поля напряжений в материале и могут вызывать деформации эластомера. Это явление на наноуровне среды продолжительностью в десятки наносекунд отличается от термоупругих явлений, которые можно наблюдать на макроскопическом уровне материала. Использование расширенной неравновесной термодинамики требуется при анализе процессов, проходящих за очень малые интервалы времени на наноуровне материала. Более детальное изложение этих особенностей имеется в обзорной статье [2].

В данной работе приведены приложения к описанной модели. Проведены численные эксперименты, описывающие возникновение у границы материала тепловой волны во время ионно-плазменной обработки полиуретана. Показано ее последующее движение от границы внутрь материала. Найдены значения градиента напряжений в материале. Исследовано как параметры (величина и характерное время релаксации теплового потока) влияют на характер зарождения и распространения тепловой волны и, что более важно, на значения градиента напряжений в материале.

Информация о напряжениях в материале была использована в расчетах с применением метода конечных элементов. Результаты расчета демонстрируют изменение поверхности материала под действием напряжений, возникающих в нем.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, тема № АААА-А20-120022590044-7.

Литература

- [1] Belyaev A.Yu., A.L. Svistkov Mechanisms Influencing the Formation of the Carbonized Layer Relief on the Polymer Surface after the Ion-Plasma Treatment Modeling// Materials Science Forum, 2018, V. 938, pp. 148-155
doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.938.148
- [2] Lebon G. Heat conduction at micro and nanoscales: A review through the prism of Extended Irreversible Thermodynamics// Journal of Non-Equilibrium Thermodynamics, 2014, 39(1). doi:10.1515/jnetdy-2013-0029.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ НАСОСА С УЧЕТОМ КИНЕМАТИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ШЕСТЕРНЕЙ

Билалов Р.А.¹, Сметанников О.Ю.¹

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
bilalov.1991@yandex.ru, sou2009@mail.ru

Разработанная численная модель шестеренного насоса с внешним зацеплением[1], учитывающая образование и развитие кавитационного течения, не учитывала кинематику шестерней. Каждой шестерне задавалась постоянная угловая скорость (в зависимости от исследуемого режима), а роль ведущей шестерни в образовании «запертого объема» жидкости поочередно выполняла то одна, то другая шестерня.

В данном исследовании упомянутая численная модель уточнена в части кинематического взаимодействия (зацепления) ведущей и ведомой шестерней. Проведено сравнение результатов моделирования с учетом и без учета взаимодействия шестерней, оценивались основные параметры: зависимость массового расхода топлива от угловой скорости шестерней; объем и концентрация кавитации на различных режимах работы насоса.

Уточненная численная модель качественно соответствует результатам, полученным другими авторами [2-4]. Наблюдается, что когда шестерни находятся в контакте, кавитация, возникающая в зоне всасывания, увеличивается из-за изоляции зоны низкого давления от зоны высокого давления. В результате в выходном потоке присутствует больше колебаний, а также наблюдается небольшое увеличение среднего расхода по сравнению со случаем без контакта. Когда контакт между шестернями происходит более чем в одном месте, между шестернями попадает объем жидкости, и он сжимается – образуется «запертый объем» жидкости. Давление в этом запертом объеме возрастает на порядок относительно давления на входе.

Построенная численная модель выполнена в программном комплексе ANSYS CFX. Модель разработана для проведения серии численных экспериментов, с целью дальнейшей оптимизации конструкции: снижения пагубного влияния кавитации на поверхности рабочих поверхностей шестеренных насосов для увеличения эксплуатационного ресурса топливной системы современных газотурбинных двигателей.

Литература

- [1] Билалов Р.А., Сметанников О.Ю. Численное исследование гидродинамики шестеренного насоса с внешним зацеплением // Вычислительная механика сплошных сред. – 2020. – Т. 13, № 4. – С. 471-480.
- [2] Mithun M.-G., Koukouvinis P., Karathanassis I.K., Gavaises M. Numerical simulation of three-phase flow in an external gear pump using immersed boundary approach. Appl. Math. Model., 2019, vol. 72, pp. 682-699.
- [3] Zhao X., Vacca A. Theoretical Investigation into the Ripple Source of External Gear Pumps. J Energies., 2019, vol. 12(3), pp. 535.
- [4] Castilla R., Gamez-Montero P.J., del Campo D., Raush G., Garcia-Vilchez M., Codina E. Three-dimensional numerical simulation of an external gear pump with decompression slot and meshing contact point. J. Fluids Eng., 2015, vol. 137, 041105

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ НЕЛИНЕЙНО НАМАГНИЧИВАЮЩИХСЯ ЧАСТИЦ, ЗАКЛЮЧЁННЫХ В ЭЛАСТОМЕР

Биллер А.М., Столбов О.В., Райхер Ю.Л.

Институт механики сплошных сред, Пермь

kam@icmm.ru

Композиционные материалы, называемые магнитоактивными эластомерами, в последнее время привлекают значительный научный интерес. В его основе лежит возможность бесконтактно управлять элементами, изготовленными из такого композита. Магнитоактивный эластомер (МАЭ) представляет собой полимерную матрицу с внедрёнными в неё магнитными частицами. В магнитном поле между частицами возникают нецентральные силы взаимодействия, перераспределяющие их в стремлении собрать кластеры различных конфигураций. В результате на макроскопическом уровне образец МАЭ демонстрирует удивительные свойства: изменяет свою форму и механические характеристики в ответ на приложенное магнитное поле. Вопрос корректного определения сил магнитного взаимодействия между частицами является одним из важнейших при моделировании поведения МАЭ.

В предыдущих наших работах [1, 2] мы концентрировались на взаимодействии типа притяжение-отталкивание между частицами. Настоящая работа посвящена взаимодействию пары магнитных частиц с учётом вращательного момента, возникающего при приложении внешнего поля под углом к оси, соединяющей центры частиц. Две частицы находящиеся на малом расстоянии не всегда имеют достаточно свободы для движения навстречу друг другу, в этом случае уже не настолько важно насколько сильно они притягиваются. В случае же моментов, пара частиц, как правило, имеет большую свободу, поэтому ошибка в вычислении величины момента может существенно исказить картину структурной перестройки внутри МАЭ.

Энергия, а затем и силы магнитного взаимодействия пары частиц определялись из численного решения полной задачи магнитостатики с учетом неоднородности и нелинейности их намагничивания. Полученные результаты использовались в расчёте деформации образца эластомера двумя твёрдыми сферическими частицами.

Литература

- [1] Biller A. M., Stolbov O. V., Raikher Y. L. Modeling of particle interactions in magnetorheological elastomers // Journal of Applied Physics. — 2014. — Vol. 116. — P. 114904.
- [2] Биллер А. М., Столбов О. В., Райхер Ю. Л. Бистабильное магнитомеханическое поведение ферромагнитных частиц в эластомерной матрице // Вычислительная механика сплошных сред. — 2015. — Т. 8. — С. 273—288.

ГЕНЕРАЦИЯ РЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ МАГНИТОАКТИВНОГО ЭЛАСТОМЕРА

Боброва Е. П.¹, Столбов О. В.²

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь

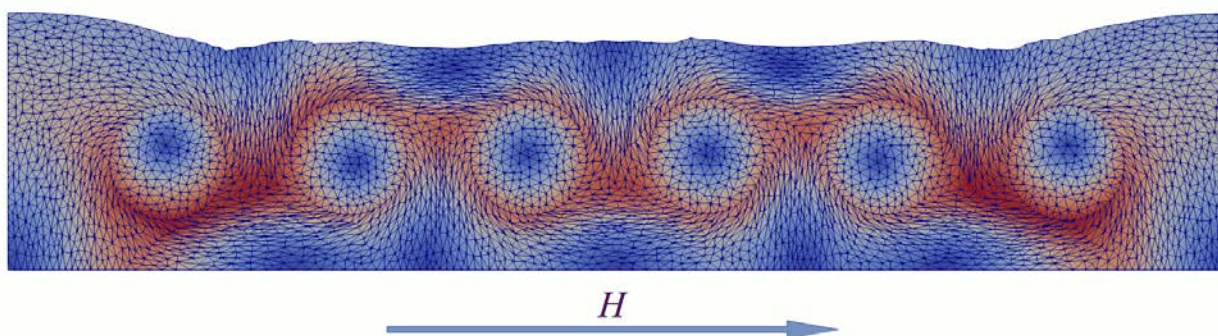
²Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

l.bobrova09@gmail.com, sov@icmm.ru

В работе исследован рельеф поверхности магнитоактивного эластомера (МАЭ), состоящего из мягкой полимерной матрицы и магнитожесткого наполнителя. Под действием магнитного поля МАЭ способны менять свою форму за счет того, что частицы наполнителя, связанные с полимерной сеткой, могут смещаться и вращаться, а матрица будет следовать за ними [1]. Как следствие, наблюдаются различные физико-механические эффекты, что делает МАЭ перспективными для практического применения во многих областях, например, при производстве демпферов, датчиков, виброгасителей [1, 2]. Также особенностью МАЭ является контролируемый рельеф поверхности при агрегации частиц наполнителя в цепочечные структуры вдоль силовых линий магнитного поля, либо за счет вращения частиц. За счет этого свойства МАЭ могут быть использованы в качестве покрытия поверхностей с регулируемой смачиваемостью [2].

Общая энергия системы состоит из энергии упругой матрицы, записанной в рамках континуальной теории конечных деформаций, и энергии взаимодействия магнитных частиц с полем. Для нахождения равновесного состояния системы решается вариационное уравнение с помощью МКЭ в среде FEniCS. Граничные условия на перемещение – скольжение вдоль левой, правой и нижней границ образца, верхняя граница является свободной. В результате решения краевой задачи получен рельеф для различных распределений магнитных моментов и положения частиц в полимерной матрице.

На рисунке продемонстрирована форма поверхности МАЭ для случая, когда частицы расположены цепочкой вдоль направления поля. Цветом показан модуль вектора перемещений при равномерном распределении частиц без смещения по оси. Магнитные моменты частиц распределены периодически вверх-вниз. При генерации четного количества частиц наполнителя рельеф поверхности для данной конфигурации является симметричным относительно центра матрицы.



Литература

- [1] Shamonin M., Kramarenko E. Yu. Highly Responsive Magnetoactive Elastomers. // Novel Magnetic Nanostructures. - 2018. – p. 221 – 245.
- [2] Nadzhatyan T. A., Stolbov O. V., Raikher Yu. L., Kramarenko E. Yu. Field-induced surface deformation of magnetoactive elastomers with anisotropic fillers: a single-particle model. // Soft Matter. – 2019. – p. 9507 – 9519.

МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОСЛОЙНОГО ТЕЧЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ В КАБЕЛЬНОЙ ГОЛОВКЕ СЕКТОРНОЙ ФОРМЫ С УЧЕТОМ ВЯЗКОУПРУГИХ СВОЙСТВ

Бондаренко А.В.¹, Казаков А.В.¹, Труфанова Н.М.¹

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
a.bondarenko1991@mail.ru

На сегодняшний день соэкструзия является наиболее перспективным методом производства кабелей с многослойной изоляцией. Точное соблюдение рациональных режимов работы экструзионного процесса позволяет добиваться высокого качества готовых изделий. Следует отметить, что формирование многослойного изоляционного покрытия секторной формы зависит от ряда факторов, среди которых: форма сектора, геометрия и длина формирующего инструмента, технологические параметры и вязкоупругие свойства материалов. Зачастую влияние вязкоупругости выражается в получении неоднородных толщин изоляционных слоев. В исследованиях зарубежных и отечественных ученых основное внимание уделяется проблемам инкапсуляции [1], формированию свободной поверхности [2] и исследованию стратифицированного течения материалов в процессе экструзии [3]. Однако, несмотря на многочисленные исследования, оценка влияния вязкоупругих свойств на толщины полимерных покрытий остается достаточно актуальной задачей.

Были проведены исследования, посвященные изучению фрагмента выходной части кабельной головки для наложения трехслойного покрытия на жилу секторной формы. Математическое описание процесса тепломассопереноса полимерных жидкостей основывается на законах сохранения с использованием для описания вязкоупругих свойств модели Максвелла с верхней конвективной производной. Расчеты были выполнены с помощью программного пакета ANSYS POLYFLOW.

В результате решения были получены поля скоростей, давлений и компонент тензора напряжений. Проведена оценка сходимости выбранного численного метода реализации математической модели. Определены толщины изоляционного слоя для разных сечений секторной области. На основе полученных экспериментальных данных проведен сравнительный анализ численного исследования процессов формирования толщин полимерного покрытия на участках закругления сектора. Показано сравнение толщин полимерных покрытий, полученных в ходе натурных экспериментов и численного моделирования процесса. Проведенный анализ позволил сделать вывод о том, что разработанная математическая модель течения полимерных материалов адекватно описывает процесс формирования толщин экструдата. Полученные результаты могут быть использованы для определения рациональных режимов переработки и обеспечения рациональных настроек экструзионного оборудования в производственном процессе.

Литература

- [1] Gupta M. Viscoelastic simulation of bi-layer coextrusion in square die: an analysis of viscous encapsulation // Society of plastics engineers annual technical papers, 2013. – Vol. 59. – P. 1227-1231.
- [2] Снегирев Б.А., Алиев К.М., Тазюков Ф.Х. О форме выходящей струи при выдавливании вязкоупругой жидкости из плоского щелевого канала // Вестник Сам-Гу – Естественнонаучная серия. - 2009. - № 6 (72). – С. 130-138.
- [3] Bondarenko A.V., Kozitsyna M.V., Trufanova N.M. The effect of temperature on the boundary of polymer melts in the modeling of two-layer flow // International Conference on the Methods of Aerophysical Research. June 27 – July 3, 2016 / Proceeding / Perm: PNRPU – 2016. – P. 1-6.

АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ КОМПОЗИТНОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ, СОДЕРЖАЩЕЙ ВРАЩАЮЩУЮСЯ ЖИДКОСТЬ

Бочкарёв С.А., Лекомцев С.В.

Институт механики сплошных сред, Пермь
bochkarev@icmm.ru, lekomtsev@icmm.ru

Известно [1], что вращение жидкости, расположенной внутри или снаружи тонкостенной деформируемой цилиндрической оболочки, приводит к потере устойчивости флаттерного типа. Она проявляется в виде слияния волн, распространяющихся в прямом и обратном направлениях, вне зависимости от вида граничных условий, задаваемых на краях конструкции. В качестве одного из инструментов, способствующего повышению порога устойчивости, является использование современных композиционных материалов. В ряде публикаций [2–3] представлены исследования влияния физико-механических параметров оболочек, выполненных из функционально-градиентных или пьезоэлектрических материалов, на критические скорости вращения жидкости. Анализ воздействия композиционного материала, составленного из различного количества слоёв, намотанных под разными углами α , на границу гидроупругой устойчивости остаётся не изученным и является целью настоящей работы.

Поведение вращающейся идеальной сжимаемой жидкости описывается в рамках потенциальной теории. Соответствующие уравнения совместно с условиями на смоченной поверхности преобразуются с помощью метода Бубнова – Галёркина. Упругое тело рассматривается на основе классической теории оболочек. Математическая постановка задачи динамики тонкостенной конструкции основывается на вариационном принципе возможных перемещений. Для численной реализации используется полуаналитический вариант метода конечных элементов, основанный на представлении решения в виде ряда Фурье по окружной координате, в котором удерживаемые компоненты обеспечивают требуемую перевязку симметричных неизвестных оболочки с асимметричными переменными жидкости и наоборот.

Представлены результаты исследований собственных частот колебаний и границ устойчивости композитных цилиндрических оболочек с различными граничными условиями, изготовленных из двух $[\alpha, -\alpha]$ и трёх $[\alpha, 0^\circ, -\alpha]$ слоёв бор-эпоксидной смолы. Продемонстрировано, что для рассматриваемой конструкции при неизменных геометрических размерах подбором схемы армирования и укладки слоистого композиционного материала можно добиться существенного стабилизирующего воздействия.

Работа выполнена в рамках государственного задания; номер гос. регистрации темы АААА-А19-119021490136-7.

Литература

- [1] Бочкарёв С.А. Устойчивость цилиндрической оболочки с вращающейся в ней жидкостью // Вестник СамГУ — Естественнонаучная серия. – 2010. – №6(80). – С. 106-115.
- [2] Ning W.-B., Zhang J.-G., Chen W.-D. Dynamics and stability of a functionally graded cylindrical thin shell containing swirling annular fluid flow including initial axial loads // Acta Mech. – 2016. – Vol. 227 – P. 2157-2170.
- [3] Ghorbanpour Arani A., Karimi M.S., Bidgoli M.R. Nonlinear vibration and instability of rotating piezoelectric nanocomposite sandwich cylindrical shells containing axially flowing and rotating fluid-particle mixture // Polym. Compos. – 2017. – Vol. 38. – P. E577-E596.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБЖИГА ИЗВЕСТНЯКА ВО ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ПЕЧИ

Бояршинов Д.А., Сметанников О.Ю.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
houston707@mail.ru, sou2009@mail.ru

В настоящее время существует высокая потребность в извести, которая имеет широкий спектр применения в строительстве и химической промышленности. Для получения извести необходимо обжечь известняк, что чаще всего производят в шахтных или вращающихся печах. В связи со сложностью процессов, происходящих внутри печи, а также необходимостью подбора режимов обжига, становится актуальной задача численного моделирования процесса обжига известняка.

Целью данной работы является определение объемного расхода топлива, скорости вращения и наклона печи, при которых будет происходить полная диссоциация известняка, а температура газов на выходе не будет превышать 700 °С.

Моделирование производится с помощью разбиения печи на несколько зон, для каждой из которых составляется уравнение теплового баланса. Отдельно рассматривались зоны футеровки, газа в печи и самого известняка, а по длине печь была разбита на 20 зон. Далее из решения нелинейной системы уравнений теплового баланса определялись температуры зон.

Уравнение теплового баланса для газовых зон:

$$\sum_k (a_{ki} T_i^4 + g_{ki} T_k) - \overline{Q}_i = 0, \quad (1)$$

где a_{ki} - коэффициент излучения с k -ой зоны на i -ую, a_{ki} - коэффициент конвективного и массового обмена с k -ой зоны на i -ую, $\overline{Q}_i$ - теплота от горения газа, T_k - температура k -ой зоны.

Уравнение теплового баланса для зон футеровки:

$$\sum_k (a_{ki} T_i^4 + g_{ki} T_k) - \pi l_s k_{L,i} (T_i - T_0) = 0, \quad (2)$$

где $k_{L,i}$ - коэффициент теплопередачи через стенку футеровки, T_0 - температура окружающей среды, l_s - длина зоны футеровки.

Уравнение теплового баланса для зон футеровки:

$$\sum_k (a_{ki} T_i^4 + g_{ki} T_k) - 2c_{mi} P [T_i + 2 \sum_{j=1}^{i-1} (-1)^{i+j} T_j + (-1)^i T_{in}] - Q_i^{iz} = 0, \quad (3)$$

где c_{mi} - удельная теплоемкость, T_m - температура материала на входе в печь, P - производительность печи, Q_i^{iz} - теплота, затраченная на разложение известняка.

Для реализации численной модели процесса обжига известняка использованы пакеты Ansys Mechanical и MatLab. Расчетным путем найдены оптимальные параметры процесса при нормальных погодных условиях: наклон печи 3 градуса, скорость вращения 1.62 об/мин, массовый расход топлива 293.7 м³/час, температура газов на выходе 559 °С.

Литература

[1] Лисиенко В.Г., Щелоков Я.М., Ладыгичев М.Г. Вращающиеся печи: теплотехника, управление и экология: Справочное издание в 2-х книгах. Книга 2— Москва, 2004. — 592 с.

СТОХАСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ БЕЛКОВЫХ ПОЛЕЙ С ЗАПАЗДЫВАЮЩЕЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

Брацун Д.А., Бузмаков М.Д.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
DABracun@pstu.ru, maxim.buzmakov97@gmail.com

В функционировании живых систем важную роль играют синтезируемые генами белковые поля, которые участвуют в генной регуляции через обратные связи. Детерминистское описание таких полей с помощью дифференциальных уравнений является недостаточным для понимания протекающих процессов, так как типичное число белковых молекул, вовлекаемых в регуляцию очень мало. Это приводит к сильным флуктуациям в системе, которые связаны с шумом самих химических реакций [1]. Стандартным инструментом численного анализа точечных белковых полей является алгоритм Гиллеспи [2].

В данной работе мы рассматриваем особый вид белковых полей, динамическое поведение которых не описывается Марковским процессом. В последние годы стало ясно, что процессы экспрессии генов, вообще говоря, состоят из многоэтапных реакций, в ходе которых последовательно образуются ансамбли сложных органических соединений. Таким образом, эти процессы распределены по пространству, растянуты по времени и зависят от всей предыстории. В частном случае процесса запаздывания эффектом нельзя пренебречь, если время запаздывания одного порядка величины с другими динамическими процессами [1]. Рассматривается две системы с запаздыванием: одноклеточный авторепрессор [1] и трехгенный репрессилиатор [3]. Последний является первым объектом, сконструированным в рамках синтетической биологии: плазмида репрессилиатора включает гены *lacI*, *λcl* и *tetR*, которые имеют естественное происхождение, но в такой комбинации в природе не встречаются. В [4] мы впервые предложили модель репрессилиатора, у которого имеются запаздывания по времени в звеньях регуляторной цепи. Для проведения численного анализа использовалась модифицированная версия алгоритма Гиллеспи на случай немарковских процессов [1]. Обнаружены новые динамические явления, которые отсутствуют у авторепрессора и репрессилиатора при детерминистском описании. Показано, что синхронизация в работе генов наступает на два порядка быстрее из-за нелинейного взаимодействия шума и запаздывания.

Пространственное моделирование белковых полей было произведено в рамках гибридной модели двумерной ткани эпителия, включающей детерминистское описание процесса диффузии и стохастику генной регуляции. Обнаружено, что совместное действие запаздывания, шума и пространственного обмена сигналами между клетками может приводить к образованию паттернов даже в том случае, когда детерминистское описание предсказывает абсолютно устойчивое состояние.

Работа финансово поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (грант № FSNM-2020-0026).

Литература

- [1] Bratsun D., Volfson D., Hasty J., Tsimring L. Delay-induced stochastic oscillations in gene regulation // Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. – 2005. – Vol. 102, No. 41. – P. 14593-14598.
- [2] Gillespie D.T. Exact stochastic simulation of coupled chemical reactions // J. Phys. Chem. 1977. – Vol. 81. – P. 2340-2361.
- [3] Elowitz M.B., Leibler S. A synthetic oscillatory network of transcriptional regulators // Nature. – 2000. – Vol. 403. – P. 335-338.
- [4] Брацун Д.А., Лоргов Е.С., Полуянов А.О. Репрессилиатор с запаздывающей экспрессией генов. Часть I. Детерминистское описание // Компьютерные исследования и моделирование. – 2018. – Т. 10, № 2. – С. 241-259.

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ, ПРОИСХОДЯЩИХ В МОНОЛИТНОЙ БЕТОННОЙ КРЕПИ ШАХТНОГО СТВОЛА, В УСЛОВИЯХ ПЕРЕМЕННЫХ ТЕПЛОВЫХ НАГРУЗОК

Бублик С.А., Семин М.А., Левин Л.Ю.

Горный институт Уральского отделения Российской академии наук, Пермь
serega-bublik@mail.ru, seminma@inbox.ru

Наиболее распространенный вид крепи вертикальных стволов шахт – это монолитная бетонная крепь. Она служит для восприятия горного давления со стороны окружающих пород. Температурный режим бетонной крепи ствола при длительной его эксплуатации определяется, прежде всего, температурой воздуха в стволе. Последняя, в свою очередь, зависит от назначения ствола (вентиляционный или воздухоподающий), глубины и интенсивности ведения горных работ, температуры атмосферного воздуха и пр. В ряде ситуаций температура воздуха в стволах может сильно варьироваться в зависимости от времени. Так, например, имеет место при аварийном реверсировании воздушной струи в зимнее время года – для рудников крайнего Севера перепад температуры воздуха в вентиляционных стволах при реверсировании в зимнее время года может превышать 50 °С. Данный перепад температур может оказывать неблагоприятное действие на крепь шахтного ствола, вызывая высокие температурные деформации крепи. По оценкам других исследователей [1], максимальные температурные перепады для монолитных бетонных сооружений, не приводящих к температурной трещиноватости, составляют 10–30 °С. С учетом того, что монолитная бетонная крепь имеет низкую прочность на растяжение (на порядок ниже, чем на сжатие), большую актуальность приобретает вопрос определения предельно-допустимых изменений температуры в вертикальных шахтных стволах в течение заданного промежутка времени, при которых монолитная бетонная крепь сохраняет свою целостность и несущую способность.

Рассматривался воздухоподающий ствол с окружающей его бетонной крепью и породным массивом в интервале глубин от 0 до 100 м. Расчет термодинамики крепи и массива проводился в одномерной постановке. Чтобы учесть вариации температуры породного массива по глубине, расчетный домен разбивался на N горизонтальных слоев, в каждом из которых отдельно решалась задача теплопереноса.

Решение задачи о напряженно-деформированном состоянии бетонной крепи и породного массива рассматривалось в рамках линейной теории упругости, в стационарной постановке и принятии гипотезы о плоско-деформированном состоянии бетонной крепи и породного массива. Для оценки прочности бетонной крепи использовалась первая гипотеза прочности. За допустимую прочность бралась величина прочности бетона на осевое растяжение [2].

В результате при помощи полученной термодинамической и деформационной моделей было проведено многопараметрическое численное моделирование напряженно-деформированного состояния бетонной крепи по фактору перепадов температур. Были получены зависимости предельно-допустимой длительности реверсирования воздуха в стволе до критического разрушения бетонной крепи от температуры воздуха в стволе.

Литература

- [1] Иудин М.М. Трещинообразование в бетонной крепи вертикальных стволов рудников Севера – Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал), № S6, 2007. – С. 300-307.
- [2] Трапезников Л.П. Температурная трещиностойкость массивных бетонных сооружений. – Москва, 1986. – 272 с.

ВЛИЯНИЕ ВЕТРА НА ИЗОТЕРМИЧЕСКОЕ ТЕЧЕНИЕ ВЯЗКОЙ НЕСЖИМАЕМОЙ ВЕРТИКАЛЬНО ЗАВИХРЕННОЙ ЖИДКОСТИ

Бурмашева Н.В.¹, Дьячкова А.В.²

¹Институт машиноведения УрО РАН, Екатеринбург

²Уральский федеральный университет, Екатеринбург
zetsuen160@outlook.com, nat_burm@mail.ru

В докладе представлено новое точное решение, описывающее изотермическое течение вязкой несжимаемой вертикально завихренной жидкости в горизонтальном слое между двумя параллельными пластинами. На контакте жидкости с твердыми поверхностями выполняется условие прилипания. Течение индуцируется движением пластин в горизонтальной плоскости. Если положить скорость движения нижней пластины нулевой (принять ее за отсчетное значение), то в этом случае указанное течение формально можно трактовать как течение жидкости в горизонтальном слое под действием неоднородно распределенного ветра, при этом на нижней границе жидкость покоится (выполняется условие прилипания). В этом случае точки, в которых скорость принимает нулевое значение, на самом деле определяют те области, где скорость жидкости совпадает с отсчетным значением (скоростью движения нижней пластины). Существование таких точек говорит о наличии противотечений и возможной стратификации поля скорости течения [1-3].

Моделирование проводится на основе уравнения Навье-Стокса, дополненного уравнением несжимаемости [1-3]. Точное решение определяющих уравнений ищется в форме частного случая класса Линя-Сидорова-Аристов для сдвиговых течений [2, 4]. Решения в этом случае представляет собой набор полиномиальных функций высоких порядков, зависящих от вертикальной (поперечной) координаты, для анализа которых применялись разработанные авторами методы [5]. Подробно исследовано решение для поля скоростей течения на предмет существования нулевых точек поля скорости, возникновения возвратных течений и зависимости свойств поля касательных напряжений от величины скорости ветра на верхней границе.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 19-19-00571).

Литература

- [1] Аристов С.Н., Просвирыков Е.Ю. Новый класс точных решений трехмерных уравнений термодиффузии // Теоретические основы химической технологии. – 2016. – Т. 50. – № 3. – С. 294 - 301. – DOI: 10.7868/S0040357116030027
- [2] Бурмашева Н.В., Просвирыков Е.Ю. Термокапиллярная конвекция вертикально завихренной жидкости // Теоретические основы химической технологии. – 2020. – Т. 54. – № 1. – С. 114 - 124. – DOI: 10.31857/S0040357119060034.
- [3] Бурмашева Н.В., Просвирыков Е.Ю. Точное решение для установившихся конвективных концентрационных течений типа Куэтта // Вычислительная механика сплошных сред. – 2020. – Т. 13. – № 3. – С. 337 - 349. – DOI: 10.7242/1999-6691/2020.13.3.27.
- [4] Burmasheva N.V., Prosviryakov E.Yu. Convective layered flows of a vertically whirling viscous incompressible fluid. Velocity field investigation // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Физико-математические науки». – 2019. – Т. 23. – № 2. – С. 341 - 360. – DOI: 10.14498/vsgtu1670.
- [5] Burmasheva N.V., Prosviryakov E.Yu. Studying the stratification of hydrodynamic fields for laminar flows of vertically swirling fluids // DReaM. – 2020. – Вып. 4. – С. 62–78. – DOI: 10.17804/2410-9908.2020.4.062-078.

ИЗОТЕРМИЧЕСКОЕ ТЕЧЕНИЕ ДВУСЛОЙНОЙ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ВЕТРА

Бурмашева Н.В.¹, Ларина Е.А.²

¹Институт машиноведения УрО РАН, Екатеринбург

² Уральский федеральный университет, Екатеринбург
larinakaterina@hotmail.com, nat_burm@mail.ru

В докладе представлено новое точное решение уравнения Навье-Стокса для установившихся сдвиговых изобарических течений вертикально завихренной вязкой несжимаемой двуслойной жидкости [1-3]. Полагается, что слои жидкости отличаются плотностью, величиной вязкости и толщиной. Нижнюю часть двуслойной жидкости занимает слой более высокой плотности. При этом отметим, что построенное точное решение может описывать двуслойные течения подобного типа и в случае, когда плотности и/или вязкости подслоев совпадают. Данное решение также способно описывать изотермические течения однослойных жидкостей (в случае, когда физические характеристики обоих слоев совпадают).

В качестве краевых условий было взято условие прилипания на нижней границе двуслойной жидкости и действие неоднородно распределенного ветра на верхней ее границе. Кроме того, использовались условия «склейки» решений для подслоев по скоростям и напряжениям.

Было показано, что построенное в выбранном классе [1, 4] точное решение для каждой из компонент вектора скорости описывается полиномом высокой степени. Полученное решение для каждого из подслоев было проанализировано на предмет существования нулевых точек при всех возможных сочетаниях параметров краевой задачи [3]. Показана принципиальная возможность существования в слое точек, где нулевое значение принимает хотя бы одна из компонент вектора скорости [1, 3-5]. В результате чего наблюдается существенно немонотонный характер профиля удельной кинетической энергии.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 19-19-00571).

Литература

- [1] Burmasheva N.V., Prosviryakov E.Yu. Convective layered flows of a vertically whirling viscous incompressible fluid. Velocity field investigation // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Физико-математические науки». – 2019. – Т. 23. – № 2. – С. 341 - 360. – DOI: 10.14498/vsgtu1670.
- [2] Просвирыков Е.Ю. Новый класс точных решений уравнений Навье–Стокса со степенной зависимостью скоростей от двух пространственных координат // Теоретические основы химической технологии. – 2019. – Т. 53. – № 1. – С. 112 - 120. – DOI: 10.1134/S0040357118060118.
- [3] Burmasheva N.V., Prosviryakov E.Yu. Studying the stratification of hydrodynamic fields for laminar flows of vertically swirling fluids // DReaM– 2020. – Iss. 4. – P. 62–78. – DOI: 10.17804/2410-9908.2020.4.062-078.
- [4] Бурмашева Н.В., Просвирыков Е.Ю. Термокапиллярная конвекция вертикально завихренной жидкости // Теоретические основы химической технологии. – 2020. – Т. 54. – № 1. – С. 114 - 124. – DOI: 10.31857/S0040357119060034.
- [5] Burmasheva N.V., Larina E.A., Prosviryakov E.Yu. Unidirectional convective flow of viscous incompressible fluid in a closed horizontal layer with the perfect slip condition // AIP Conference Proceedings. – 2020. – Vol. 2315. – 020010. – DOI: 10.1063/5.0036714.

КЛАСС ТОЧНЫХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ ОПИСАНИЯ НЕОДНОРОДНЫХ ТЕЧЕНИЙ С УЧЕТОМ ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ

Бурмашева Н.В., Просвиряков Е.Ю.

Институт машиноведения УрО РАН, Екатеринбург

nat_burm@mail.ru, evgen_pros@mail.ru

Используемые традиционно для описания течений вязкой жидкости модели на основе уравнения Навье-Стокса предполагают, что материальные жидкие объемы движутся параллельно друг другу без учета возможности вращения этих элементов или их контактного взаимодействия (внутреннего трения) [1, 2]. С одной стороны, такие допущения упрощают функциональные зависимости между кинетико-силовыми параметрами, и мы получаем уравнение движения жидкости именно в виде классического уравнения Навье-Стокса. С другой стороны, это упрощение не позволяет описывать наблюдаемые в жидкости эффекты и предсказывать потенциально имеющие место эффекты, связанные с наличием моментных (вращательных) составляющих и влияния одной жидкой объемной частицы на другие. Аналогичная ситуация имеет место, когда, например, для вращающихся жидкостей в учет берут только силу инерции, игнорируя центробежную силу [3-5].

В докладе приведен класс точных решений на основе обобщения класса Линя-Сидорова-Аристова с непостоянным вертикальным отсосом/подсосом для описания неустановившихся неоднородных течений вязкой жидкости при учете внутреннего трения. Построена редуцированная система, позволяющая определить путем интегрирования вид каждой из компонент указанного класса. Показано, что полученная система является переопределенной. Применение предложенного класса продемонстрировано на задаче описания неоднородных установившихся сдвиговых течений с постоянной вертикальной скоростью. В частности, показано, что определяющая система для пространственных ускорений сводится к решению операторного уравнения с линейным оператором, определяемым величиной вертикальной скорости, кинематической вязкостью и коэффициентом трения. Подробно разобраны условия ветвления вида решения для компонент выбранного класса точных решений в зависимости от значений, принимаемых указанными тремя параметрами.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 19-19-00571).

Литература

- [1] Аристов С.Н., Просвиряков Е.Ю. Новый класс точных решений трехмерных уравнений термодиффузии // Теоретические основы химической технологии. – 2016. – Т. 50. – № 3. – С. 294 - 301. – DOI: 10.7868/S0040357116030027.
- [2] Просвиряков Е.Ю. Новый класс точных решений уравнений Навье–Стокса со степенной зависимостью скоростей от двух пространственных координат // Теоретические основы химической технологии. – 2019. – Т. 53. – № 1. – С. 112 - 120. – DOI: 10.1134/S0040357118060118.
- [3] Бурмашева Н.В., Просвиряков Е.Ю. Точное решение уравнений Навье–Стокса, описывающее пространственно неоднородные течения вращающейся жидкости // Труды института математики и механики УрО РАН. – 2020. – Т. 26. – № 2. – С. 79 - 87. – DOI: 10.21538/0134-4889-2020-26-2-79-87.
- [4] Бурмашева Н.В., Просвиряков Е.Ю. Класс точных решений для двумерных уравнений геофизической гидродинамики с двумя параметрами Кориолиса // Известия Иркутского государственного университета. Серия «Математика». – 2020. – Т. 32. – С. 33 – 48. – DOI: 10.26516/1997-7670.2020.32.3.
- [5] Бурмашева Н.В., Просвиряков Е.Ю. Изотермические сдвиговые течения вязкой несжимаемой жидкости с пространственным ускорением при учете трех параметров Кориолиса // Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures. – 2020. – Iss. 3. – P. 29 - 46. – DOI: 10.17804/2410-9908.2020.3.029-046.

МАГНИТОАКТИВНЫЕ ЭЛАСТОМЕРЫ С ВЫСОКОКОЭРЦИТИВНЫМ НАПОЛНИТЕЛЕМ: ОСОБЕННОСТИ НАМАГНИЧИВАНИЯ

Ваганов М.В., Райхер Ю.Л.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
mikhail.vaganov.sci@gmail.com raikher@icmm.ru

Магнитоактивные эластомеры (МАЭ) с высококоэрцитивным (магнитожёстким) наполнителем обладают расширенной, по сравнению со стандартными МАЭ, гаммой параметров, управление которыми позволяет влиять на механическое поведение таких композитов. Это обусловлено, прежде всего, возможностью придавать им собственную (существующую в отсутствие внешнего поля) намагниченность путём «инициации» – обработкой свежеприготовленного образца сильным полем. Именно после такого воздействия частицы порошка типа NdFeB, которые вплоть до завершения полимеризации матрицы остаются размагниченными, приобретают постоянные магнитные моменты.

Магнитное поле, приложенное к образцу МАЭ, непосредственно влияет только на его ферромагнитную фазу, так что магнитное воздействие на образец в целом – то есть, собственно *магнитомеханика* МАЭ – полностью определяется типом и прочностью связей между частицами и эластомером, а также характером возникающих мезоскопических напряжений. В стандартных МАЭ, где наполнитель состоит из низкокоэрцитивных частиц, основным источником таких напряжений являются смещение частиц под воздействием магнитостатических мультипольных сил. Хотя указанные силы не являются центральными, основной модой отклика являются перемещения центров масс частиц. В МАЭ с намагниченными частицами не менее важна, однако, вращательная мода (центр масс частицы неподвижен), вызываемая мезоскопическими моментами магнитных сил.

Для всех типов реальных МАЭ вопрос о том, насколько сильно частицы композита «вклеены» в матрицу пока остаётся открытым. Между тем, в современной теории МАЭ пока полностью доминирует постулат о неразрывном point-to-point контакте. В настоящей работе, рассматривая МАЭ с магнитожёстким наполнителем, мы приводим физические обоснования для двух альтернативных моделей и обсуждаем, возможно ли по кривым макроскопического намагничивания образцов выяснить действительный характере связи частица/матрица.

Первая модель предполагает, что адгезионная связь полностью отсутствует, а несферическая частица конгруэнтна своей полости в эластомере только в начальном (невозмущённом) положении. При наложении поля, неколлинеарного магнитному моменту частицы, ей приходится, поворачиваясь, «раздвигать» матрицу. Возникающая деформация создаёт момент сил сопротивления, который затрудняет ориентацию магнитного момента вдоль приложенного поля и тем самым тормозит намагничивание.

Вторая модель специализирована для реальных композитов, где форма частиц (NdFeB Magnequench) близка к сферической, а матрицей является силиконовый эластомер. Как оказывается, в полях от 1 кЭ момент магнитных сил, действующий на частицы диаметром ~50 мкм (дисперсность реального порошка), способен разрушить имеющуюся адгезию и «отклеить» частицу от матрицы. Освободившись, частица начинает вращаться относительно полости и останавливается, лишь когда момент магнитных сил падает ниже адгезионного. Каждое нарушение адгезии вносит в систему необратимость, что, конечно, влияет на форму кривой намагничивания такого МАЭ. Отметим, что самыми распространёнными наполнителями для МАЭ рассматриваемого типа являются коммерческие микропорошки NdFeB различных марок: как с частицами неправильной формы (здесь подходит модель I), так и с микросферами (здесь подходит модель II).

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УГЛЕРОДНЫХ ВОЛОКОН С БЕНТОНИТОМ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ И ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПТФЭ

Васильев А.П.¹, Охлопкова А.А.¹, Стручкова Т.С.¹, Алексеев А.Г.¹

¹Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова, Якутск
gtyap@mail.ru

В настоящее время полимерные композиционные материалы (ПКМ) широко применяются в качестве деталей узлов трения машин и техники [1]. Политетрафторэтилен характеризуется высокой химической стойкостью и работоспособностью в широком диапазоне рабочих температур. Однако, низкая износостойкость ПТФЭ ограничивает его использование в узлах трения. Расширение области применения ПТФЭ достигается благодаря введению различных типов наполнителей [2]. В последние десятилетия большой интерес вызывают ПКМ, содержащие в составе несколько разнотипных наполнителей [3]. Цель работы – исследование влияния механоактивированного бентонита в сочетании с углеродными волокнами на физико-механические и триботехнические свойства ПТФЭ.

В качестве полимера использовали ПТФЭ марки ПН-90. Наполнители: углеродные волокна (УВ) марки «Белум» и природный наполнитель - бентонит (Б), месторождения РС(Я). Физико-механические характеристики определяли согласно ГОСТ 11262 и ГОСТ 4651. Триботехнические испытания проводили в трибомашине CETR UMT-3.

В таблице 1 приведены результаты исследования физико-механических и триботехнических характеристик ПТФЭ и ПКМ [4].

Таблица 1 – Результаты физико-механических и триботехнических свойств ПТФЭ и ПКМ

Образец	$\sigma_{\text{рм}}, \text{МПа}$	$\sigma_{\text{сд}}, \text{МПа}$	$I, \text{мг/ч}$	F
Исходный ПТФЭ	$21,0 \pm 1,2$	$15,0 \pm 1,1$	120 ± 10	$0,22 \pm 0,02$
ПТФЭ+1 мас.% УВ+1 мас.% Б	$22,0 \pm 1,7$	$18,0 \pm 1,0$	$1,49 \pm 0,15$	$0,25 \pm 0,02$
ПТФЭ+3 мас. %УВ+1 мас.% Б	$20,0 \pm 1,5$	$20,0 \pm 1,0$	$0,34 \pm 0,03$	$0,26 \pm 0,02$
ПТФЭ+5 мас.% УВ+1 мас.% Б	$20,0 \pm 1,6$	$23,0 \pm 1,2$	$0,29 \pm 0,02$	$0,25 \pm 0,02$
ПТФЭ+8 мас.% УВ+1 мас.% Б	$18,0 \pm 1,5$	$25,0 \pm 1,1$	$0,16 \pm 0,01$	$0,22 \pm 0,02$
ПТФЭ+10 мас.% УВ+1 мас.% Б	$17,0 \pm 1,4$	$26,0 \pm 1,3$	$0,25 \pm 0,02$	$0,22 \pm 0,02$

Как видно из табл. 1, прочность при растяжении ПКМ при содержании 1-8 мас.% УВ и 1 мас.% Б сохраняется на уровне исходного ПТФЭ, некоторое снижение зарегистрировано у ПТФЭ+10 мас.% УВ+1 мас.% Б. Напряжение при сжатии при 10% деформации ПКМ повышается с увеличением содержания наполнителей на 73% относительно исходного ПТФЭ. Видно, что износостойкость ПКМ в зависимости от содержания наполнителей повысилась в 80-750 раз, а коэффициент трения сохраняется на уровне исходного ПТФЭ.

Разработанные ПКМ благодаря высокой износостойкости и низкому коэффициенту трения могут быть использованы в узлах трения с ограниченной смазкой или без его использования.

Литература

- [1] Friedrich K. Polymer composites for tribological applications // Advanced Industrial and Engineering Polymer Research. – 2018. – Vol. 1, N 1. – P. 3-39.
- [2] Охлопкова А. А., Виноградов А. В., Пинчук Л. С. Пластики, наполненные ультрадисперсными неорганическими соединениями. — Гомель: ИММС НАН Беларуси, 1999. — 164 с.
- [3] Chang L., Zhang Z. Tribological properties of epoxy nanocomposites: Part II. A combinative effect of short carbon fibre with nano-TiO₂ // Wear. – 2006. – Vol. 260, N 7-8. – P. 869-878.
- [4] Okhlopkova A.A., Vasilev A.P., Struchkova T.S., Alekseev A.G., Grakovich P.N. Study of the Influence of Carbon Fibers and Bentonite on the Tribological Properties of PTFE //Journal of Friction and Wear. – 2020. – Vol. 41, N 6. – P. 571-577.

ТУРБУЛЕНТНАЯ ТЕПЛОВАЯ КОНВЕКЦИЯ ПРИ НЕОДНОРОДНЫХ ТЕПЛОВЫХ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЯХ

Васильев А.Ю., Сухановский А.Н.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

vasiliev.a@icmm.ru, san@icmm.ru

В реальных физических системах тепловые граничные условия неоднородны в силу различных обстоятельств, что может привести к временным и пространственным изменениям в эффективности теплопередачи. Поэтому исследование тепловой конвекции при неоднородных граничных условиях представляет большой интерес. В экспериментальных и численных исследованиях [1-3] неоднородность граничных условий создается при помощи комбинации теплопроводных и теплоизоляционных элементов на одной из границ. Идея сочетания теплопроводных и теплоизолирующих элементов заслуживает особого внимания по двум причинам. Во-первых, это выгодно с практической точки зрения: благодаря экономии дорогих, хорошо теплопроводящих материалов. Во-вторых, неоднородность температуры на границе создает дополнительные условия для неустойчивости течения вблизи нее и перехода к турбулентному режиму. В работе [1] экспериментально было показано, что эффективность теплового потока уменьшается с увеличением площади теплоизоляционных элементов. Другой интересный эффект был обнаружен в [2, 3]: когда размер теплоизоляционных элементов сопоставим с толщиной пограничного слоя, число Нуссельта сравнимо со случаем классической конвекции Рэлея-Бенара. В данной работе численно исследуется влияние неоднородного, непериодического распределения нагрева на конвективный тепловой поток в слабых турбулентных режимах. В расчетах рассматривались три конфигурации распределения нагреваемых областей: (I) – локализованный нагрев; (II) – девять нагревателей одинакового размера, равноудаленных друг от друга; (III) – комбинация из нагреваемых областей трех размеров с неоднородным распределением по пространству. Обнаружено, что эффективность переноса тепла существенно зависит от распределения нагреваемых областей. Несмотря на то, что площади нагретых областей одинаковы, максимальная разница в числах Нуссельта не превышает 18%. Комбинация нагревателей разного размера позволяет увеличить общий конвективный тепловой поток на 17% и 8% по сравнению с другими конфигурациями.

Работы проведены при поддержке проекта РФФИ №19-41-590004, расчеты проводились на вычислительном кластере «Тритон» (ИМСС УрО РАН).

Литература

- [1] F. Wang, S-D Huang, K-Q. Xia. Thermal convection with mixed thermal boundary conditions: effects of insulating lids at the top // *Journal of Fluid Mechanics* 817 (2017) R1.
- [2] P. Ripesi, L. Biferale, M. Sbragaglia, A. Wirth. Natural convection with mixed insulating and conducting boundary conditions: low- and high Rayleigh number regimes // *Journal of Fluid Mechanics* 742 (2014) 636–663.
- [3] D. Bakhuis, R. Ostilla-Mónico, E. van der Poel, R. Verzicco, D. Lohse. Mixed insulating and conducting thermal boundary conditions in Rayleigh-Benard convection // *Journal of Fluid Mechanics* 835 (2018) 491–511.

ВЛИЯНИЕ ДЕФОРМАЦИИ МИОКАРДА НА ВОЗНИКНОВЕНИЕ В НЕМ ИСТОЧНИКОВ ВОЗБУЖДЕНИЯ

Вассерман И.Н.¹

¹Институт механики сплошных сред УрО РАН (Пермь, Россия)

igorw@icmm.ru

Для сердечной деятельности характерна тесная взаимосвязь электрических, и механических процессов. Распространение волн возбуждения в миокарде приводит к его сокращению (электромеханическое сопряжение). В свою очередь, деформации, возникающие, в результате как электромеханического сопряжения, так и внешних причин оказывают обратное влияние на электрическое возбуждение (механоэлектрическая обратная связь). Это влияние заключается как в изменении проводимости миокарда, так и в возникновении дополнительных трансмембранных токов (активируемые деформацией ионные каналы, SAC).

С макроскопической точки зрения сердечная мышца может рассматриваться как две анизотропные проводящие среды – внеклеточное и внутриклеточное пространство, взаимодействующие через мембрану (бидоменная модель). Внеклеточное пространство почти изотропно, то для внутриклеточного пространства проводимости в разных направлениях могут отличаться на порядок. Здесь при исследовании зависимости внутриклеточной проводимости от деформации используется модель, предложенная в [1]. Внеклеточная проводимость слабо зависит от деформации.

При исследовании распространения волны возбуждения влияние деформации оказывается “разбавлено” внеклеточной проводимостью. При исследовании эффектов, где внеклеточная и внутриклеточная среда выступают индивидуально, влияние деформации оказывается более выраженным. Одним из наиболее ярких примеров, в котором бидоменная модель проявляет себя, является образование виртуальных электродов. Точное решение этой задачи в общем случае отсутствует, может быть использовано только приближенное решение. Другим примером является поляризация проводящей ток длинной узкой полосы из сердечной ткани с волокнами подходящими под углом к краям. В этом случае аналитическое решение может быть получено как и при отсутствии деформации, так и при однородной деформации.

Рассмотрена модель активации каналов при сложном деформировании, основанная на предположении, что эти каналы реагируют на локальное увеличение площади участка мембраны. Представлены два варианта расположения активируемых каналов: равномерное распределение на внешней поверхности клетки и равномерное распределение в t-тубулах - особых впячиваниях клеточной мембраны, расположенных перпендикулярно боковой поверхности [2].

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края в рамках научного проекта № 19-41-590002 p_a.

Литература

- [1] Вассерман И.Н., Матвеев В.П., Шардаков И.Н., Шестаков А.П. Вывод макроскопической внутриклеточной проводимости деформируемого миокарда на основе анализа его микроструктуры. // Биофизика. – 2018. – Т. 63. № 3. – С. 589-597..
- [2] Igor Vasserman, Igor Shardakov, Alexey Shestakov and Irina Glot. Mathematical modelling of excitation waves in anisotropic inhomogeneous moving myocardium AIP Conference Proceedings 2312, 050027 (2020)

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ВОССТАНОВЛЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ДВУМЕРНЫХ ПОСТАНОВКАХ

Ватульян А.О.^{1,2}, Недин Р.Д.¹

¹Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону

²Южный математический институт ВНИИ РАН, Владикавказ

aovatulyan@sfedu.ru, rdn90@bk.ru

В силу особенностей проведения технологического процесса большинство готовых изделий из современных материалов (включая неоднородные полимер-композиты, функционально-градиентные материалы) находится в условиях неоднородного остаточного напряженно-деформированного состояния. Модели деформирования одномерных и двумерных неоднородных конструкций типа стержней, цилиндров, пластин и полос актуальны при решении задач, возникающих в современном строительстве, при создании разнообразных военных и гражданских технических систем. На этапах производства таких конструкций в них часто преднамеренно вводят поля предварительных напряжений для улучшения их механических и эксплуатационных свойств [1].

В настоящей работе на основе линеаризованной постановки задачи о движениях предварительно напряженного тела рассмотрен ряд задач об установившихся колебаниях тонких полос и пластин, выполненных из неоднородного функционально-градиентного материала в условиях начального напряженно-деформированного состояния [2]. Сформулированы вариационные и слабые постановки рассмотренных задач. Получены численные решения прямых задач с использованием метода конечных элементов. Исследовано влияние уровней и типов неоднородности предварительных напряжений в исследуемых объектах на амплитудно-частотные характеристики и резонансные частоты, проведен анализ чувствительности; изучено изменение динамических характеристик в зависимости от вида сложного предварительно напряженного состояния. В ряде простых случаев численные результаты по влиянию начального нагружения на резонансные частоты сравнивались с опубликованными экспериментальными результатами. Исследован ряд обратных задач по восстановлению предварительных напряжений в пластинах на основе данных акустического зондирования. При этом рассмотрено 2 типа дополнительной информации: когда известно поле перемещений 1) во всей области тела для заданной частоты; 2) на части границы области в некотором частотном диапазоне [2]. Предложено несколько подходов к реконструкции одномерных и двумерных распределений остаточных напряженных состояний в плоских областях, основанных на итерационной регуляризации, проекционных и других методах. Проведены вычислительные эксперименты по восстановлению различных типов преднапряженного состояния, определены эффективные режимы акустического нагружения (частотного зондирования) пластин и полос, найдены наиболее эффективные и информативные диапазоны частот колебаний для успешной реконструкции предварительных напряжений.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Правительства Российской Федерации (соглашение № 075-15-2019-1928).

Литература

- [1] George E. Totten. Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel. – Ohio: ASM International. – 2002. – 499 р.
- [2] Ватульян А.О., Дударев В.В., Недин Р.Д. Предварительные напряжения: моделирование и идентификация. Монография. – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ. – 2015. – 206 с.

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ГРАДИЕНТНОЙ ТЕРМОУПРУГОСТИ ДЛЯ ЦИЛИНДРА С ТОНКОСЛОЙНЫМ ПОКРЫТИЕМ

Ватульян А.О.¹, Нестеров С.А.², Юров В.О.¹

¹Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону

²Южный математический институт – филиал ВНИИ РАН, Владикавказ
aovatulyan@srfedu.ru, 1079@list.ru, vyurov@srfedu.ru

Решение задачи о тепловом нагружении полого слоистого цилиндра имеет важное значение при расчете на прочность и потерю устойчивости термозащитного покрытия. В настоящее время при моделировании эффектов, наблюдаемых в тонкослойных покрытиях, используют градиентные теории упругости и термоупругости, которые в определяющие уравнения включают параметры размерности длины.

Градиентная теория упругости, была сформулирована в 60-е годы прошлого века в работах Миндлина [1]. Начиная с 70-х годов XX века градиентные теории стали применять и к задачам термоупругости [2]. В рамках этой теории решена задача термоупругости для функционально-градиентного цилиндра со степенным законом неоднородности [3]. В дальнейшем градиентные теории стали использоваться и для получения уточнённой оценки НДС слоистых термоупругих тел [4]. Задача термоупругости для неоднородного цилиндра с тонкослойным покрытием вызывает интерес.

В работе приведена постановка задачи о термоупругом деформировании полого бесконечного радиально-неоднородного цилиндра с тонкослойным покрытием. Для описания НДС использована градиентная теория Айфантиса [5] с одним дополнительным масштабным параметром. Поскольку уравнения равновесия в градиентной теории Айфантиса имеют повышенный порядок дифференциальных уравнений по сравнению с классической теорией, то были заданы дополнительные граничные условия в виде равенства нулю моментных напряжений на боковых поверхностях цилиндра.

Решение несвязанной задачи термоупругости начинается с нахождения распределения температуры, а далее определяются перемещения. Рассмотрено асимптотическое поведение точного решения задачи для цилиндра с однородным покрытием при малом градиентном параметре. В случае неоднородного покрытия получены классические и погранслойные части решения на основе метода ВКБ и численного решения вспомогательных задач Коши. После нахождения перемещений определены законы распределения напряжений Коши, моментных напряжения и полных напряжений в зависимости от радиальной координаты при различных законах неоднородности. Выявлен скачок радиальных напряжений Коши на границе сопряжения покрытия с цилиндром.

Работа выполнена при поддержке РНФ (код проекта 18-11-00069).

Литература

- [1] Mindlin R.D. Micro-structure in linear elasticity // Arch. Rational Mech. Anal. 1964. Vol. 16. P. 51–78.
- [2] Ahmadi G., Firoozbakhsh K. First strain gradient theory of thermoelasticity // International Journal of Solids and Structures. 1975. Vol. 11. P. 339–345.
- [3] Sadeghi H., Baghani M., Naghdabadi R. Strain gradient thermoelasticity of functionally graded cylinders // Scientia Iranica B. 2014. Vol. 21(4). P. 1415–1423.
- [4] Лурье С.А., Фам Тьюнг, Соляев Ю.О. Градиентная модель термоупругости и ее приложения к моделированию тонкослойных композитных структур // Механика композиционных материалов и конструкций. 2012. Т. 18(3). С. 440–449.
- [5] Altan B.S., Aifantis E.C. On some aspects in the special theory of gradient elasticity // J. Mech. Behav. Mater. 1997. Vol. 8(3). P. 231–282.

КОНТАКТНАЯ ЗАДАЧА ДЛЯ НЕОДНОРОДНОЙ ОРТОТРОПНОЙ ПОЛОСЫ

Ватульян А.О.^{1,2}, Плотников Д.К.^{1,2}

¹Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону

²Южный математический институт ВНЦ РАН, Владикавказ

aovatulyan@sfedu.ru, dustheap@mail.ru

В настоящее время в инженерную практику все больше внедряются элементы конструкций, изготовленные из функционально-градиентных материалов, характеризующихся непрерывным изменением свойств. Важным этапом изготовления конструкций из градиентных материалов является контроль свойств получающейся неоднородной структуры. Одними из наиболее эффективных средств определения свойств новых материалов являются методы индентирования. Использование методов индентирования для определения свойств неоднородных материалов требует исследования контактных задач для неоднородных сред и разработки новых эффективных методов решения обратных задач об идентификации свойств неоднородных объектов по данным индентирования.

В настоящей работе исследована задача о контактном взаимодействии без трения неоднородной ортотропной полосы и штампа с гладким основанием. С помощью преобразования Фурье сформулирована каноническая система дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами относительно трансформант компонент вектора перемещений и тензора напряжений. Решение системы построено численно с помощью метода пристрелки на основе вспомогательных задач Коши. Построено интегральное уравнение контактной задачи, ядра которого строятся численно. Исследовано поведение символа ядра интегрального уравнения. Проведен асимптотический анализ символа ядра при малых и больших значениях параметра преобразования. На основе метода Вишика-Люстерника найден главный член асимптотики символа ядра, показано, что он зависит от значений упругих модулей на верхней границе полосы. Решение интегрального уравнения построено численно с помощью метода граничных элементов. Построена вычислительная схема, позволяющая исследовать задачи с переменной областью контакта, не прибегая к затратной схеме решения интегрального уравнения в расширенной области. Представлены результаты решения контактной задачи для разных законов неоднородности. Построено распределение контактного давления и зависимость силы, действующей на штамп, от внедрения, являющаяся основной характеристикой в экспериментах по индентированию. Построенные зависимости могут быть использованы при решении обратных задач об определении упругих свойств неоднородной ортотропной полосы.

Работа выполнена при поддержке гранта Правительства РФ № 075-15-2019-1928.

О ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССАХ В НЕОДНОРОДНОМ ВОЛНОВОДЕ С ДЕФЕКТАМИ С УЧЕТОМ ЗАТУХАНИЯ

Ватульян А.О.^{1,2}, Юров В.О.¹

¹Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону

²Южный математический институт ВНЦ РАН, Владикавказ

aovatulyan@sfedu.ru, vyurov@sfedu.ru

Исследование распространения волн в поперечно-неоднородных волноводах при наличии дефектов различной природы возможно лишь численно. Один из возможных подходов основывается на совместном применении метода конечных элементов для построения решений в конечной области с дефектом и построении решений в полубесконечных областях с их последующим согласованием [1]. Для случая локального нарушения целостности в окрестности границ в поперечно неоднородном цилиндрическом волноводе предлагается модифицированный метод однородных решений [2]. В рамках модели установившихся осесимметричных продольно-радиальных колебаний радиально неоднородного вязкоупругого цилиндрического волновода рассмотрено распространение волн при наличии осесимметричной выемки на внешней границе волновода. Предполагается локальное, плавное и достаточно малое уменьшение внешнего радиуса цилиндра. Для построения эталонного решения, отвечающего действию распределенной в кольцевой области периодической во времени нагрузки, использован метод, основанный на интегральном преобразовании Фурье вдоль продольной координаты, численном, с помощью метода пристрелки, решении задачи в трансформантах Фурье и численном обращении интегрального преобразования с использованием теории вычетов для построения полей в условно дальней зоне и квадратурных формул для построения решения в ближней зоне [3]. Для учета затухания в рамках концепции комплексных модулей использована модель стандартного вязкоупругого тела. Для построения набора однородных решений реализован алгоритм приближенного поиска комплексных полюсов с использованием асимптотики для однородного волновода, а также произведено последующее их уточнение с использованием алгоритма типа метода Ньютона. Для согласования с эталонным решением и удовлетворения граничным условиям отсутствия напряжений использован метод коллокаций, причем неизвестные коэффициенты разложений определены при помощи решения возникающей алгебраической системы. На основе иного подхода - путем сведения к системе интегральных уравнений относительно скачков смещений исследовано решение задачи для вязкоупругого волновода с кольцевой трещиной. Проанализировано влияние реологических свойств на структуру решения. Представлен ряд вычислительных экспериментов по построению волновых полей для неоднородного волновода с выемкой и для вязкоупругого неоднородного волновода с кольцевой трещиной.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-31-90017.

Литература

- [1] Глушков Е.В., Глушкова Н.В., Евдокимов А.А. Гибридная численно-аналитическая схема для расчета дифракции упругих волн в локально неоднородных волноводах // Акуст. журнал. 2018. Т. 64, Вып. 1 С. 3-12.
- [2] Устинов Ю.А. Некоторые свойства однородных решений неоднородных плит // Докл. АН СССР. 1974. Т. 216. № 4. С. 755–758.
- [3] Ватульян А.О., Юров В.О. Анализ вынужденных колебаний в функционально-градиентном цилиндрическом волноводе // Акуст. журн. 2018. Т. 64, № 6 С. 649–656.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ КОНСТРУКЦИЙ С КОНЦЕНТРАТОРАМИ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ МЕТОДАМИ МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ МЕХАНИКИ РАЗРУШЕНИЯ

Ведерникова А.И., Плехов О.А.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

terekhina.a@icmm.ru, poa@icmm.ru

Прогнозирование прочности инженерных конструкций с заводскими или эксплуатационными концентраторами напряжений является одной из важнейших задач современной механики разрушения. В настоящее время значительный интерес проявляется к несингулярной составляющей в распределении напряжений у вершины концентратора напряжений (Т-напряжениям) ввиду её значительного влияния на напряженно-деформированное состояние для образцов различной геометрии и схем их нагружения. Большинство имеющихся исследований проведено для статического и циклического деформирования, при этом, как правило, исследуются стандартные плоские образцы [1, 2]. Кроме того, открытым остается вопрос о влиянии скорости деформирования на параметр стеснения деформаций.

В настоящей работе на основе методов, использованных при обобщении теории критических дистанций [3], развиваются методы двухпараметрической механики разрушения для описания характеристик напряженно-деформированного состояния в окрестности концентраторов напряжений при динамическом нагружении. Построение динамической двухпараметрической теории прочности на основе введения зависимости размера зоны влияния Т-напряжений от скорости деформирования позволит более корректно прогнозировать и обосновывать прочность конструкций с учетом особенностей деформирования и разрушения материала в локальных зонах процесса разрушения у концентраторов напряжений в условиях динамических нагрузок.

Верификация предлагаемых подходов проводится на экспериментальной базе данных по растяжению цилиндрических образцов с концентраторами напряжений из титанового сплава ВТ1-0 в диапазоне скоростей деформации $(10^{-3})-(10^3)$ 1/с. На основе данных численного моделирования оценивается степень стеснения деформаций в окрестности вершины концентраторов напряжений при динамическом нагружении и зависимость размера зоны процесса разрушения и распределения Т-напряжений у вершины концентратора напряжений от скорости деформации.

Работа выполнена в рамках государственного задания; номер гос. регистрации темы АААА-А19-119021490136-7.

Литература

- [1] Matvienko Yu.G., Semenova M.M. The concept of average stress in the fracture process zone for the search of the crack path // *Fracture and Structural Integrity*. – 2015. – Vol. 34. – P. 276-281.
- [2] Matvienko Yu.G. Nesinguliarnye T-napriazheniia v problemakh dvukhparametriceskoi mekhaniki razrusheniia [Nonsingular T-stress in problems of two-parameter fracture mechanics] // *Zavodskaiia laboratorii. Diagnostika materialov*. – 2012. – Vol. 78. – No. 2. – P. 51-58.
- [3] Vedernikova A., Kostina A., Plekhov O., Bragov A. On the use of the critical distance concept to estimate tensile strength of notched components under dynamic loading and physical explanation theory // *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. – 2019. – V. 103. – P. 102280.

УСТОЙЧИВОСТЬ, НЕЛИНЕЙНЫЕ РЕЖИМЫ И ДИНАМИКА ЛАГРАНЖЕВЫХ ЧАСТИЦ В КОНЕЧНОМЕРНЫХ МОДЕЛЯХ ДВУМЕРНЫХ ДВОЯКОПЕРИОДИЧЕСКИХ ТЕЧЕНИЙ

Вертгейм И.И.¹, Закс М.А.², Сагитов Р.В.³

¹Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

²Университет им. Гумбольдтов, Берлин

³Пермский государственный университет, Пермь

wertg@icmm.ru, zaks@physik.hu-berlin.de, sagitovrv@mail.ru

Рассмотрено семейство двумерных течений вязкой несжимаемой жидкости в плоской прямоугольной области с периодическими условиями на границах (течения на поверхности двумерного тора), вызванных силой, периодической по пространственным координатам и постоянной во времени, в комбинации с наличием прокачки в двух направлениях. Рассмотрен вариант силы, при котором реализуется двухвихревое стационарное течение, соответствующее точному решению уравнений Навье-Стокса с необычными свойствами лагранжевой динамики пассивной примеси: фрактальным спектром скорости, аномальными характеристиками транспорта и т.п. [1]. Результаты численного исследования спектральным и конечно-разностным методами устойчивости этого точного решения [2] показали, что для стандартного варианта геометрии, когда возмущения рассматриваются в квадратной ячейке, соответствующей пространственным периодам вынуждающей силы, основное состояние устойчиво даже при больших значениях амплитуд вынуждающей силы, неустойчивость возможна только для вытянутых прямоугольных ячеек периодичности, в сторонах которых укладывается несколько периодов силы. В случае неустойчивости рост возмущений как правило колебательный, но имеются и области монотонных возмущений. На основе конечномерных моделей в рамках иерархии фурье-галёркинских разложений с различным числом мод и сеточным методом исследованы нелинейные режимы течения. Колебательная неустойчивость основного решения приводит к замене стационарного поля скорости на периодически зависящее от времени. Случай стационарного решения аналогичен интегрируемой гамильтоновой динамике с одной степенью свободы, где функция тока играет роль функции Гамильтона, а фрактальный спектр мощности и алгебраически убывающая автокорреляция лагранжевых наблюдаемых [1] являются наиболее сложным вариантом. При появлении зависимости от времени общим случаем становится так называемый «лагранжев хаос», характерный наличием абсолютно непрерывной составляющей в спектре мощности и экспоненциальным затуханием автокорреляции. Оценивается влияние нелинейных стационарных и зависящих от времени режимов на спектральные и транспортные свойства лагранжевой динамики примеси: для стационарных решений изучены условия сохранения аномальных свойств спектра, а при малых амплитудах временной зависимости прослежена промежуточная асимптотика от фрактального спектра к непрерывному.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 20-51-12010 ННИО_а) и Немецкого Научно-исследовательского общества (DFG: Projekt ZA 658/3-1).

Литература

- [1] M. Zaks, A. Pikovsky, J. Kurths. Steady viscous flow with fractal power spectrum. *Physical Review Letters*, 1996.77. 4338-4341.
- [2] Wertgeim I. I., Zaks M.A., Sagitov R.V., Sharifulin A.N. Stability and nonlinear secondary modes of double-periodic flows with pumping//*Journal of Physics: Conference Series*, **1675** (2020) 012002. IOP Publishing. doi:10.1088/1742-6596/1675/1/012002

ДЕФОРМИРОВАНИЕ И РАЗРУШЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-АРМИРОВАННЫХ КОМПОЗИТОВ В ОПЫТАХ НА СЖАТИЕ ПОСЛЕ УДАРА

Вильдеман В.Э.¹, Лобанов Д.С.², Староверов О.А.³, Третьякова Т.В.⁴

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь

^{2,3,4} Центр экспериментальной механики ПНИПУ, Пермь

wildemann@pstu.ru, cem.lobanov@gmail.com, cem.staroverov@mail.ru,
cem.tretyakova@gmail.com

В работе представлены результаты экспериментального исследования механического поведения полимерных пространственно-армированных композитных пластин в опытах на сжатие после ударного воздействия. Разработаны методики, позволяющие отслеживать кинетику процессов накопления повреждений и разрушения при сжатии образцов с концентраторами эксплуатационного характера [1]. Анализ эволюции неоднородных полей перемещений и деформаций на поверхности композитных образцов при испытаниях на механическое сжатие проводится с целью изучения процессов неупругого деформирования, развития дефектных структур и разрушения, а также оценки влияния предварительного разрушения [2]. В работе использована видеосистема с комплектом камер высокого разрешения для получения опытных данных с высокой степенью детализации. Проведен анализ неоднородных полей перемещений, соответствующих координате z (перпендикулярно плоскости образца), с целью идентификации повреждений на поверхности образцов после предварительного удара и регистрации изменения геометрии пластин в ходе испытания на сжатие (на максимальном уровне приложенной нагрузки). Разрушение образцов после предварительного удара осуществлялось путем развития зоны повреждения (в области удара) в центральной части пластины. Образцы без предварительного удара разрушались в результате потери устойчивости пластины путем смятия.

С использованием методов дефектоскопии проведен анализ влияния типов структур пространственно-армированных полимерных композитов на характер их механического поведения в условиях сжатия после удара с различными энергиями воздействия [3]. Для оценки несущей способности элементов конструкций предложено использование введенного геометрического аналога поврежденности. Данная характеристика степени поврежденности в совокупности с опытными данными на сжатие может быть использована для косвенной оценки остаточных механических свойств композитных конструкций.

Исследование выполнено в ПНИПУ при финансовой поддержке гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых ученых МК-1222.2020.8. В части реализации алгоритмов обработки неоднородных полей перемещений и деформаций методом корреляции цифровых изображений в условиях сложных режимов нагружения работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ (№МК-885.2020.1).

Литература

- [1] Staroverov O.A., Wildemann V.E., Tretyakov M.P., Yankin A.S. Experimental study of the influence of preliminary complex mechanical loads on the deformation and strength properties of polymer composites // *Procedia Structural Integrity*. – 2019. – Vol. 18. – pp. 757-764. DOI: 10.1016/j.prostr.2019.08.224
- [2] Lobanov D. S., Strungar E. M., Zubova E. M., Wildemann V. E. Studying the Development of a Technological Defect in Complex Stressed Construction CFRP Using Digital Image Correlation and Acoustic Emission Methods // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. – 2019. – Vol. –55, . – No. 9. – pp. 631–638
- [3] Staroverov O.A., Babushkin A.V., Gorbunov S.M. Evaluation of the damage degree to carbon-fiber composite materials under impact // *PNRPU Mechanics Bulletin*. – 2019. – №1. – pp. 161-172. DOI: 10.15593/perm.mech/2019.1.14

МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ В МИКРОПОЛЯРНЫХ СРЕДАХ

Вильчевская Е.Н.

*Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург,
ven@ipme.ru*

В последнее время все большее внимание уделяется разработке и созданию новых высокопроизводительных материалов, обладающих внутренней структурой и находящихся применение в различных устройствах, начиная с легких аэрокосмических и автомобильных панелей и заканчивая микроэлектронными элементами. В связи с чем развитие теорий, связанных с описанием изменений микроструктуры материалов, имеет как фундаментальное, так и прикладное значение. Построение и исследование моделей механики микрополярных сред важно для задач микрофильтрации, использования диэлектриков и жидких кристаллов в электронике, формирования усиленных волокнами термопластиков.

В работе предложен новый подход к описанию структурных превращений в неупругих полярных средах в рамках пространственного описания. Разработана процедура определения инерционных и кинематических свойств элементарного объема при пространственном описании, спецификой которой является то, что рассматриваемый объем является открытой системой, а осреднению подлежат кинематические характеристики (количество движения и динамический спин) содержащихся в элементарном объеме микрочастиц. При этом оказывается, что, в отличие от классических теорий микрополярных сред [1], где тензор инерции полярной частицы феноменологически эквивалентен абсолютно твердому телу и является априорно заданным параметром материала, тензор инерции элементарного объема является дополнительной переменной, эволюция которой характеризует изменения структуры материала на мезо и микро уровнях. Показано, что, в общем случае, классическое уравнение сохранения тензора инерции должно формулироваться в виде балансового соотношения с источниковым членом, характеризующим структурные изменения среды. Необходимость формулировки нового балансового соотношения и, в частности, интерпретация входящего в него источникового члена, продемонстрирована через осреднение соответствующих характеристик микрочастиц, находящихся в элементарном объеме в данный момент времени. Предложена методика построения определяющего соотношения для источникового члена, основанная на рассмотрении изменений микроструктуры материала. В рамках разработанного подхода решен ряд модельных задач (измельчение гранулированных материалов, ориентационная поляризация диэлектриков, взаимосвязь между полями температуры и угловой скоростью), демонстрирующих особенности предложенной модели по сравнению с классической теорией микрополярных сред.

Литература

[1] Eringen, A.C., Kafadar, C.B.: Polar field theories. In: Continuum physics IV. Academic Press, London, 1976

ПОВЕДЕНИЕ СФЕРЫ В НЕРАВНОМЕРНО ВРАЩАЮЩЕМСЯ ЗАКРЫТОМ ВЕРТИКАЛЬНОМ ЦИЛИНДРЕ С ЖИДКОСТЬЮ

Власова О.А., Соломенников М.Н.

Пермский государственный гуманитарно-педагогический университет, Пермь
vlasova_oa@pspu.ru, solomennikov@pspu.ru

В работе экспериментально исследуется динамика тяжелой сферы во вращающейся цилиндрической полости, заполненной вязкой жидкостью. Полость совершает неравномерное (модулированное) вращение вокруг вертикальной оси по закону $\Omega = \Omega_{rot} (1 + \varepsilon \cos \Omega_{lib} t)$. В начале эксперимента сфера под действием силы тяжести и силы Архимеда прижата ко дну полости. Полость приводится в движение, средняя скорость вращения полости Ω_{rot} подбирается такой, чтобы, под действием центробежной силы сфера перешла к боковой стенке полости. При фиксированной Ω_{rot} задается модуляция скорости вращения полости с заданной частотой Ω_{lib} и амплитудой ε . Регистрация эксперимента осуществляется через нижний прозрачный торец полости при помощи скоростной видеокамеры.

Наблюдения показывают, что периодическое изменение скорости вращения Ω вызывает тангенциальные колебания сферы вдоль стенки полости. Одновременно с тангенциальными сфера совершает сложные вращательные колебания. Ранее проведенные эксперименты с цилиндром в полости, совершающей модулированное вращение вокруг горизонтальной оси, показали, что на осциллирующий вдоль стенки полости цилиндр действует осредненная подъемная сила [1]. В результате цилиндр переходит на некоторое расстояние от стенки, которое остается практически неизменным в ходе его движения. В настоящем эксперименте сфера отталкивается от границы только на части периода (рис.1). На рисунке белой линией обозначена граница полости. Частота периодически меняющегося значения зазора между стенкой полости и телом совпадает с частотой модуляции скорости вращения полости.



Рис. 1. Положение сферы в ходе одного оборота

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации МК-4536.2021.1.1.

Литература

- [1] Vlasova, O., Karpunin, I. & Solomennikov, M. Lift Force Acting on a Heavy Cylinder and a Steady Flow in an Unevenly Rotating Container – Microgravity Sci. Technol. 32, 2020. 889–896. <https://doi.org/10.1007/s12217-020-09817-9>

МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОФАЗНЫХ СИСТЕМ МЕТОДОМ РЕШЕТОЧНЫХ УРАВНЕНИЙ БОЛЬЦМАНА

Володин И.В.¹, Алабужев А.А.^{1,2}

¹Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь

²Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

ivanwolodin@gmail.com, alabuzhev@mail.ru

Одним из универсальных методов численного моделирования гидродинамических систем является метод решеточных уравнений Больцмана (Lattice Boltzmann Method, LBM). В отличие от сеточных методов, в LBM не производится дискретизация основных уравнений гидродинамики. Поведение системы моделируется на мезоскопическом уровне с помощью кинетического уравнения Больцмана [1]. Течение рассматривается как движение ансамбля псевдочастиц, описываемое с помощью функции распределения в фазовом пространстве координат и импульсов.

В настоящее время данный метод привлекает огромное внимание исследователей из-за своего универсального подхода и простоты создания распараллеленного кода. Помимо возможности решения задач в кинематической постановке, LBM позволяет моделировать многофазные потоки, теплопроводные задачи и турбулентные течения [2-4], а также вибрационные эффекты [5].

В данной работе исследовалась динамика различных двухфазных систем – распределение поля плотности несмешивающихся жидкостей с постоянной вязкостью в ограниченном объеме с твердыми стенками, затухание гравитационно-капиллярных волн, и стабилизация профиля стратифицированной жидкости в поле обратно-поступательных линейных вибраций. Из большого числа существующих многофазных моделей LBM для учета сил поверхностного натяжения была выбрана модель He-Chen-Zhang [6].

Результаты моделирования совпадают с результатами, полученными ранее аналитическими методами и методами прямого численного моделирования [7, 8].

Литература

- [1] Sukop M. C., Thorne D. T. Lattice Boltzmann Modeling – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007. – 173 p.
- [2] Куперштох А. Л. Моделирование течений с границами раздела фаз жидкость-пар методом решеточных уравнений Больцмана // Вестник НГУ: Серия “Математика, механика и информатика”. – 2005. Т. 5, № 3. – С. 29–42.
- [3] Алинеджад Д., Эсфахани Д. А. Моделирование методом решеточных уравнений Больцмана течения вязкой жидкости и сопряженного теплообмена в прямоугольной полости с нагретой подвижной стенкой // Теплофизика и аэромеханика. – 2013. – Т. 20, № 5. – С. 623–631.
- [4] Lammers P., Beronov K. N., Brenner G., Durst F. Direct Simulation with the Lattice Boltzmann of Developed Turbulence in Channel Flows // High Performance Computing in Science and Engineering. – 2002. – P. 43–58.
- [5] Володин И. В., Алабужев А. А. Моделирование поверхностных волн методом решеточных уравнений Больцмана // Физика для Пермского края. Материалы региональной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Пермь: Изд-во ПГНИУ, 2019. – С. 71–75.
- [6] Huang H., Sukop M. C., Lu X. Multiphase lattice Boltzmann methods: theory and application – Wiley-Blackwell, 2015. – 373 p.
- [7] Любимов Д. В., Любимова Т. П., Черепанов А. А. Динамика поверхности раздела в вибрационных полях – М.: Физматлит, 2003. – 216 с.
- [8] Любимов Д. В., Хилко Г. Л., Иванцов А. О., Любимова Т. П. Viscosity effect on the longwave instability of a fluid interface subjected to horizontal vibrations // J. Fluid Mech. – 2017. V. 814. – P. 24–41.

АППРОКСИМАЦИЯ ДИССИПАЦИИ ТЕПЛА В ВЕРШИНЕ УСТАЛОСТНОЙ ТРЕЩИНЫ В НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ

Вшивков А.Н., Изюмова А.Ю., Прохоров А.Е., Мубассарова В.А., Пантелеев И.А. Плехов О.А.

*Институт Механики Сплошных Сред Уральского отделения Российской Академии Наук,
Пермь*

vshivkov.a@icmm.ru, fedorova@icmm.ru, prokhorov.a@icmm.ru, mubassarova.v@icmm.ru,
pia@icmm.ru, poa@icmm.ru

Прогнозирование процесса распространения усталостных трещин часто выполняется с использованием эмпирических критериев, основанных на результатах линейной теории упругости. Учет влияния зоны пластической деформации обеспечивает незначительное улучшение точности прогнозирования, поскольку не описывает эволюцию микроструктуры материала и не дает никакой информации о рассеянии энергии в области вершины трещины. Одним из перспективных направлений является энергетический подход, в основе которого лежит баланс энергии в вершине усталостной трещины [1-3].

В работе проводилось экспериментальное исследование диссипации тепла в вершине усталостной трещины при одноосном и двухосном нагружении плоских образцов из нержавеющей стали 08X18H10. Исследовались три геометрии образцов: треугольный и прямой боковой вырезы для одноосных испытаний и центральный прямой вырез в крестообразных образцах при двухосных испытаниях. Измерение длины трещины производилось оптическим методом и методом измерения падения электрического потенциала. Для измерения диссипации тепла использовались метод инфракрасной термографии и оригинальный датчик теплового потока на основе эффекта Зеебека.

Следуя идее [4] работу пластической деформации в вершине усталостной трещины, а соответственно и диссипацию тепла можно разделить на работу в циклической и монотонной пластических областях. На основе этого получено уравнение для аппроксимации зависимости скоростью роста трещины и диссипации тепла в её вершине. По экспериментальным данным определены константы, входящие в уравнение. Было выявлено, что константы являются универсальными для разных типов нагружения. Из уравнения следует, что диссипация тепла в циклической зоне зависит только от приложенной нагрузки, в монотонной – является функцией скорости роста трещины и характерного размера зоны интенсивных пластических деформаций. В результате испытаний получена линейная зависимость между скоростью роста усталостной трещины и диссипацией тепла в её вершине. Произведя нормировки диссипации тепла возможно получить универсальную зависимость для разных типов нагружения.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 20-31-70018.

Литература

- [1] Wysocka-Fotek O., Oliferuk W., Maj M. Reconstruction of size and depth of simulated defects in austenitic steel plate using pulsed infrared thermography // Infrared Physics & Technology. – 2012. – Т. 55. - № 4. – С. 363-367.
- [2] Wang X. G., Crupi V., Jiang C., Feng E. S., Guglielmino E., Wang C. S. Energy-based approach for fatigue life prediction of pure copper // International Journal of Fatigue. – 2017. – Т. 104. – С. 243-250.
- [3] Meneghetti G. Analysis of the fatigue strength of a stainless steel based on the energy dissipation // International Journal of Fatigue. – 2007. – Т. 29. – С. 81-94.
- [4] Raju K. N. An energy balance criterion for crack growth under fatigue loading from considerations of energy of plastic deformation // Int. Journal of Fracture. – 1972. – Т. 8. – С. 1-14.

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ЖИДКОСТИ ВО ВРАЩАЮЩЕМСЯ ГОРИЗОНТАЛЬНОМ ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ СЛОЕ

Вяткин А.А.¹, Козлов В.Г.¹, Сабиров Р.Р.²

¹Пермский государственный гуманитарно-педагогический университет, Пермь

²Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь

vjatin_aa@pspu.ru, kozlov@pspu.ru, sabirov@pspu.ru

Экспериментально исследуется тепловая конвекция во вращающемся горизонтальном цилиндрическом слое жидкости. Рассматривается случай толстого слоя, разогреваемого изнутри. Изучаются пороги возбуждения и структура конвекции в зависимости от разности температур границ слоя, вязкости жидкости и скорости вращения. Методика экспериментального исследования аналогична методике, описанной в [1].

В поле центробежной силы инерции при быстром вращении жидкость находится в устойчивом квазиравновесном состоянии – распределение температуры стационарно, осесимметрично и имеет максимум на внутренней границе слоя. При горизонтальном расположении оси вращения поле силы тяжести возмущает поле центробежной силы с частотой, равной частоте вращения. Обнаружено, что при понижении скорости вращения в слое пороговым образом возбуждаются параметрические колебания жидкости с частотой в два раза меньшей частоты вращения. Конвективные течения представляют собой двумерные валы, вытянутые вдоль оси вращения, соседние валы согласованно вращаются в противоположных направлениях. В течение одного оборота скорость вращения отдельного вала, движущегося вместе с полостью, достигает максимума в нижней точке и меняет свое направление на противоположное – в верхней. Параметрические колебания неизотермической жидкости устойчиво стратифицированной в поле центробежной силы при вращении полости вокруг горизонтальной оси наблюдаются впервые. Колебания возбуждаются полем силы тяжести, осциллирующим во вращающейся системе отсчета, и аналогичны параметрическим колебаниям устойчиво стратифицированной жидкости в горизонтальном плоском слое при модуляции силы тяжести [2].

При дальнейшем понижении скорости вращения параметрическая конвекция сменяется термовибрационной [3,4]. При этом на фоне колебаний неизотермической жидкости, возбуждаемых вращающимся полем силы тяжести с частотой вращения, в жидкости генерируются осредненные виброконвективные течения, которые в пороге имеют вид квазистационарных валов, вытянутых вдоль оси вращения. В отличие от параметрической конвекции виброконвективные валы не изменяют интенсивности со временем и совершают медленный азимутальный дрейф относительно полости. Результаты экспериментов обобщены на плоскости управляющих параметров.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 18-71-1005).

Литература

- [1] Kozlov V.G., Vjatin A.A., Sabirov R.R., Myznikov V.M. Methods of experimental study of thermal convection in cavity subject to rotation and vibration // MethodsX, 6 (2019) P. 2420 – 2428.
- [2] Гершуни Г.З., Жуховицкий Е.М. Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости. М.: Наука, 1972. – 392 с.
- [3] Vjatin, A., Siraev, R. & Kozlov, V. Theoretical and Experimental Study of Thermal Convection in Rotating Horizontal Annulus. Microgravity Sci. Technol. 32, P. 1133 – 1145 (2020).
- [4] Вяткин А.А., Козлов В.Г., Сираев Р.Р. О конвективной устойчивости жидкости во вращающемся горизонтальном цилиндрическом слое // Изв. РАН. МЖГ, 2017. № 4. С. 73–84.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВОЙ КОНВЕКЦИИ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ СЛОЕ С ПРОДОЛЬНОЙ ПЕРЕГОРОДКОЙ ПРИ МОДУЛИРОВАННОМ ВРАЩЕНИИ

Вяткин А.А., Козлов В.Г.

Пермский государственный гуманитарно-педагогический университет, Пермь

vjatin_aa@pspu.ru, kozlov@pspu.ru

Экспериментально исследуется тепловая конвекция жидкости в односвязном горизонтальном цилиндрическом слое, вращающемся с переменной скоростью [1]. Внутренняя граница слоя имеет более высокую температуру. Кювета совершает быстрое вращение, при этом жидкость устойчиво стратифицирована в центробежном силовом поле, а поле силы тяжести не сказывается. Скорость вращения модулируется с высокой частотой. Частота угловых колебаний более чем вдвое превосходит частоту вращения полости. Параметры эксперимента соответствуют условиям, когда инерционные волны не возбуждаются. Изучаются пороги возникновения тепловой конвекции и структуры конвективных потоков в зависимости от разности температур границ слоя, скорости вращения и параметров вращательных колебаний полости. В качестве визуализатора течений применяется термохромная пленка, нанесенная на внутреннюю границу слоя. Использование теплочувствительной пленки обеспечивает высокую разрешающую способность и быстрый отклик на изменение температурного поля в отличие от традиционных методик. Обнаружено, что конвекция возбуждается пороговым образом при повышении угловой амплитуды модуляции. В полости наблюдается система тороидальных вихрей и продольных валов (рис.1).



Рис.1. Фотография конвективных структур в пороге. Скорость вращения полости $f_{\text{rot}} = 2$ об/с; частота угловых колебаний $f_{\text{lib}} = 6$ Гц, амплитуда модуляции скорости вращения $\varepsilon = 0.25$

Показано, что длина волны тороидальных структур зависит от безразмерной частоты угловых колебаний $n = f_{\text{lib}} / f_{\text{rot}}$. При этом пороговое значение длины волны продольных валов остается постоянным в широком диапазоне параметров эксперимента. Результаты исследований представлены в пространстве безразмерных управляющих параметров.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 18-71-1005).

Литература

[1] Вяткин А.А., Сабиров Р.Р. Тепловая конвекция в цилиндрическом слое с продольной перегородкой при модулированном вращении // Конвективные течения... Перм. гос. гум.-пед. ун-т. Пермь, 2019. Вып. 9. С. 16–25.

ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИОННОЙ ЗАВИСИМОСТИ КОЭФФИЦИЕНТОВ ДИФфуЗИИ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ДВУХСЛОЙНОЙ СИСТЕМЫ СМЕШИВАЮЩИХСЯ РАСТВОРОВ

Вяткин В.А., Брацун Д.А.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
yva063@bk.ru, DABracun@pstu.ru

Зависимость коэффициента диффузии растворенного вещества от своей концентрации – давно установленный факт [1]. Однако при решении гидродинамических задач его стали учитывать относительно недавно. В работе [1] впервые рассмотрен эффект концентрационно-зависимой диффузии в задачи о хемоконвекции смешивающихся растворов. Исключение химических реакций существенно упрощает постановку задачи, и ее решение можно получить с помощью аналитических методов [3].

В данной работе рассматривается двухслойная система смешивающихся и химически инертных растворов, заполняющих вертикально ориентированную ячейку Хеле-Шоу. В начальный момент времени растворы разделены по пространству. Предполагается, что верхний слой всегда легче нижнего, что исключает из рассмотрения неустойчивость Рэлея-Тейлора. Для описания динамики процессов, происходящих после начала процесса смешения растворов (диффузия компонентов происходит навстречу друг другу), используются уравнение движения с законом Дарси, два уравнения переноса растворенных компонент и уравнение неразрывности. Коэффициенты диффузии растворов зависят от концентрации линейным образом. В работе не рассматриваются эффекты перекрестной диффузии, поэтому коэффициенты обоих веществ зависят только от своих концентраций. Характерные единицы длины, скорости, давления, времени и обеих концентраций выбраны в соответствии с методологией работы [4], что позволяет существенно сократить время нелинейного расчета полных уравнений динамики.

Основываясь на методике, предложенной в [3], были получены точные решения для нелинейных уравнений диффузии. Показано, что в отсутствие концентрационной зависимости коэффициентов диффузии, полученные решения переходят в классические [1]. Анализ профилей плотности позволил получить аналитическое выражение для границы устойчивости рассматриваемой системы. Показано, что, помимо отношений концентрационных чисел Рэлея и отношения коэффициентов диффузии, которые вводятся в [4], появляется третий управляющий параметр. Поэтому граница устойчивости представляет собой уже не кривую, а поверхность в трехпараметрическом пространстве. Представлены численные решения полной нелинейной задачи, демонстрирующие конвективные структуры, которые формируются в результате развития неустойчивости двойной диффузии. Задача решается в терминах функции тока с помощью конечно-разностного метода.

Работа финансово поддержана РФФИ (грант № 19-01-00621).

Литература

- [1] Crank J. The mathematics of diffusion. — Oxford University Press. — 1975. — 414 p.
- [2] Bratsun D., Kostarev K., Mizev A., Mosheva E. Concentration-dependent diffusion instability in reactive miscible fluids // Phys. Rev. E. — 2015. — Vol. 92. — Art. 011003.
- [3] Брацун Д.А., Вяткин В.А. О применении линеаризации Видебурга при решении задачи устойчивости двухслойной смеси с концентрационно-зависимой диффузией // Вычислительная механика сплошных сред. — 2020. — Т. 13, № 4. — С. 459-470.
- [4] Trevelyan P.M.J., Almarcha C., De Wit A. Buoyancy-driven instabilities of miscible two-layer stratifications in porous media and Hele-Shaw cells // J. Fluid Mech. — 2011. — Vol. 670. — P. 38-65.

КОМПОЗИТ С АЛЮМИНИЕВОЙ МАТРИЦЕЙ И УГЛЕРОДНЫМ ВОЛОКНОМ

Галышев С.Н.

Институт физики твердого тела РАН, Черноголовка
galyshev@gmail.com

Активные исследования направленно-армированных композитов с металлической матрицей и углеродным волокном берут свое начало 60-х годах прошлого века. Однако, по сравнению с углепластиками, аналогичные композиты с металлической матрицей не нашли широкого применения в промышленности. В первом приближении это связано с несколькими естественными причинами. Во-первых, химическое взаимодействия между матрицей и волокном вносит грубые дефекты на поверхность волокна, что существенно снижает его эффективную прочность, а значит и прочность композита [1]. Во-вторых, такое взаимодействие приводит к образованию «сильной» связи матрица/волокно, что в большинстве случаев не желательно из-за необходимости равномерного распределения волокон в матрице и ограничения объемной доли волокна (не выше 30%) [2].

Более доступным методом создания покрытий с практической точки зрения является золь-гель технология, реализация которой не требует экстремальных условий. Золь-гель технология позволяет получать оксидные покрытия практически в «комнатных» условиях. Такие покрытия служат надежным диффузионным барьером [3, 4], а также могут выступать в роли «слабых» границ [5]. На сегодняшний день известно несколько десятков работ, посвященных нанесению оксидных золь-гель покрытий различного состава на углеродное волокно [6-9]. Однако, систематические исследования в этой области на сегодняшний день отсутствуют.

В докладе представлены данные о влиянии толщины барьерного оксидного покрытия углеродного волокна и некоторых других параметров формирования структуры композита на его механические свойства.

Литература

- [1] Galyshev S.N., et al. Aluminum alloy matrix composite wire reinforced by continuous carbon fibers – IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 489, 2019 – 012004 p.
- [2] Mileiko S.T., Metal and Ceramic Based Composites – Elsevier, Amsterdam, 1997 – 690 p.
- [3] Huang Y., et al. Carbon Materials Reinforced Aluminum Composites: A Review – Acta Metall. Sin. (Engl. Lett.), 27 (5), 2014. – 775–786 p.
- [4] Tang Y., et al. Improvement of interface between Al and short carbon fibers by α -Al₂O₃ coatings deposited by sol-gel technology – Ceramics Int. 34, 2008. – 1787 p.
- [5] Zeng Q. Fabrication of Al₂O₃-coated carbon fiber-reinforced Al-matrix composites – J. Appl. Polymer Sci. 70, 1998. – 177 p.
- [6] Rajan T., et al. Reinforcement coatings and interfaces in aluminium metal matrix composites – J. Mater. Sci. 33, 1998. – 3491 p.
- [7] Clement J., et al. Interfacial modification in metal matrix composites by the sol-gel process – Mater. Manuf. Process. 5, 1990. – 17 p.
- [8] Geiculescu C., et al. Aqueous sol-gel coating of pitch-based graphite fibers for inclusion in aluminum matrix composites – Mater. Manuf. Process. 14, 1999. – 489 p.
- [9] Durkin C.R., Low-Cost Continuous Production of Carbon Fiber-Reinforced Aluminum Composites – Dissertation, Georgia Institute of Technology, 2007. – 110 p.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИСПЫТАНИЙ ЛОПАТОЧНЫХ И КОЛЬЦЕВЫХ ЭЛАСТОМЕРНЫХ ОБРАЗЦОВ С УЧЕТОМ СКОРОСТИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ИХ РАБОЧЕЙ ЧАСТИ

Гаришин О.К., Пелевин А.Г., Соколов А.К.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
gar@icmm.ru, smile3k@yandex.ru, aleksandr_sokol@mail.ru

Основным способом улучшения физико-механических свойств резин является использование различных видов микро и нанопополнителей, которых на сегодняшний день известно великое множество [1]. Но наличие в этих наполнителях способствует значительному усилению различных эффектов, которые зависят от скорости и времени приложения нагрузки, причем даже для таких эластомеров, которые в чистом виде ведут себя практически как упругие материалы [2].

Проведено компьютерное моделирование испытаний лопаточных и кольцевых образцов из эластомерных материалов с хорошо выраженными вязкоупругими свойствами и способностью к размягчению при повторном деформировании (эффект Маллинза). Эксперименты численно моделировались в программном комплексе Ansys.

Расчеты подтвердили экспериментальные данные, что скорость деформирования материала в рабочей части лопаточного образца может значительно отличаться от той, что рассчитана по движению захватов разрывной машины. Связано это неравномерностью поперечного сечения лопаточного образца по его длине: в середине (рабочая часть) оно постоянное, а на концах его площадь увеличивается по мере приближения к зажимам. В результате в материале возникают неоднородные поля напряжений, что и приводит к переменной скорости деформирования рабочей части образца, причем даже в том случае, когда захваты двигаются с постоянной скоростью. Если при малых деформациях этот эффект проявляется незначительно и его можно, в принципе, не учитывать, то в случае больших вытяжек (десятки и сотни процентов) и сложных траекториях нагружения он способен серьезно исказить результаты испытаний.

Это особенно важно при исследовании механических свойств материалов, зависящих от времени и скорости деформирования. Неравномерность скоростей деформирования рабочей части образца приводит дополнительным усложнениям при поиске констант для определяющих уравнений в соответствующих механических моделях. Кроме того, данная проблема увеличивает время анализа информации о механическом поведении разных эластомерных материалов при сложных траекториях нагружения.

По мнению авторов, выход из данной ситуации состоит в том, что в экспериментах со сложными траекториями нагружения лучше использовать не лопаточные, а кольцевые образцы с одинаковым по всей длине поперечным сечением. Как показали компьютерные расчеты, в этом случае данная проблема практически полностью перестает существовать.

Работа выполнена в рамках бюджетного финансирования ПФИЦ ИМСС УрО РАН по теме АААА-А20-120022590044-7, а также при поддержке Гранта РФФИ 19-08-00725.

Литература

- [1] Caldoni E.B., De Leon A.C.C., Pajarito B.B., Advincula R.C. A review on rubber-enhanced polymeric materials // Polymer Reviews. – 2016. – V. 57(2). – P. 311–338.
- [2] Garishin O.K., Shadrin V.V., Kornev Yu.V. Mechanical studies of rubber micro- and nanocomposites promising for the tire industry. Uniaxial and biaxial tests // Materials Physics and Mechanics. – 2019. – V. 42. – P. 445–454.

ВЛИЯНИЕ ЛАЗЕРНОЙ УДАРНОЙ ПРОКОВКИ НА УСТАЛОСТНЫЙ РЕСУРС ТИТАНОВОГО СПЛАВА ОТ4-0

Е.А. Гачегова¹, Р. Сихамов², Ф. Фенцке², Н. Кашаев², О.А. Плехов¹

¹*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

²*Институт механики материалов, отдел лазерной обработки материалов и анализа живучести конструкций, центр им. Гельмгольца в г. Гестахт, Гестахт*

gachegova.e@icmm.ru

Усталостное разрушение является одной из основных причин отказа деталей и конструкций, которые подвержены воздействию циклически изменяющимся во времени нагрузок. Именно поэтому с практической точки зрения очень важным является вопрос повышения усталостного ресурса. Одним из актуальных способов решения этой задачи является создание сжимающих остаточных напряжений в предповерхностных слоях материала путем лазерной ударной проковки [1].

Данное исследование посвящено влиянию лазерной ударной проковки на усталостный ресурс титанового сплава ОТ4-0. Все эксперименты проводились на базе центра имени Гельмгольца в городе Гестахт, Германия.

Целью первого этапа исследования был поиск оптимальных параметров обработки титанового сплава. В связи с этим варьировались такие параметры процесса, как энергия импульса, длительность импульса и количество проходов лазера. Для лазерной проковки использовался Q-switched Nd:YAG лазер. После проковки определялись остаточные напряжения методом сверления отверстий и строились их профили по глубине образцов. На основе испытаний наиболее подходящими параметрами были выбраны энергия импульса – 3 Дж, длительность импульса – 10 нс и количество проходов лазера – один проход.

Целью второго этапа было изучение влияния лазерной обработки на усталостное поведение материала. Для проведения усталостных испытаний применялась серво-гидравлическая машина Schenck. Часть образцов была испытана с фиксированным циклом напряжений (максимальное напряжение 500 МПа, коэффициент асимметрии цикла 0.1) для оценки вероятности отказа в режиме малоциклового усталости, путем построения графиков распределения Вейбулла [2]. Другая часть образцов испытывалась при различных циклах напряжений для построения кривой Веллера. Также после усталостных испытаний проводился анализ микроструктуры поверхности излома образцов посредством электронной микроскопии.

Исходя из результатов структурных исследований поверхностей излома и усталостных тестов, был сделан вывод о том, что лазерная проковка приводит к изменению механизма усталостного разрушения и значительному увеличению срока службы образцов как в малоцикловом, так и в многоцикловом режимах усталости.

Литература

[1] Yang, J.M.; Her, Y.C.; Han, N.; Clauer, A. Laser shock peening on fatigue behavior of 2024-T3 Al alloy with fastener holes and stopholes // Materials Science and Engineering: A. - 2001. - Т. 298. - С. 296–299.

[2] J. Schijve. Statistical distribution functions and fatigue of structures // International Journal of Fatigue. – 2005. – Т. 27. – С. 1031-1039.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАХВАТА МИКРОТРЕЩИНОЙ ПРИМЕСНЫХ АТОМОВ В Fe-C: АТОМИСТИЧЕСКИЙ ПОДХОД

Герасимов Р.М., Волегов П.С.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
ivanov@org.ru, petrov@org2.ru

Эволюция дефектной структуры, в том числе взаимодействие дефектов различной размерности и типов между собой, являются ключевыми механизмами накопления поврежденности и разрушения в металлических материалах. Основными носителями поврежденности в материалах являются микротрещины. В многокомпонентных материалах, например, в сталях различных марок, в ходе исследований опытных образцов вблизи микротрещин отмечаются повышенные концентрации атомов примеси [1]. В механике континуума построение и верификация зависимости концентрации примесных атомов вблизи микротрещин осложнено тем, что в экспериментальных исследованиях измерить такого рода концентрации довольно сложно. Поскольку взаимодействие примесных атомов с микротрещиной происходит на атомарном уровне, актуальным представляется исследование зависимости концентраций примесных атомов, захваченных микротрещиной, с помощью метода молекулярной динамики, который в последние годы зарекомендовал себя как мощный вычислительный инструмент при исследовании структуры материалов [2].

В ходе работы построена и численно реализована математическая модель на метода молекулярной динамики, которая позволяет определить область захвата примесных атомов вблизи микротрещины. В качестве потенциала межатомного взаимодействия используется модель погруженного атома (EAM), конкретный вид потенциала межатомного взаимодействия описан в работе [3]. Построение области захвата основано на анализе траекторий примесных атомов и вычисления локальных тензоров и интенсивностей деформации для системы атомов. В результате численных экспериментов найдено критическое значение интенсивности деформации, которое позволяет идентифицировать область захвата примесных атомов вблизи микротрещины. Показано, что предложенный метод может быть использован для определения равновесных концентраций примесных атомов вблизи микротрещины при задании разной морфологии микротрещины.

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

Литература

- [1] Guo Y., Wang K., Song S. Abnormal influence of impurity element phosphorus on the hot ductility of SA508Gr.4N reactor pressure vessel steel // Materials Science and Engineering: A. - 2020. - Vol. 792, Is. 5. – 139837.
- [2] Rapaport D.C. The Art of Molecular Dynamics Simulation, Second Edition. – Cambridge: Cambridge University Press, 2004. – pp. 11-44.
- [3] B.-J. Lee A modified embedded-atom method interatomic potential for the Fe–C system // Acta Materialia. - 2006. - Vol. 64, Iss. 3. - pp. 701-711.

УПРУГО-ПРОЧНОСТНЫЕ И МИКРОСТРУКТУРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОЧАГА ДЕМИНЕРАЛИЗАЦИИ ЭМАЛИ ДО И ПОСЛЕ СТАНДАРТНОГО И МОДИФИЦИРОВАННОГО ИНФИЛЬТРАЦИОННОГО ЛЕЧЕНИЯ

Гилева О.С.¹, Левицкая А.Д.¹, Мудрова О.А.¹, Зуев А.Л.², Мирсаева Ф.З.³

¹Пермский государственный медицинский университет, Пермь

²Институт механики сплошных сред, Пермь

³Бакирский государственный медицинский университет, Уфа

o.s.gileva@yandex.ru

Механизмы прогрессирования начального кариеса (деминерализации эмали, ДЭ) во многом связаны с изменениями физико-механических свойств на границах очага поражения и интактной эмали [1]. Цель работы – изучить в сравнительном аспекте *in vitro* упруго-прочностные характеристики очага ДЭ и эмали после различных методик инфильтрационного лечения (ИЛ). На вестибулярной поверхности 18 удаленных по показаниям премоляров моделировали кариес эмали (патенты на ПМ №172561 от 17.07.2017, №171409 от 30.05.17; РП №2757 от 17.05.2018) и подтверждали его развитие с помощью компьютерной томографии, стереомикроскопии, сканирующей электронной и атомно-силовой микроскопии. ИЛ производили по стандартной методике с 2-х мин. режимом кондиционирования (СИЛ) или по модифицированной (МСИЛ), с 4-х минутным режимом. Методом кинетического микроиндентирования аттестовали физико-механические свойства эмали на высокоточном приборе Micro-combi tester (CSM Instruments SA): микротвердость (НТ, ГПа), модуль упругости (ЕИТ, ГПа), ползучесть (СИТ, %), релаксация (РИТ, %) и упругая составляющая работы индентирования (ПИТ, %). Исследования проводили на поперечных шлифах на глубине 85% в сторону эмалево-дентинного соединения. Микротвердость эмали после МСИЛ ($1,930 \pm 0,40$ ГПа) нарастала в сравнении с показателями очага ДЭ ($0,956 \pm 0,015$ ГПа), достоверно ($p < 0,05$), в 1,6 раза превышая показатель после СИЛ ($1,210 \pm 0,36$ ГПа). Модуль упругости эмали после МСИЛ ($33,828 \pm 12,0$ ГПа) достоверно ($p < 0,05$), в 1,7 раза превышал показатели эмали после СИЛ ($20,260 \pm 4,12$ ГПа) и в 3,3 раза по сравнению с ДЭ ($10,345 \pm 1,35$ ГПа). Ползучесть эмали после модифицированного лечения ($4,093 \pm 0,67\%$) в 1,6 раза ниже ($p < 0,05$) этого показателя после СИЛ ($6,58 \pm 0,82\%$) и в 5,8 раза ниже деминерализованной эмали ($23,675 \pm 1,7\%$). Показатель релаксации эмали после МСИЛ ($-0,104 \pm 0,1\%$), достоверно ($p > 0,05$) не превышал таковой после СИЛ ($-0,112 \pm 0,13\%$), но был в 1,6 раза выше, чем у деминерализованной эмали ($-0,17 \pm 0,18\%$). Упругая составляющая работы индентирования после МСИЛ ($29,328 \pm 4,46\%$) кариеса эмали достоверно не превышала таковой показатель после СИЛ ($28,403 \pm 2,27\%$), но была в 1,1 раза выше показателя деминерализованной эмали ($26,836 \pm 0,9\%$). Полученные данные объективизируют преимущества модифицированного инфильтрационного метода лечения кариеса эмали перед классической инфильтрационной методикой за счет полноценной obturation по всему объему очага деминерализации жидкотекучим композитом и соответствующего возрастания упруго-прочностных свойств, сформированной структурно-неоднородной среды – проинфильтрированной композитом деминерализованной эмали.

Литература

[1] Levitskaya A. The combined approach to evaluation of mechanical behavior of tooth enamel in artificially induced caries lesions / S. Galkin, A. Levitskaya, O. Gileva, T. Libik, L. Lomiashvili // BIO Web of Conferences. – 2020. – V.22. – P. 2-9.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант №17-48-590562-р_урал_a).

НЕКОТОРЫЕ ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ НАГРУЗКИ НА МЕЖДУКАМЕРНЫЕ ЦЕЛИКИ В УСЛОВИЯХ НЕПОЛНОЙ ПОДРАБОТКИ

Глебова П.А.

Горный институт УрО РАН, Пермь
polina.glebova@mi-perm.ru

При разработке калийных и соленых месторождений на больших глубинах предпочтительным считается использование камерной системы разработки с оставлением жестких барьерных целиков. Междукammerные целики, расположенные между барьерными целиками, находятся в зоне неполной подработки, что характеризуется снижением приходящейся на них нагрузки. Данная система позволяет уменьшить потери извлечения солей, обеспечивая при этом защиту рудника от затоплений, а также локализовать обрушения в пределах одного участка в случае разрушения междукammerных целиков [1].

Существует множество исследований, посвященных механизму распределения нагрузки между целиками, большинство из которых основаны на гипотезе формирования свода пород. Авторы используют методики, основываясь на своих представлениях о механизме поведения пород при их подработке, но зачастую не подтвержденных другими исследователями [2]. В связи с отсутствием общепринятого мнения в решении данного вопроса, на сегодняшний день задача определения нагрузки на междукammerные целики в системе с барьерными целиками представляет большой интерес, оставаясь одной из наиболее сложных и наименее изученных в геомеханике.

В работе были рассмотрены два подхода к анализу перераспределения нагрузки между барьерными и междукammerными целиками. В качестве объекта исследований был рассмотрен камерный блок, ограниченный осями симметрии барьерных целиков. Первый подход, основанный на методе фиктивных целиков [3], заключался в создании разгружающего воздействия барьерных целиков путем задания по их сечению реакции отпора в виде вертикальной распределенной нагрузки. Математическое моделирование проводилось в упругой постановке методом конечных элементов для условий плоского деформированного состояния [4]. Второй подход связан с расчетом высоты свода горного давления в зоне неполной подработки. За основу расчетов численного моделирования принимались исследования, базирующиеся на натурных измерениях [5].

В результате исследований показано разгружающее влияние барьерных целиков на междукammerные целики, получено распределение вертикальной нагрузки, рассчитана высота свода горного давления, действующего на междукammerные целики. Полученные оценки представляются достаточно корректными, однако, безусловно, нуждаются в уточнении, которые должны основываться на масштабных экспериментальных исследованиях.

Литература

- [1] Макаров А.Б. Практическая геомеханика. Пособие для горных инженеров – М.: Издательство «Горная книга», 2006. – 391 с.
- [2] Борисов А.А. Механика горных пород и массивов – М.: Недра, 1980. – 360 с.
- [3] Расчетные методы в механике горных ударов и выбросов. / Петухов А.М., Линьков В.С., Сидоров И.М. и др. М.: Недра, 1992. - 256 с.
- [4] Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике – М.: Мир, 1975. – 541 с.
- [5] Abel J.F., Jr., Colorado P. E. Review of proposed WIPP underground mine design. November, 1979.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОНИТОРИНГА ИНКЛИНОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ ВЫСОТНОЙ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ КОНСТРУКЦИИ

Глот И.О.¹, Шардаков И.Н.¹, Шестаков А.П.¹, Цветков Р.В.¹, Гусев Г.Н.¹, Епин В.В.¹

¹Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

glot@icmm.ru, shardakov@icmm.ru, shap@icmm.ru, flower@icmm.ru, gusev.g@icmm.ru,
epin.v@icmm.ru

Возведение масштабных инженерных конструкций и сложных строительных объектов в настоящее время все чаще сопровождается обустройством автоматизированных систем мониторинга. Наличие системы мониторинга является одним из факторов, обеспечивающих надёжность конструкции и долговечность ее эксплуатации. В работе представлена автоматизированная система деформационного мониторинга металлоконструкций надшахтного здания скипового ствола, представляющего собой высотное металлическое сооружение с максимальной высотой 64.350 м. Ее деформационное состояние определяется нагрузками, связанными с работой технологического оборудования, а также с такими внешними факторами как ветровая нагрузка, сезонные и суточные колебания температуры т.д.

Для высотной конструкции весьма ответственным моментом является контроль ее положения относительно вертикали. Сбор этой информации обеспечивает блок измерения углов наклона элементов конструкции относительно вертикали. В состав блока входят 8 датчиков-инклинометров, размещенных на различной высоте. Распределение инклинометров практически на одной вертикальной линии позволяет получить совокупность данных об угле наклона элементов конструкции, расположенных на различных уровнях и построить график смещения точек крепления датчиков относительно из начального положения. Эти данные позволяют оценить искривление первоначальной вертикальной оси конструкции в двух взаимно перпендикулярных плоскостях, проходящих через вертикальную ось. На основании полученных данных вычисляется важный контрольный параметр – отклонение проекции наивысшей точки конструкции от первоначального положения.

Показания датчиков инклинометрии поступают в систему мониторинга в автоматическом режиме с заданной периодичностью. На диспетчерский сайт системы мониторинга выдается информация об истории и текущем состоянии наклона различных точек конструкции и дается наглядное сопоставление текущих данных с допустимыми значениями отклонений.

Блок инклинометрических измерений дополняет общую совокупность данных, получаемых с различных блоков первичных датчиков автоматизированной системы мониторинга, и используется для оценки текущего деформационного состояния конструкции.

МОМЕНТНЫЕ И КУМУЛЯНТНЫЕ ПОДХОДЫ К ОПИСАНИЮ АКТИВНЫХ БРОУНОВСКИХ ЧАСТИЦ С МАЛОЙ ИНЕРЦИЕЙ

Голдобин Д.С.^{1,2}, Пермякова Э.В.^{1,2}, Клименко Л.С.^{1,2}

¹Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

²Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь
Denis.Goldobin@gmail.com, evelina.v.permyakova@gmail.com, lyudmilaklimenko@gmail.com

В работе исследуются четыре подхода к адиабатическому исключению быстрой переменной (скорости) в стохастических системах: (1) моментный формализм, (2) кумулянтный формализм, (3) использование базиса функций Эрмита, (4) аналог кумулянтного подхода для базиса функций Эрмита. Используя эти подходы, можно получить соответствующие уравнения типа Смолуховского [1], которые содержат только переменную координата (или фаза). Адиабатическое исключение скорости в рамках моментного и кумулянтного формализмов требует первых трех элементов [2]. Однако для случая малой инерции уточненное уравнение Смолуховского в рамках моментного формализма требует пять элементов, а в рамках кумулянтного формализма достаточно тех же первых трех элементов. По сравнению с методом, основанным на разложении распределения скоростей по функциям Эрмита [1], рассмотренные подходы имеют сопоставимую эффективность, но не требуют индивидуальной математической подготовки для случая активных броуновских частиц [3], когда необходимо построить новый базис собственных функций вместо функций Эрмита.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ № 19-42-04120.

Литература

- [1] C.W. Gardiner, Handbook of Stochastic Methods (Springer, 1983).
- [2] Goldobin D.S., Klimenko L.S. Small and finite inertia in stochastic systems: Moment and cumulant formalisms // AIP Conference Proceedings. – 2020. – V. 2216. – P. 070001.
- [3] Milster S., Nötel J., Sokolov I.M., Schimansky-Geier L. Eliminating inertia in a stochastic model of a micro-swimmer with constant speed // The European Physical Journal Special Topics. – 2017. – Vol. 226. – P. 2039–2055.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕПЛООБМЕНА ПРИ СИЛАНОВОЙ СШИВКЕ В ДВУХКОМПОНЕНТНОЙ СРЕДЕ ВОДА-ГАЗ С ПРИМЕНЕНИЕМ VOLUME OF FLUID МОДЕЛИ

Гольцов Е.С.¹, Труфанова Н.М.²

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь

²Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь

evgeny.goltsov@yandex.ru, trufanova@pstu.ru

Введение: В настоящее время в современном мире возрастает интерес к использованию силовых кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена, которые находят широкое применение в системах распределения электрической энергии всех классов напряжения. Одним из широко используемых изоляционных материалов является сшитый полиэтилен, обладающий хорошими механическими и диэлектрическими свойствами. Технологический процесс получения кабеля с силаносшиваемой изоляцией выглядит следующим образом: на токопроводящую жилу методом экструзии наносится изоляция из силаносшиваемого полиэтилена, затем изолированная жила наматывается на барабан, который на следующем этапе производства помещается в ванну с водой с температурой 90 С, где выдерживается определенное время [1]. Для различных маркоразмеров, длин заготовки, размеров барабанов необходимо определять время выдержки, параметры технологического режима-температуру подаваемого пара и величину расхода пара с учетом объема воды в вулканизационной ванне. Таким образом, возникает необходимость в разработке математической модели процессов, протекающих при силановой сшивке изоляции. **Цель исследования:** Создание нестационарных математических моделей процесса тепломассопереноса в ванне для силановой сшивки изоляции кабеля, наполненной горячей водой с непрерывной подачей перегретого пара. Определение времени нагрева изоляции для различных маркоразмеров, длин заготовки, размеров барабанов. **Методы:** Численная реализация разработанных математических моделей осуществлялась методом конечных элементов в среде ANSYS, Fluent. Для описания положения границы раздела пар - воздух используется модель VOF(volume of fluid), для описания турбулентного течения использовалась классическая ke-модель. **Результаты:** В работе разработаны две математические модели, нестационарная двумерная математическая модель процессов тепломассопереноса в ванне с кабелем и двухкомпонентной средой - пар-вода и нестационарная трёхмерная математическая модель процессов тепломассопереноса в ванне с кабелем. Проведен анализ работоспособности предложенных моделей. В результате исследования были получены векторные поля скоростей, поля температур и распределения фаз в силанольной ванне. Построена зависимость температуры кабеля, представляющего собой монолит с усредненными свойствами, от времени нагрева в центре изоляции. Оценена адекватность математической модели и определена возможность её использования на практике. **Практическая значимость:** Результаты данной работы могут использоваться при создании технологических режимов сшивки силановой изоляции, при смене конструктивных особенностей заготовки и её длины на барабане. Использование цифровой модели позволяет оценить время протекания процесса силановой сшивки для кабелей среднего напряжения и определить рациональные режимы технологического процесса.

Литература

[1] Константинов Г.Г., Арсентьев О.В. Кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена–Иркутск, 2010. –с.219-224.

НЕОДНОРОДНОЕ ТЕЧЕНИЕ ПУАЗЕЙЛЯ В ЭКВАТОРИАЛЬНОЙ ЗОНЕ МИРОВОГО ОКЕАНА

Горшков А.В.^{1,2}, Просвиряков Е.Ю.^{1,2}

¹Институт машиноведения УрО РАН, Екатеринбург

²Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,
Екатеринбург

alex55gor@mail.ru, evgen_pros@mail.ru

Теоретическое изучение крупномасштабных движений воды в Мировом океане осуществляется при помощи использования приближения тонкого слоя. В этом случае можно получить интересные теоретические результаты, имеющие удовлетворительное сопоставление с натурными данными, пренебрегая вертикальной скоростью потока. Иными словами, течение жидкости рассматривается как сдвиговое. Основная трудность при решении задач океанологии, использующих сдвиговые течения, связана с переопределенностью редуцированной системы, состоящей из уравнений Навье-Стокса и уравнений несжимаемости. Пионерским точным решением, описывающим противотечения в жидкости и удовлетворяющим переопределенной системе, является точное решение Экмана [1], полученное в предположении о параллельности вектора угловой скорости и вектора ускорения свободного падения (использование только первого параметра Кориолиса). Вопросы разрешимости и построение нетривиальных точных решений такого класса систем для неоднородных течений жидкости, движущейся в различных силовых полях, обсуждались в работах [2-4].

В статьях [2,3] была предложена математическая модель для описания течений, индуцированных неоднородным распределением скоростей или касательных напряжений на границе атмосферы и океана. Эта модель позволяет описывать течения жидкости в экваториальной зоне и изучить различные механизмы генерации противотечений в жидкости при действии вторичных градиентных течений. Особенность данной модели заключалась в использовании одного параметра Кориолиса, что влечет за собой неточность при описании давления. Для устранения этой неточности и сравнения известных подходов к описанию изотермических сдвиговых течений Мирового океана предлагается использовать модель с учетом двух параметров Кориолиса в описании вектора угловой скорости и учитывать горизонтальные градиенты давления. Построенная модель исследуется посредством точного интегрирования уравнений Навье-Стокса

Литература

- [1] Ekman V. W. On the Influence of the Earth's Rotation on Ocean Currents // Arkiv for matematik, Astronomi, och Fysic. Band 2. 1905. T. 11. S. 1-53.
- [2] Аристов С.Н., Князев Д.В., Полянин А.Д. Точные решения уравнений Навье-Стокса с линейной зависимостью компонент скорости от двух пространственных переменных // ТОХТ, 2009, т. 43, № 5, с. 547-566.
- [3] Аристов С. Н., Просвиряков Е.Ю. Неоднородные течения Куэтта // Nelineinaya Dinamika, 10, 2, 177-182 (2014).
- [4] Gorshkov A.V. Prosviryakov E.Yu. Isobaric Vortex Flow of a Viscous Incompressible Fluid with the Navier Boundary Condition // AIP Conference Proceedings. 2018. Vol. 2053. – 040030. – <https://doi.org/10.1063/1.5084468>

МНОГОУРОВНЕВАЯ УПРУГОВЯЗКОПЛАСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ: ПРИЛОЖЕНИЕ К АНАЛИЗУ ВЛИЯНИЯ ЭНЕРГИИ ДЕФЕКТА УПАКОВКИ НА СЛОЖНОЕ ЦИКЛИЧЕСКОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ

Грибов Д.С., Трусов П.В., Янц А.Ю.

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
gribowdmitrii@yandex.ru*

Разработка моделей для описания пластического деформирования поликристаллических материалов, включающих в свою структуру соотношения и переменные, характеризующие процессы эволюции дефектов и состояние микроструктуры – актуальная задача механики и физики твёрдого тела, так как позволяет строить универсальные модели для классов материалов и воздействий, использоваться в качестве «теоретической экспериментальной машины сложного нагружения» [1].

При сложном циклическом деформировании материалов с низкой энергией дефекта упаковки (ЭДУ) отмечается проявление эффекта дополнительного циклического упрочнения – существенного повышения предела текучести материала после непропорционального циклического деформирования, не наблюдаемого для исследуемых материалов при экспериментах на простое деформирование [2,3].

Была выдвинута гипотеза о физическом механизме данного эффекта: упрочнении за счет образования барьеров при взаимодействиях расщеплённых дислокаций, интенсифицируемых множественным скольжением, инициируемым сложным характером нагружения. Основная цель исследования – разработка, реализация и исследование трехуровневой упруговязкопластической модели для явного описания эволюции дефектов кристаллической решетки материалов с разной ЭДУ. При построении конститутивной модели особое внимание уделено разработке подмодели мезоуровня-2, ориентированной на описание эволюции плотностей дислокаций и барьеров различной природы на системах скольжения (СС). Эволюционные уравнения для плотностей дислокаций на СС описывают зарождение дислокаций за счет работы источников Франка–Рида, аннигиляцию дислокаций разных знаков на близких СС, взаимодействие расщепленных дислокаций пересекающихся СС с образованием барьеров различного типа. Закон упрочнения в модели учитывает изменение плотности дислокаций и барьеров в ходе пластического деформирования. Построена общая структура модели, описаны связи между уровнями – параметрами подмоделей разных уровней. Разработан алгоритм и программа реализации модели, проанализирована эволюция плотностей дислокаций на системах скольжения, получены характеристики интенсивности упрочнения и образования барьеров на расщеплённых дислокациях в зависимости от вида нагружения, проведён ряд численных экспериментов.

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

Литература

- [1] Трусов П. В., Швейкин А. И. Многоуровневые модели моно- и поликристаллических материалов: теория, алгоритмы, примеры применения. – Новосибирск: Издательство СО РАН, 2019. — 605 с. DOI: 10.15372/MULTILEVEL2019TPV.
- [2] Benallal A., Marquis D. Constitutive equations for nonproportional cyclic elastoviscoplasticity // J. Engineering Materials and Technology. – 1987. – Vol.109, No.4. – P.326-336. DOI: 10.1115/1.3225985.
- [3] Doquet V. Twinning and multiaxial cyclic plasticity of a low stacking-fault-energy f.c.c. alloy // Acta Metallurgica et Materialia. – 1993. – Vol. 41. – Iss. 8. – P.2451-2459. DOI: 10.1016/0956-7151(93)90325-M.

МЕХАНИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ЭКСТРАКЦИИ ВОДОРОДА ИЗ ЕГО СОЕДИНЕНИЙ С ТИТАНОМ

Григорьева П.М.^{1,2}, Яковлев Ю.А.^{1,2}, Полянский В.А.²

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

²Институт Проблем Машиноведения Российской Академии Наук, Санкт-Петербург
polina.grigoreva239@gmail.com, yura.yakovlev@gmail.com, polyanskiy@spbstu.ru

В исследовании были проведены эксперименты по извлечению водорода из аморфных гидридов титана методом вакуумной горячей экстракции. На основании полученных экспериментальных данных были построены спектры термодесорбции при ступенчатом изменении температуры экстракции. Для того, чтобы описать аналитически полученные экспериментальные зависимости, мы применили подход Киссинджера [1] для разложения твердого тела на газовую и твердую составляющие, который предлагает описывать этот процесс как химическую реакцию первого порядка. Для расчета энергии активации разложения гидридов титана были построены зависимости Аррениуса [2].

Из построенных зависимостей было получено, что для одних и тех же температурных диапазонов энергии связи водорода, определенные для каждого из образцов, различаются в несколько раз, а энергия активации уменьшается с ростом температуры. В то же время для диапазона температур 350-370 С энергия активации стремится к бесконечности. Этот эффект обычно объясняют влиянием ловушек, соответствующих химическому составу и микроструктуре материала. Однако, поскольку мы изучаем различные образцы одного и того же химического соединения, и полученные энергии активации находятся в диапазоне, который не соответствует значению энергий химических связей, мы подвергаем сомнению это объяснение и предполагаем, что гидриды титана не существуют как химическое соединение, а представляют собой смесь металла и диффузионного водорода. Эта теория подтверждается результатами работы [3], в которой показано, что диффузия водорода из образцов, в которых водород распределен таким образом, что образует пограничный слой, дает два пика в спектрах термодесорбции.

В качестве альтернативного подхода к описанию зависимостей экстракционного потока от времени и температуры, мы предлагаем рассматривать экстракцию водорода как истечение газа через узкие каналы, образованные межзеренным пространством в металле.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта 20-08-01100 А, 18-08-00201 А, проекта 19-38-90298

Литература

- [1] Kissinger H. E. Reaction kinetics in differential thermal analysis //Analytical chemistry. – 1957. – Т. 29. – №. 11. – С. 1702-1706.
- [2] Arrhenius S. Über die Dissociationswärme und den Einfluss der Temperatur auf den Dissociationsgrad der Elektrolyte //Zeitschrift für physikalische Chemie. – 1889. – Т. 4. – №. 1. – С. 96-116.
- [3] V. Poyanskiy, A. Belyaev, A. Chevrychkina, E. Varshavchik, Impact of skin effect of hydrogen charging on Choo-Lee diagramm for cylindrical samples (в печати)

ВЛИЯНИЕ ИСТОРИИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ НА ПРОЦЕСС РАЗРУШЕНИЯ СОЛЯНОГО МАССИВА

Губанова Е.А.

«ГИ УрО РАН»

Elena.T@mi-perm.ru

В процессе деформирования массива соляных пород под воздействием очистной выемки формируется мульда сдвижения земной поверхности. Чем круче ее краевая часть, тем более высокий уровень техногенной нагрузки воздействует на подработанный массив, предопределяя опасность образования субвертикальных трещин в слагающих его пластах. Величина интенсивности техногенной нагрузки определяется проявлением изменчивости как горно-геологических, так и горно-технических факторов, включая различное время очистной выемки. Очевидно, что разрушение соляных пород может иметь место и на более ранней стадии деформирования массива, в частности, вследствие снижения несущей способности междукammerных целиков продуктивных пластов. Устойчивость целиков определяет напряженно-деформированное состояние массива горных пород и распределение деформаций в мульде сдвижения. В случае их ускоренного разрушения на земной поверхности формируется мульда сдвижения с «крутой» краевой частью, что свидетельствует о высоком уровне техногенной нагрузки на соляной массив.

В связи с этим для получения достоверной текущей и в дальнейшем адекватной прогнозной оценки геомеханической ситуации необходим ретроспективный анализ процесса деформирования соляного массива, как один из эффективных способов определить локализацию областей техногенного разрушения, которые могли образоваться в пределах исследуемой площади до настоящего момента времени. Увеличение глубины горных работ, повышение извлечения за счет увеличения пролета очистных камер и уменьшения ширины междукammerных целиков зачастую приводят к серьезным негативным последствиям. Проведение ретровременного геомеханического анализа дает возможность минимизировать риски аварийных ситуаций и, соответственно, решить вопрос о необходимости применения тех или иных дополнительных мер охраны водозащитной толщи (ВЗТ) для безопасной эксплуатации рудника. Рассмотрен пример снижения техногенной нагрузки на подработанный массив за счет формирования зоны смягчения как одной из регламентируемых мер охраны ВЗТ.

О ЕСТЕСТВЕННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ В ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛАХ

Гулин В.В.^{1,2}, Никитин А.Д.^{1,2}

¹Институт автоматизации проектирования РАН, Москва

²Московский авиационный институт (НИУ), Москва

kornet104@gmail.com, nikitin_alex@bk.ru

Причина усталостного разрушения в условиях многопараметрического воздействия тесно связана с неоднородностью структуры материала. В настоящее время для прогнозирования ресурса конструкций наука о прочности столкнулась с необходимостью моделирования физических процессов, определяющих динамику свойств материала. Значимый вклад в актуальность составило открытие явления сверхмногоциклового усталости, при котором зарождение и начальное раскрытие трещины, приводящей к отказу конструкции, происходит под поверхностью материала. При попытке смоделировать поведение материала под действием механической нагрузки возникла необходимость рассматривать несколько моделей (масштабных уровней). А одним из главных требований, предъявляемых к этим моделям, является их связанность – возможность перенести получаемые результаты на другой масштабный уровень.

Для обеспечения этой связи необходимо решить задачу по определению параметров механических усилий на мезоструктурном уровне, которые возникают под действием макроскопической нагрузки.

В текущей работе предложена модель поликристаллического тела (Рис. 1), основанная на аппарате механике сплошной упругой среды. На основе результатов моделирования введено понятие *естественной концентрации напряжений*, которая является инвариантной по отношению к конкретному напряжённно-деформированному состоянию и определяется только влиянием таких факторов как: анизотропия упругих констант материала, геометрия зёрен и величина их взаимной разориентировки.

Предложен подход, позволяющий связать результаты традиционного прочностного анализа с поликристаллическим масштабом. Получены значения естественной концентрации напряжений в поликристалле α -Fe при комнатной температуре.

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда проект № 19-19-00705.

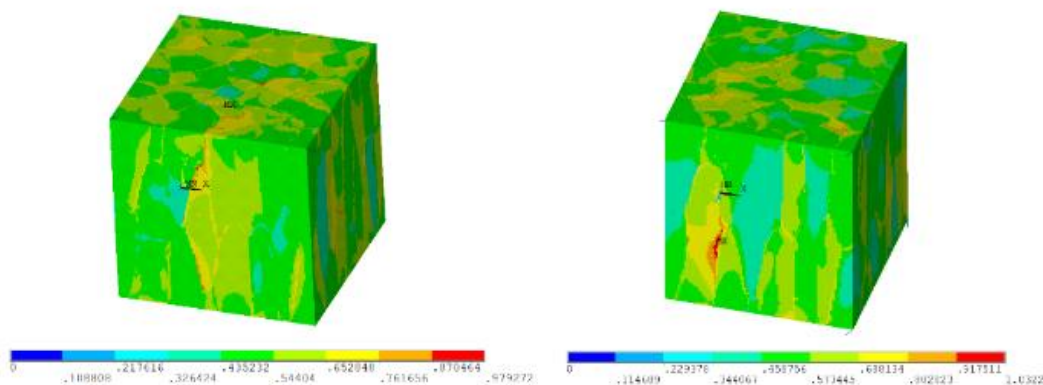


Рис. 1 — Эпюры касательных напряжений в поликристалле при одноосном растяжении

ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕНЗОРЕЗИСТИВНЫХ ДАТЧИКОВ ДЕФОРМАЦИИ В УСЛОВИЯХ АГРЕССИВНЫХ СРЕД

Гусев Г.Н.¹, Глот И.О.¹, Епин В.В.¹, Цветков Р.В.¹, Шардаков И.Н.¹, Шестаков А.П.¹

¹Пермский федеральный исследовательский центр УрО РАН, Пермь

gusev.g@icmm.ru, glot@icmm.ru, epin.v@icmm.ru, flower@icmm.ru, shardakov@icmm.ru,
shap@icmm.ru

При строительстве и эксплуатации сложных и ответственных инженерных сооружений наиболее важным фактором является обеспечение их механической безопасности. Тем актуальнее данная задача ставится перед строительными объектами, которые строятся и эксплуатируются в условиях сильно агрессивных сред, и к которым, в частности, относятся сооружения на горно обогатительных комбинатах калийной промышленности. Строительство в уникальных инженерно-геологических условиях, наличие постоянного воздействия сильно агрессивных сред на несущие строительные конструкции объектов в дополнение к условиям эксплуатации, которые включают в себя значительные статические и динамические нагрузки, являются теми факторами, которые могут привести к разрушению конструкции сооружения и, как следствие, к человеческим жертвам. В связи с этим, актуальными задачами строительства и научно-технического сопровождения сложных инженерных сооружений, в частности, надшахтных зданий скиповых стволов калийных комбинатов¹, а также транспортных галерей, становятся оценка и мониторинг напряженного-деформированного состояния, а также постоянная диагностика несущих конструкций сооружения на всех этапах жизнедеятельности.

Данная работа посвящена анализу особенностей проектирования, монтажа и использования тензорезистивных² датчиков деформации, как части комплексной автоматизированной системы деформационного мониторинга сложной строительной конструкции, эксплуатирующейся в сильно агрессивной среде - надшахтного здания скипового ствола горно обогатительного комбината Петриковского месторождения калийных солей в республике Беларусь. В работе описан опыт изготовления и применения датчиков деформации различных конфигураций и отличных по способу монтажа на стальные конструкции. Приведены результаты измерений. Дана оценка работоспособности и надежности решений. Описаны особенности использования в сложных условиях монтажа и эксплуатации.

Литература

- [1] Условия образования месторождений калийных солей: Сб. Науч. Тр. - Новосибирск: Наука. Сиб. Отд-ние, 1990. - 192 с.
- [2] Клокова Н.П. Тензорезисторы: Теория, методики расчета, разработки. - М.: Машиностроение, 1990. - 224 с.: ил.

ОРГАНИЗАЦИЯ ВИБРАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА НА ИНЖЕНЕРНОЙ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИИ

Гусев Г.Н., Глот И.О., Епин В.В., Цветков Р.В., Шардаков И.Н., Шестаков А.П.

Институт механики сплошных сред, Пермь

shap@icmm.ru

Крупномасштабные металлические конструкции в условиях агрессивной коррозионной среды подвержены разрушению. В начале эксплуатации конструкции процесс коррозионного разрушения происходит очень медленно. Его сдерживает целое лакокрасочное покрытие. В процессе эксплуатации на некоторых участках конструкции происходит нарушение защитного покрытия и процесс коррозии существенно ускоряется. Места образования коррозии могут быть обусловлены: неоднородностью толщины защитного покрытия и качества подготовки металлического основания, наличием в конструкции мест с высокой концентрацией агрессивного вещества. Коррозия металла уменьшает сечение элементов конструкции а также разрушает её болтовые и сварные соединения. При отсутствии контроля, это может привести к частичному или полному разрушению конструкции. Одним из способов обеспечения безопасной эксплуатации конструкции является организация вибрационного мониторинга [1]. В представленной работе, организация системы мониторинга показана на примере одной из инженерных конструкции горнодобывающей отрасли. Такие конструкции обладают рядом особенностей. В зависимости от назначения, в них могут функционировать различные механизмы и происходить различные технологические процессы. Рассматриваемая конструкция может находиться в следующих состояниях: свободное - технологические устройства не функционируют; подъем руды; высыпание руды в накопитель; работа конвейера. Динамический отклик конструкции на эти режимы имеет различный частотный состав и различное распределение амплитудных характеристик сигнала в разных точках конструкции. Поэтому, для контроля состояния конструкции, необходимо выделять эти режимы из общего цикла работы и сопоставлять соответствующие динамические характеристики. При анализе виброграмм необходимо разделять параметры вибраций соответствующие работе механизмов и параметров отвечающих за механическое состояние конструкции.

Для организации мониторинга конструкции создан программно аппаратный комплекс позволяющий синхронно записывать виброграммы с двух типов акселерометров низкочастотные (частотный диапазон 0,5 до 400 Гц) и высокочастотные однокомпонентные (частотный диапазон 0,5 до 10000 Гц). Сбор данных осуществляется непрерывно с помощью двух плат аналого-цифрового преобразования. Получаемые данные сохраняются в кольцевой буфер. Одновременно с записью происходит первичная обработка данных на предмет обнаружения необходимого режима функционирования конструкции. В случае обнаружения необходимого режима происходит запись данных в архив.

Разработанный комплекс позволяет непрерывно отслеживать за вибрационными характеристиками конструкции в процессе ее эксплуатации. На основе полученных виброграмм можно исследовать эволюцию собственных частот конструкции, пространственное распределение амплитудно-частотных характеристик при установившихся колебаниях конструкции и распространение волновых процессов по конструкции от переходных режимов ее функционирования.

Литература

[1] Shardakov I., Shestakov A., Tsvetkov R., Glot I. Investigation of the effect of cracks on the vibration processes in reinforced concrete structures // *Frattura ed Integrità Strutturale* – 2018. – № 46. – 383-390.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МОДИФИКАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ БАЗАЛЬТОВОГО ВОЛОКНА ПРИ ПОЛУЧЕНИИ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ СВЕРХВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНОГО ПОЛИЭТИЛЕНА

Данилова С.Н.¹, Охлопкова А.А.¹, Ярусова С.Б.², Гордиенко П.С.²

¹*Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, Якутск*

²*Институт химии ДВО РАН, Владивосток*

dsn.sakhayana@mail.ru

Свойства волокнистых композиционных материалов в основном зависят от адгезионной прочности между волокном и полимерной матрицей, так как под воздействием внешних сил происходит передача нагрузки от матрицы к волокну. Поэтому для улучшения прочности сцепления на межфазной границе и ее стабильности при эксплуатации перед изготовлением композитов волокна, как правило, модифицируют, в том числе, механической и химической обработкой [1]. В качестве полимерной матрицы был выбран сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ) фирмы Celanese (GUR-4130, Китай), который обладает низким коэффициентом трения, повышенной прочностью, химической стойкостью, что способствует его использованию для изготовления износостойких технических изделий [2]. В качестве наполнителя использовали природное базальтовое волокно (БВ) (ОАО «Сахабазальт», Якутск).

Были исследованы различные способы модификации поверхности БВ: обработка аппретом и поверхностно активным веществом (ПАВ). В качестве аппрета использовали водный раствор γ -аминопропилтриэтоксисилана (А 1100), подкисленный уксусной кислотой, а в качестве ПАВ – цетилтриметиламмоний бромид (ЦТАБ) с добавлением мочевины. В работе [3] было установлено, что при изучении влияния pH, добавок мочевины и бромида калия в растворы ЦТАБ, было установлено, что добавление мочевины способствует усилению адсорбционной способности ЦТАБ.

Композиты получали методом горячего прессования при температуре 175 °С и давлении 10 МПа. Концентрации волокна в СВМПЭ составляла 1, 2, 5, 10 и 20 мас.%. Были проведены физико-механические и триботехнические исследования по стандартным методикам. Анализ результатов показал, что обработка поверхности БВ раствором ЦТАБ приводит к увеличению модуля упругости на 67 % относительно исходного СВМПЭ, а обработка силаном А 1100 – к повышению износостойкости.

Структурные исследования проведены методами ИК-спектроскопии и сканирующей электронной микроскопии. Обнаружено, что предварительная обработка поверхности БВ способствует смачиванию поверхности наполнителя полимерной матрицей, что подтверждается структурными исследованиями и повышением механических характеристик.

Работа выполнена при финансовой поддержке МНУВО РФ НИР № FSRG-2020-0017

Литература

- [1] Баженов Л.С. Механика и технология композиционных материалов. – Долгопрудный: «Интеллект», 2014. – с. 328.
- [2] Данилова С. Н. и др. Исследование триботехнических свойств сверхвысокомолекулярного полиэтилена, наполненного серой, дифенилгуанидином и 2-меркаптобензтиазолом // Вопросы материаловедения. – 2019. – №. 3. – С. 91-98.
- [3] Соболева О. А. Влияние pH, добавок карбамида и бромида натрия на гистерезис смачивания в системе водный раствор-цетилтриметиламмоний бромид-стекло // Вестник Московского университета. Серия 2. Химия. – 1999. – Т. 40. – №. 4.

ОЦЕНКА ДЕФОРМАЦИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ СТОЛБОВОЙ СИСТЕМЕ ОТРАБОТКИ

Девятков С.Ю.

«ГИ УрО РАН», Пермь

SD@mi-perm.ru

Очистная выемка калийных пластов столбовой системой отработки сопровождается деформированием подработанного горного массива и разрушением пород кровли и почвы выработок в выемочном столбе лавы. При этом одним из возможных последствий отработки длинными очистными забоями является внезапное обрушения пород кровли, что создает угрозу жизни горнорабочих, приводит к внеплановым остановкам горных работ, снижая эффективность добычи полезного ископаемого. Также в ходе подвигания лавы происходят оседания на земной поверхности. В этой связи актуальной является задача изучения деформаций земной поверхности и разработка методов их прогноза при подземной отработке калийных пластов.

Для оценки напряженно-деформированного состояния породного массива в процессе отработки лавы было выполнено геомеханическое моделирование отработки калийных пластов в условиях их слоевой выемки. Используемая модель учитывала основные особенности строения подработанного массива, а также обрушение пород кровли отработываемого пласта с заполнением ими выработанного пространства лавы и раскрытие глинистых контактов в соляной толще в процессе ведения горных работ.

Результаты математического моделирования показали, что в почве формируется область локализации пластических деформаций, связанная с образованием трещин отрыва. Одновременно с этим происходит обрушение пород кровли. По мере увеличения протяженности выработанного пространства наблюдается расширение области трещиноватости в почве и увеличение объема обрушенных пород кровли. При размерах выработанного пространства более 20 м происходит стабилизация области трещиноватости в почве по глубине и в дальнейшем фиксируется ее увеличение в основном по латерали. Также происходит заполнение выработанного пространства обрушенными породами, что предотвращает дальнейшее развитие зон трещиноватости в пластах кровли.

Как показывают выполненные расчеты на характер деформирования массива определяющее влияние оказывают свойства обрушенных из кровли пород, заполняющих выработанное пространство лавы. При математическом моделировании принимается, что они на порядок ниже соответствующих показателей породного массива. В зависимости от принятых в расчете деформационных свойств обрушенных пород, существенно изменяется характер мульды сдвижения земной поверхности и величина максимальных оседаний. При этом, большее снижение свойств относительно вмещающих пород вызывает большие оседание земной поверхности.

Сравнительный анализ расчетных и фактических оседаний показывает, что для точного описания процесса деформирования массива разупрочнение обрушенных пород должно происходить не мгновенно до конечных значений деформационных свойств, а изменяться со временем. Таким образом, с помощью вариации свойств обрушенных пород можно обеспечить приемлемое соответствие между расчетными оседаниями и натурными наблюдениями за сдвижением земной поверхности.

МОДЕЛИ КОНДЕНСАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В ПОРИСТЫХ СРЕДАХ

Демин В.А.¹, Меньшиков А.И.¹, Марышев Б.С.^{1,2}

¹*Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь*

²*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

demin@psu.ru

Количественное описание массопереноса веществ и их дальнейшее структурирование в пористых средах является одной из наиболее сложных задач материаловедения. В настоящее время материалы, производимые по такого рода технологиям, называют композитными. В качестве основного требования при пропитке выступает физико-химическая совместимость вводимых компонентов с материалом пористой среды. В дополнение процесс насыщения пор определенными компонентами затрудняется наличием сложной пространственной структуры каналов, поэтому при описании массопереноса в пористых средах приходится учитывать очень большое число разнообразных механических, теплофизических и химических эффектов. При пропитке жидкостями это могут быть капиллярные силы, которые возникают в тонких поровых отверстиях при искривлении межфазной поверхности в процессе заполнения пустот. В случае многокомпонентных сред в роли осложняющих факторов могут выступать адсорбция и десорбция примеси на твердом скелете среды. В этом случае частицы взаимодействуют со стенками пор, что служит причиной замедления процессов массопереноса [1]. А именно, происходит закупоривание каналов, которое подразумевает, что капиллярные и сорбционные явления приводят к частичному или полному закрытию пор, и это напрямую отражается на транспортных свойствах среды, таких как проницаемость и пористость. Еще один интересный механизм закупорки – так называемая сводовая кольматация. Она представляет собой эффект сгуживания нескольких частиц в поровых сужениях. Иными словами, несмотря на то, что каждая частица имеет размер меньше чем поровое отверстие в самом узком месте, вместе они скучиваются в горловине поры по причине одновременного прибытия нескольких частиц в одну точку и в совокупности не дают друг другу пройти вместе с потоком несущей жидкости. В результате тоже происходит закупорка отверстий. В данной работе рассматривается физико-механическая модель, предназначенная для обобщенного теоретического описания труднореализуемого на практике пароконденсатного механизма пропитки. Развиваемый подход претендует на математическую непротиворечивость и полноту, в соответствии с которым возможно полноценное моделирование указанного процесса от самого начала до его финальной стадии, характеризующейся полной закупоркой пор.

Литература

[1] Демин В.А., Марышев Б.С., Меньшиков А.И. Движение концентрационного фронта и адсорбция примеси при прокачке наножидкости через пористую среду // Вычислительная механика сплошных сред, Т. 13, № 1, 2020. с. 83-97.

ОТЖИГ И НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭФФЕКТЫ ПРИ ДИФФУЗИОННОМ ФОРМИРОВАНИИ ВОЛНОВОДОВ В КРИСТАЛЛЕ НИОБАТА ЛИТИЯ

Демин В.А., Петухов М.И., Пономарев Р.С., Топова А.В.

*Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь
demin@psu.ru*

Представлены результаты прямого численного моделирования процесса диффузионного насыщения протонами монокристалла ниобата лития при создании системы двух канальных волноводов. Расчеты проведены с учетом наличия в технологии производства нескольких стадий, которые включают сначала введение в материал протонов путем обработки рабочей поверхности расплавом бензойной кислоты, а затем процедуру отжига образца. Моделирование проводилось с помощью авторского вычислительного кода методом конечных разностей в соответствии с явной схемой по времени. Компьютерный код был написан на языке программирования Fortran-90. Проанализирован вклад нелинейной диффузии [1] в процесс формирования волноводов. Показано, что существенное влияние на образование ступенчатой границы волновода оказывает процедура отжига монокристалла. Ранее стадия отжига количественно не исследовалась, и на ее важную роль при формировании как можно более резкой границы между волноводом и материнской подложкой до сих пор не обращалось должного внимания. На основании экспериментальных данных о наличии на поверхности монокристалла ниобата лития переходного поверхностного слоя с ярко выраженными регулярными мезоструктурными направлениями построена модель анизотропной диффузии в твердом теле. Используя выведенные уравнения, проведены расчеты формы волновода в поперечном сечении для разных значений угла поворота главных осей по отношению к линиям отреза кристалла. Показано, что в области разветвления волновода, когда на этапе протонирования возможно наложение диффузионных потоков друг на друга, анизотропия диффузии может приводить к нарушению симметрии волноводов, что может негативно сказаться на их оптических свойствах.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 20-42-596001 «Изучение процессов формирования протонообменных волноводов интегрально-оптических фазовых модуляторов на основе отечественного ниобата лития для создания навигационного оборудования широкого спектра применения».

Литература

[1] Vohra S.T., Mickelson A.R., Asher S.E. Diffusion characteristics and waveguiding properties of proton exchanged and annealed LiNbO₃ channel waveguides // J. of Applied Physics (AIP), 1989, Vol. 66, No. 11, pp. 5161-5174; doi: 10.1063/1.343751.

МЕХАНИЗМ ОБРАЗОВАНИЯ АЗИМУТАЛЬНЫХ ВИХРЕЙ ПРИ НАТЕКАНИИ РАДИАЛЬНО-СИММЕТРИЧНОГО ТЕЧЕНИЯ НА ПЛЕНКУ НЕПОДВИЖНОГО СУРФАКТАНТА

Демин В.А.¹, Петухов М.И.¹, Шмыров А.В.², Шмырова А.И.²

¹*Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь*

²*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

geniusmaxp@yandex.ru

Проведено прямое численное моделирование динамики стационарного радиального термокапиллярного течения от точечного источника тепла, расположенного на свободной поверхности жидкости в цилиндрической кювете. Осложняющим фактором является частичное покрытие поверхности пленкой неподвижного нерастворимого сурфактанта, вытесненного к границе полости. Поставленная задача качественным образом повторяет эксперимент [1] и является логическим продолжением физико-математической модели, согласно которой рассматривалось аналогичное натекание двумерного течения на пленку сурфактанта в ячейке Хеле – Шоу [2,3]. Расчеты выполнены в рамках уравнений межфазной гидродинамики с использованием математического пакета Comsol Multiphysics на вычислительном кластере “Тритон” ИМСС УрО РАН. Показано, что после натекания радиального течения на пленку развивается неустойчивость, приводящая к формированию в области под пленкой объемных стационарных вихрей, плоскость вращения которых ориентирована под некоторым углом к вертикали. Изучена зависимость угла наклона плоскости вращения этих вихрей от скорости радиального течения, которая регулировалась путем изменения интенсивности нагрева поверхности. Из данной зависимости следует, что увеличение скорости натекания приводит к постепенному увеличению наклона вихрей, т.е. преобразованию полоидального конвективного движения в азимутальную плоскость. Также изучено влияние площади закрытия поверхности сурфактантом на формирование указанных вихрей.

Работа поддержана РФФ: грант 19-71-00097

Литература

- [1] 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, 213, 02074, 2019.
- [2] Shmyrov A.V., Mizev A.I., Demin V.A., Petukhov M.I., Bratsun D.A. Phase transitions on partially contaminated surface under the influence of thermocapillary flow – J. Fluid Mech, Vol. 877, pp. 495-533, 2019.
- [3] Demin V.A., Petukhov M.I., Shmyrov A.V., Shmyrova A.I. Nonlinear dynamics of the film of an insoluble surfactant during the relaxation to equilibrium – Interfacial Phenomena and Heat Transfer, 8(3), pp. 261-271, 2020.

ДЕФОРМАЦИЯ КАПЛИ В УСЛОВИЯХ ГИДРОНЕВЕСОМОСТИ

Денисова М.О., Костарев К.Г.

*Институт механики сплошных сред ПФИЦ УрО РАН, Пермь
mod@icmm.ru, kostarev@icmm.ru*

Одной из классических задач гидродинамики является задача о деформации капли, находящейся в условиях гидроневесомости, под действием той или иной внешней силы. При этом считается, что, если капля исходно имеет размер равный или меньше капиллярного диаметра, то она принимает форму правильной сферы, независимо от величины градиента плотности в окружающей среде, степени взаимной растворимости жидкостей капли и среды, возможности возникновения конвекции Марангони, времени с момента создания системы жидкостей. Для выяснения влияния этих неучтенных факторов, и также начальной деформации капли экспериментально исследована эволюция формы капель большого диаметра в растворе, стратифицированном по плотности.

Поведение капли изучено для случая, когда она под действием силы тяжести принимает вид сфероида, сплющенного по вертикали. С помощью интерферометра визуализировано распределение концентрации раствора вблизи капли. Определена зависимость отношения вертикального и горизонтального диаметров капли от времени и среднего градиента концентрации в окружающей среде. Прослежено изменение этого отношения для капель различных начальных размеров для двух систем жидкостей, в одной из которых массообмен сопровождается развитием конвекции Марангони, а в другой – нет. Продемонстрировано существенное различие в поведении полученных зависимостей, которое и составляет вклад капиллярного движения в деформацию капли.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта РФФИ № 19-41-590009.

ДИФФУЗИЯ ПАВ ИЗ МЕДЛЕННО ВСПЛЫВАЮЩЕЙ КАПЛИ

Денисова М.О., Костарев К.Г.

*Институт механики сплошных сред ПФИЦ УрО РАН, Пермь
mod@icmm.ru, kostarev@icmm.ru*

Экспериментально изучена начальная стадия процесса экстракции поверхностно-активного вещества (ПАВ) из нерастворимой капли, медленно всплывающей в неподвижной жидкости. Капля зажата в узком вертикальном зазоре, что заставляет ее принимать форму короткого горизонтального цилиндра со свободной боковой поверхностью и плоскими торцами. Последнее обстоятельство позволяет с помощью интерферометра визуализировать структуру возникающих течений и полей концентрации в капле и окружающей среде и проследить их эволюцию. Для выявления специфики наблюдаемых течений и распределений концентрации также исследован случай диффузии ПАВ из неподвижной капли.

Сопоставление выявило существенное изменение структуры поля концентрации – увлечение границы всплывающей капли набегающим потоком окружающей жидкости привело к исчезновению неустойчивой стратификации по плотности вблизи верхнего полюса капли, возникающей вследствие диффузии ПАВ. Увеличение скорости движения приграничных слоев также вызвало смещение зоны смеси с низким содержанием ПАВ с нижнего полюса капли в ее среднюю часть. Наконец, движение капли невозможно без появления прослойки окружающей жидкости между торцами капли и стенками зазора. Возникновение такой прослойки значительно увеличивает площадь поверхности капли, способной к диффузии ПАВ. В частности, измерения показали, что интенсивность потока ПАВ из движущейся капли возросла в два раза по сравнению со случаем неподвижной капли.

Использование капель с различной начальной концентрацией ПАВ позволило также уточнить вклад конвекции Марангони в интенсивность процесса растворения ПАВ из капли.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта РФФИ № 19-41-590009.

ТЕРМОДИНАМИКА ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ ГЕЛЕЙ В ПОЛЕ МАССОВЫХ СИЛ

Денисюк Е.Я.

¹ *Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*
denisyuk@icmm.ru

Полимерные гели – это сетчатые полимеры, содержащие в своем составе жидкость (растворитель). Наличие растворенной в полимере жидкости оказывает существенное влияние на его упругие свойства и деформационное поведение [1, 2]. В частности, внешние неоднородные механические нагрузки способны порождать миграцию растворителя и его перераспределение внутри материала.

В рамках вариационного подхода сформулированы краевые задачи, описывающие состояние термодинамического равновесия геля, находящегося в поле массовых сил и учитывающие условия его массообмена с внешней средой. Полимерный гель рассматривается как система, представляющая собой высокоэластичный материал и растворенную в нем жидкость (растворитель). Состояние термодинамического равновесия геля определяется из решения задачи минимизации функционала свободной энергии системы «полимер – растворитель» и потенциальной энергии приложенных сил. Уравнения Эйлера – Лагранжа выведены с помощью метода лагранжевых множителей. Соответствующая краевая задача сформулирована в терминах механического тензора напряжений и химического потенциала растворителя.

Показано, что под действием массовых сил в геле возникает неоднородное равновесное распределение растворителя. При определенных условиях, под действием приложенных нагрузок, часть растворителя может выделяться из геля во внешнюю среду. Предложенная теория позволяет установить количество выделившейся жидкости, определить распределение в полимере оставшейся жидкости и рассчитать напряженно-деформированное состояние геля при конечных деформациях материала. Общая теория проиллюстрирована на примере описания деформационного поведения плоского образца полимерного геля, находящегося в поле гравитационных сил.

Литература

- [1] Денисюк Е.Я. Механика и термодинамика высокоэластичных материалов, насыщенных жидкостью // Известия РАН. Механика твердого тела. – 2010, № 1.– С. 118–138.
- [2] Денисюк Е.Я. Механика и термодинамика деформирования насыщенных жидкостью упругих материалов в приближении малых деформаций // Известия РАН. Механика твердого тела. – 2018, №2.– С. 54–69.

ВЛИЯНИЕ ДИСКРЕТНЫХ БРИЗЕРОВ НА МАКРОСКОПИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НЕЛИНЕЙНЫХ ЦЕПОЧЕК

Дмитриев С.В.^{1,2}, Бачурина О.В.³, Семенов А.С.⁴, Корзникова Е.А.^{1,2}, Наймарк О.Б.⁵

¹Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, Уфа

²Институт физики молекул и кристаллов, УФИЦ РАН, Уфа

³Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа

⁴Политехнический институт (филиал) СВФУ, Мирный

⁵Институт механики сплошных сред Уральского отделения РАН, Пермь

dmitriev.sergey.v@gmail.com, obachurina@yahoo.com, sash-alex@yandex.ru,
elena.a.korznikova@gmail.com, naimark@icmm.ru

Исследовано влияние дискретных бризеров (ДБ) на макроскопические свойства цепочки Ферми-Паста-Улама с симметричным и асимметричным потенциалами [1], а также цепочки с гармоническим межчастичным взаимодействием и ангармоническим локальным потенциалом [2]. Отношение полной энергии к кинетической (относящейся к удельной теплоемкости), напряжение (связанное с тепловым расширением) и модуль Юнга отслеживаются во время развития модуляционной неустойчивости делокализованных колебательных мод, имеющих частоты вне фононного спектра. Модуляционная неустойчивость таких мод приводит к формированию хаотических ДБ с последующим переходом к тепловому равновесию, когда ДБ исчезают, излучая энергию в виде фононов малой амплитуды. Установлено, что ДБ снижают (повышают) теплоемкость для цепочек с жестким (мягким) типом нелинейности. ДБ увеличивают тепловое расширение в случае асимметричного потенциала, и, как и ожидалось, тепловое расширение не наблюдается в случае симметричного потенциала. Модуль Юнга в присутствии ДБ меньше, чем в тепловом равновесии для симметричного потенциала и для потенциала с малой асимметрией, но больше, чем в тепловом равновесии для потенциала с большей асимметрией.

При изучении аномальной теплопроводности модельных нелинейных цепочек было установлено, что сохранение количества движения является ключевым ингредиентом, вызывающим аномальный перенос тепла, в то время как системы, не сохраняющие импульс, обычно поддерживают нормальный перенос тепла, описываемый законом Фурье. Однако, если несохранение количества движения обуславливает теплопроводность, подчиняющуюся закону Фурье, то каков микроскопическим механизмом обеспечивающий нормальный перенос тепла? Рассматривая цепочку ϕ^4 , не сохраняющую импульс, мы показали, что за это могут быть ответственны ДБ с частотами выше фононного спектра [3].

Полученные результаты могут быть полезны для постановки экспериментов по идентификации ДБ в кристаллах путем измерения их макроскопических свойств.

Литература

- [1] Korznikova E.A., Morkina A.Y., Singh M., Krivtsov A.M., Kuzkin V.A., Gani V.A., Bebikhov Yu.V., Dmitriev S.V. Effect of discrete breathers on macroscopic properties of the Fermi-Pasta-Ulam chain. Eur. Phys. J. B **93** (2020) 123.
- [2] Singh M., Morkina A.Y., Korznikova E.A., Dubinko V.I., Terentiev D.A., Xiong D., Naimark O.B., Gani V.A., Dmitriev S.V. Effect of discrete breathers on the specific heat of a nonlinear chain. J. Nonlinear Sci. 31 (2021) 12.
- [3] Xiong D., Saadatmand D., Dmitriev S.V. Crossover from ballistic to normal heat transport in the ϕ^4 lattice: If nonconservation of momentum is the reason, what is the mechanism? Phys. Rev. E, 96 (2017) 042109.

ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОГО КАНАЛА НА ГЕНЕРАЦИЮ ПРОДОЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СИЛЫ

Долгих В.М., Павлинов А.М.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

dolgikh@org.ru, pavlinov@org.ru

В представленной работе приведены результаты экспериментального исследования модели МГД – насоса с прямым плоским каналом, в котором размещены наклонные перегородки, не соединяющиеся с узкими стенками канала и смещённые к одной из узких стенок, а снаружи канал охватывают П – образные ферромагнитные сердечники, расположенные вдоль канала в шахматном порядке [1]. Давление в канале насоса создают электромагнитные силы, возникающие в расплавленном металле в канале в области расположения полюсов сердечников в результате взаимодействия продольного электрического тока канала с собственным магнитным полем. Материалы экспериментального исследования моделей насоса опубликованы в работах [2, 3, 4].

Целью исследований является определение оптимальных параметров МГД – насоса, позволяющих достичь максимальных напорно-расходных P-Q – характеристик насоса.

Испытания модели насоса проведены на галлиевом контуре ИМСС УрО РАН. Получены P-Q –характеристики моделей для разных значений длины перегородок и их положения относительно узких стенок канала при токах $I = 1000\text{A}$, 2000A и 3000A и неизменном угле наклона перегородок к продольной оси канала 30° .

МГД – насос имеет простую конструкцию, не дорог в изготовлении и предназначен для перекачивания легкоплавких металлов и сплавов. Перекачиваемый металл легко заполняет канал и по окончании процесса перекачивания без затруднений сливается из канала. Наиболее привлекательным является использование насоса в погружном варианте.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 20-48-596015_p_НОЦ_Пермский край.

Литература

- [1] Денисов С.А., Долгих В.М. Электромагнитный насос Патент на полезную модель RU №182623 U1, 24.08.2018. Заявка №201808436 от 27.01.2017
- [2] Долгих В., Денисов С. и Павлинов А. Экспериментальное исследование модели МГД-насоса с наклонными перегородками. – Magnetohydrodynamics Vol. 53(2017), No. 3, pp. 511-514.
- [3] Долгих В. и Павлинов А. Оптимизация конструкции МГД – насоса с наклонными перегородками. – Magnetohydrodynamics Vol. 55(2019), No. 1-2, pp. 39-45.
- [4] Долгих В. Экспериментальное исследование МГД – насоса с наклонными перегородками в плоском прямолинейном канале. - Magnetohydrodynamics Vol. 55(2019), No. 4, pp. 271-274.

ОПТИМИЗАЦИЯ ТОПОЛОГИИ БИОМИМЕТИЧЕСКИХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ СО СЛУЧАЙНОЙ СТРУКТУРОЙ

Долгих Д.А.¹, Ташкинов М.А.¹

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
DADolgikh@pstu.ru, m.tashkinov@pstu.ru

Биомиметические материалы создаются путем имитации структуры, межфазных границ и процесса синтеза натуральных природных материалов. Привлекательной особенностью природных материалов является их многофункциональность и способность адаптироваться к различным условиям. Опираясь на последние достижения в аддитивных технологиях, а также наряду с новыми подходами в компьютерном моделировании, исследования в области биомиметики открывают широкие перспективы для проектирования материалов и изделий, обладающих усовершенствованными свойствами и функционалом [1]. Ячеистые структуры являются естественным решением для удовлетворения потребности в эффективных, легких, но в то же время прочных материалах [2]. Природные ячеистые материалы имеют отличное соотношение прочности к весу, что привело к интересу в создании искусственных материалов, которые могут имитировать их поведение, таких как пены и соты.

Аддитивное производство (трехмерная печать) предлагает быстрый, универсальный и экономичный способ создания структур, основанных на принципах природных материалов. Последние достижения в области аддитивных технологий позволили разработать и синтезировать широкий спектр ячеистых материалов с беспрецедентными механическими, термическими и акустическими свойствами. Эти новые системы материалов обладают большим потенциалом в широком спектре применений, начиная от современных инженерных конструкций и заканчивая биомедицинскими изделиями.

Минимизация массы и обеспечение прочности при трехмерной печати материалов может быть достигнуто за счет управления локальными морфологическими характеристиками и свойствами ячеистых структур на основе решения задач топологической оптимизации. В данной работе представлены результаты оптимизации морфологии представительных объемов полимерных ячеистых материалов со случайной структурой в зависимости от условий нагружения с учетом заданных требований к жесткости. Для создания трехмерных моделей природоподобных ячеистых структур разработаны методы синтеза с возможностью вариации и флуктуации геометрических параметров. Топологическая оптимизация реализована с использованием метода конечных элементов в программных пакетах Abaqus и Tosca.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края в рамках научного проекта № 20-48-596011.

Литература

- [1] Bi S., Chen E., Gaitanaros S. Additive manufacturing and characterization of brittle foams // Mech. Mater. - 2020. - Vol. 145, № 01. - P. 103368.
- [2] Ha N.S., Lu G. A review of recent research on bio-inspired structures and materials for energy absorption applications // Compos. Part B Eng. - 2020. - Vol. 181, № August 2019. - P. 107496.

ПРИМЕНЕНИЕ БЕГУЩИХ ВОЛН В ОПРЕДЕЛЕНИИ ПОВРЕЖДЕННОСТИ ИНТЕРФЕЙСОВ В СЛОИСТЫХ КОМПОЗИТАХ

Дорошенко О.В.¹, Голуб М.В.¹, Еремин А.А.¹, Вильде М.В.²

¹Кубанский государственный университет, Краснодар

²Саратовский государственный технический университет, Саратов
oldorosh@mail.ru, m_golub@inbox.ru, eremin_a_87@mail.ru, mv_wilde@mail.ru

Преимущество композитных материалов заключается в том, что они зачастую обладают лучшими механическими свойствами, чем традиционные материалы. Одним из классов композитов, нашедших широкое применение в промышленности, являются многослойные пластины из листов упругих материалов, соединенных тонким вязким адгезионным слоем или диффузионно. Связывание разнородных материалов в один компонент неизбежно создает границы раздела, на которых возможно нарушение адгезионных или когезионных связей при производстве или в результате статических и динамических нагрузок.

Для диагностики состояния интерфейсных областей в многослойных конструкциях возможно использование бегущих упругих волн, активно применяющихся при неразрушающем контроле протяженных тонкостенных конструкций. Использование многомодового режима таких волн открывает широкие возможности их использования в задачах обнаружения поврежденных интерфейсов в композитах. Известно, что дисперсионные и амплитудно-частотные характеристики высших волн Лэмба заметно меняются при деградации качества соединения границ раздела сред [1]. Краевые волны представляют собой другой тип бегущих волн, которые также обладают многомодовым режимом [2] и могут быть использованы для обнаружения повреждения интерфейсов вблизи края ламината, где применение волн Лэмба затруднено.

В данной работе рассматривается задача описания динамического поведения интерфейсов в многослойной структуре. Поврежденный интерфейс моделируется граничными условиями пружинного типа [3], где жесткость распределенных пружин определяет силу связывания, а также при помощи распределения микротрещин со свободными от напряжений берегами, удельная плотность которых задает степень поврежденности интерфейса. В предположении, что оба подхода дают одинаковые амплитуды коэффициентов прохождения и отражения волны, выводится коэффициент пружинной жесткости. Для проверки состоятельности подхода были проведены экспериментальные измерения для трехслойных образцов, изготовленных из алюминиевых пластин, соединенных клеевой пленкой и с поврежденными внутренними поверхностями пластины или пленки. Соответствующие дисперсионные кривые были получены с использованием частотно-волнового анализа, примененного к измеренным с помощью лазерного виброметра вертикальным скоростям перемещений. Наблюдается качественное совпадение теоретически оцененных и экспериментально измеренных дисперсионных свойств для пластин с поврежденными интерфейсами. С использованием предложенной модели граничных условий пружинного типа и метода разложения по модам теоретически показана высокая чувствительность краевых волн к ослаблению адгезии между слоями ламината.

Литература

- [1] Gauthier C., El-Kettani M.E.-C, Galy J., Predoi M., Leduc D. Structural adhesive bonding characterization using guided Lamb waves and the vertical modes – International Journal of Adhesion & Adhesives, 98, 102467, 1–6, 2020.
- [2] Wilde M.V., Golub M.V., Eremin A.A. Experimental observation of theoretically predicted spectrum of edge waves in a thick elastic plate with facets – Ultrasonics, 98, 88–93, 2019.
- [3] Golub M.V., Doroshenko O.V., Boström A. Effective spring boundary conditions for a damaged interface between dissimilar media in three-dimensional case – International Journal of Solids and Structures, 81, 141–150, 2016.

ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ ЦИЛИНДРА С ВЯЗКОУПРУГИМ ПОКРЫТИЕМ

Дударев В.В.

Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону

dudarev_vv@mail.ru

В настоящее время в связи с развитием производственных технологий стало возможным наносить на тела различной формы покрытия с разнообразными свойствами. Благодаря таким покрытиям могут быть изменены некоторые характеристики объекта: коррозионная стойкость, прочность, диэлектрическое сопротивление, термостойкость, акустическая проницаемость и другие.

В работе в качестве конкретного примера рассмотрены продольно-радиальные колебания упругого изотропного полого цилиндра с вязкоупругим функционально градиентным покрытием. Свойства покрытия изменяются только по радиальной координате. Считается, что на торцах реализованы условия скользящих заделок. Внутренняя поверхность цилиндра свободна от нагрузок, а на внешней действует периодическая радиальная нагрузка, которая изменяется по продольной координате. Учитывая специальный вид граничных условий, геометрию объекта и свойства покрытия, решение задачи об установившихся колебаниях построено на основе метода разложения в тригонометрические ряды по продольной координате и принципа соответствия для стандартного вязкоупругого материала [1,2]. Для каждой из гармоник на основе исходных уравнений колебаний, определяющих соотношений и граничных условий получены краевые задачи, представленные в виде канонических систем дифференциальных уравнений первого порядка с переменными коэффициентами. Для численного решения каждой из этих задач использован метод пристрелки. На основе предложенной вычислительной схемы проведена серия вычислительных экспериментов для оценки влияния законов изменения переменных свойств покрытия и его толщины на основные акустические характеристики цилиндра. Следует отметить, что решение исследуемой задачи также построено с помощью метода конечных элементов, реализованного в пакете FlexPDE. Отличительными особенностями этого пакета являются проведение расчетов для комплексных величин и возможность задавать в явном виде определяющие соотношения и уравнения колебаний. Проведена сравнительная оценка точности численных результатов, полученных с помощью метода конечных элементов и первого подхода. Также с помощью функционала пакета FlexPDE получены значения первых резонансных частот колебаний для других условий закрепления торцевых поверхностей. Представлены графики амплитудно-частотной характеристики, измеренной на внешней поверхности цилиндра, графики компонент поля перемещения и напряжений при различных законах изменения свойств и параметра релаксации материала покрытия.

Исследование выполнено при поддержке проекта РНФ № 18-11-00069.

Литература

- [1] Кристенсен Р. Введение в теорию вязкоупругости – Москва, 1974. – 340 с.
- [2] Dudarev V.V., Mnukhin R.M., Nedin R.D., Vatulyan A.O. Effect of material inhomogeneity on characteristics of a functionally graded hollow cylinder // Applied Mathematics and Computation. 2020. Vol. 382. Article number 125333.

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ РАЗМЕРОВ ЗАГОТОВКИ НА ПРОЦЕСС ВУЛКАНИЗАЦИИ РЕЗИНОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ

Дятлов И.Я.¹, Труфанова Н.М.¹

¹*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
d.i.994@yandex.ru, ktei@pstu.ru*

При производстве кабельно-проводниковой продукции со сшиваемой резиновой изоляцией возникает проблема неравномерной сшивки изоляции, что обычно связано с некорректными параметрами технологического процесса. Изоляция с низкой степенью завершенности сшивки имеет худшие эксплуатационные свойства: гибкость, упругость, стойкость.

В ходе процесса вулканизации на заготовку методом экструзии наносится слой сшиваемой изоляции, затем изолированная заготовка проходит через вулканизационную трубу, где нагревается за счет пара при давлении 0,4-2 МПа, либо за счет инфракрасных нагревателей в среде азота. Нагрев заготовки происходит неравномерно, верхние слои прогреваются быстрее внутренних, что происходит из-за низкой теплопроводности полимерной изоляции и теплоемкости медной жилы. Процесс вулканизации изоляции начинается при достижении температуры 140°C. Время завершения сшивки существенно зависит от вулканизационных свойств полимерной композиции и температуры [1]. Поэтому, для анализа процесса вулканизации изоляции кабеля необходимо рассматривать процессы теплообмена внутри вулканизационной трубы совместно с кинетикой процесса вулканизации.

При смене изготавливаемого марко-размера кабеля, меняется толщина слоя изоляции и диаметр заготовки, поэтому требуется корректировать скорость линии вулканизации.

Для оценки зависимости скорости производства в работе рассмотрена осесимметричная математическая модель тепломассопереноса при вулканизации резиновой изоляции [1] совместно с моделью кинетики вулканизации [3].

Решение задачи осуществлялось методом конечных объемов в среде ANSYS Fluent. На основании полученного распределения температуры в продольном сечении кабеля рассчитывались кривые вулканизации. Так, итерационно подбиралась скорость, при которой степень завершенности в конце вулканизационной трубы была бы не менее 90%. Построены зависимости скорости изолирования от диаметра заготовки и толщины изоляции.

Результаты могут быть использованы для разработки новых технологических режимов и оптимизации имеющихся.

Проект № 20-31-90045 выполняется при поддержке РФФИ.

Литература

- [1] Дятлов И.Я., Труфанова Н.М. Исследование процесса вулканизации резиновой смеси при помощи ротационного реометра; Научно-Технический Вестник Поволжья; № 7, 2018, с. 91-94
- [2] Корелин А.А., Дятлов И.Я., Труфанова Н.М.; Численное исследование процесса сшивки полиэтилена в вулканизационной трубе в среде азота; Научно-Технический Вестник Поволжья № 7, 2019, с. 111-114
- [3] Дятлов И.Я., Труфанова Н.М. Описание вулканизационных кривых при помощи трехпараметрического уравнения; Электротехника; № 11, 2020, с. 34-38.

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕПЛОПЕРЕНОСА С УЧЕТОМ НЕОДНОРОДНОГО ГОРОДСКОГО РЕЛЬЕФА

Евграфова А. В.¹, Сухановский А. Н.¹

¹Институт механики сплошных сред ПФИЦ УрО РАН, Пермь

eav@icmm.ru, san@icmm.ru

Известно, что температура в пределах города может существенно отличаться от близлежащих областей. Связано это в основном с изменением окружающей среды в городских условиях (увеличение тепловой емкости наряду со снижением средней скорости ветра и влажности). При этом в городе распределение температуры оказывается неоднородным, оно зависит от геометрии застройки, особенностей рельефа и термодинамических свойств самой поверхности [1-2]. Неоднородность нагрева поверхности города приводит к возникновению конвективных течений и естественной терморегуляции городского массива. При этом течения в таких условиях являются принципиально трехмерными.

В рамках данного исследования реализован новый экспериментальный подход, который заключается в лабораторном моделировании влияния рельефа местности, в том числе искусственного происхождения на величину и пространственное распределение температуры. В качестве объекта исследований использована модель центрального района города Пермь. Модель создана из ABS пластика на 3D принтере Picaso. Модель качественно воспроизводит особенности рельефа местности, расположение и высоту зданий на территории 5 квадратных километра (масштаб печати 1:4000).

Проведена серия экспериментов по исследованию процесса остывания поверхности города после продолжительного нагревания инфракрасным излучением. Рассмотрены следующие ситуации: влияние плотности застройки на процесс остывания поверхности макета; влияние наличия рельефа искусственного происхождения на величину и интенсивность теплообмена.

Литература

- [1] Jamei E, Rajagopalan P, Seyedmahmoudian M, Jamei Y. Review on the impact of urban geometry and pedestrian level greening on outdoor thermal comfort - Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016. 54. 1002–1017.
- [2] Shreevastava A, Bhalachandran S, McGrath GS, Huber M, Rao PSC. Paradoxical impact of sprawling intra-Urban Heat Islets: Reducing mean surface temperatures while enhancing local extremes - Scientific reports. 2019. 9(1). 1–10.

ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ МЕЖДУКАМЕРНЫХ ЦЕЛИКОВ НА ОСНОВЕ КОНТРОЛЯ СКОРОСТЕЙ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ КОНВЕРГЕНЦИИ ОЧИСТНЫХ КАМЕР И ОСЕДАНИЯ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Евсеев А.В.¹

¹ГИ УрО РАН, Пермь

evseev@mi-perm.ru

Отработка запасов Верхнекамского месторождения калийных солей (ВКМКС) ведется камерной системой разработки. Для предотвращения интенсивного деформирования подработанного массива и земной поверхности оставляются междукammerные целики, степень нагружения которых согласно действующим нормативным документам не должна превышать 0,4 от предела прочности на одноосное сжатие.

Поскольку скорость ползучести целиков определяется действующей нагрузкой, на большинстве рудников для оценки корректности выбора параметров ведения горных работ выполняются измерения оседаний земной поверхности. Несмотря на высокую информативность метода и возможности выполнения контроля в течение всего срока службы предприятия, такие измерения имеют некоторые особенности. Во-первых, это связано с тем, что на конкретную точку земной поверхности оказывает влияние значительная отработанная область, определяемая глубиной ведения горных работ и строением подработанного массива. Во-вторых, процессы на земной поверхности проявляются с некоторым запаздыванием. Дополнительные ограничения накладывает занятость территории. Кроме того, в случае многопластовой отработки и различной высоты целиков отсутствует возможность определения относительной скорости деформирования в отдельности по каждому пласту.

Для получения более полной информации о деформировании междукammerных целиков и своевременного принятия решения о необходимости закладки выработанного пространства или других мерах охраны предложена методика шахтного контроля, основанная на измерении горизонтальной конвергенции (изменения ширины) в очистных камерах. Обоснование методики и критических величин скорости поперечного деформирования междукammerных целиков при различной степени их нагружения выполнено на основе многолетних шахтных измерений, лабораторных испытаний образцов горных пород на ползучесть и одноосное сжатие, а также многовариантного математического моделирования.

Для отработки предложенной методики контроля устойчивости междукammerных целиков на рудниках Верхнекамского месторождения за последние 2 года оборудовано более 3000 замерных станций. Анализ карт оседаний земной поверхности и скорости горизонтальной конвергенции показал их качественное соответствие. По результатам массового регулярного контроля горизонтальной конвергенции очистных камер на рудниках ВКМКС и анализа имеющихся данных по оседанию земной поверхности сделан вывод о возможности использования такого вида мониторинга для детальной оценки устойчивости междукammerных целиков наряду с геодезическими измерениями на поверхности.

АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПРУТКОВЫХ МЕТАЛЛОИЗДЕЛИЯХ ПОСЛЕ ВОЛОЧЕНИЯ С УЧЕТОМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

Евсина А.В., Кузнецова Е.В.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
umbrella-girl@mail.ru, mellen75@mail.ru

В процессе изготовления прутковых металлоизделий волочением реализуются большие степени деформации, наблюдается неравномерность пластической деформации, формируется самоуравновешенная система остаточных напряжений, что существенно влияет на точность, прочность, долговечность, надежность, коррозионную стойкость, а также усталостную прочность деталей машин после изготовления и обработки [1,2]. При этом, на уровень и знак технологических остаточных напряжений, в свою очередь, влияют основные параметры деформирования, а также физико-механические свойства материала заготовки. В связи с этим, актуальной проблемой является анализ распределений технологических остаточных напряжений в зависимости от параметров деформирования с целью выявлять степень влияния технологических параметров, механических свойств обрабатываемого материала, геометрии заготовки на уровень и распределение сформированных остаточных напряжений.

В работе для определения технологических остаточных напряжений используется энергетический подход, где потенциальная энергия упругих остаточных напряжений рассматривается как часть энергии, пошедшей на пластическое деформирование, которая зависит от степени пластической деформации и основных параметров технологии. Для определения компонент тензора остаточных напряжений и соответствующих их действию упругих деформаций решается осесимметричная задача теории упругости [3]. Далее проводится анализ эмпирических зависимостей остаточных напряжений в прутковых металлоизделиях и с использованием известных из литературы экспериментальных данных [4]. Предложена методика определения параметра деформативности для случая волочения прутковых металлоизделий, которая позволяет уточнять решения об определении остаточных напряжений для конкретных условий деформирования, а также анализировать и выявлять влияние процессов изготовления и обработки на формирование технологических остаточных напряжений в сплошных осесимметричных деталях.

Таким образом, к решению задач оценки влияния технологических параметров на остаточные напряжения, возникающих в процессе волочения осесимметричных металлоизделий применен энергетический подход. Разработана методика определения параметра деформативности. Проведен анализ распределения остаточных напряжений по сечению прутковых металлоизделий расчетно-теоретических и экспериментальных зависимостей от условий деформирования, что позволяет уточнять решения об определении остаточных напряжений для конкретных условий деформирования, а также анализировать и выявлять влияние процессов изготовления и обработки на формирование технологических остаточных напряжений в сплошных осесимметричных деталях.

Литература

- [1] Поздеев А.А., Няшин Ю.И., Трусев П.В. Остаточные напряжения: теория и приложение. М.: 1982г. 112 с.
- [2] Соколов И.А., Уральский В.И. Остаточные напряжения и качество металлопродукции. М.: Металлургия, 1981. 96 с.
- [3] Колмогоров Г.Л., Кузнецова Е.В., Тиунов В.В. Технологические остаточные напряжения и их влияние на долговечность и надежность металлоизделий. Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2012. 216 с.
- [4] Зайдес С.А., Нгуен Ван Хуан. Определение остаточных напряжений в калиброванных прутках. Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2017. Том 60, № 2, с. 109-115.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННОГО ПОВЕДЕНИЯ НЕОДНОРОДНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ РЕШЕТЧАТЫХ СТРУКТУР С ГРАДИЕНТОМ ПОРИСТОСТИ

Еленская Н.В.¹, Ташкинов М.А.¹

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет Пермь
nataliya-elenskaya@mail.ru, m.tashkinov@pstu.ru

Активное развитие аддитивных технологий (трехмерной печати) открывает новые возможности при создании новых искусственных материалов с оптимальными свойствами. Одной из концепций создания функциональных материалов с использованием трехмерной печати является проектирование структурно-неоднородных материалов с градиентом свойств. В последние годы использование пористых функционально-градиентных материалов, созданных на основе аддитивных технологий, значительно возросло, в частности, в области биомедицины [1–3]. Материалы с решетчатой структурой обладают архитектурой, образованной массивом расположенных в пространстве элементарных ячеек с заданной формой. В таких материалах состав или структура материала варьируется в зависимости от объема, что приводит к переменным свойствам в пределах одной структуры. Подобные механические градиенты играют важную роль в распределении напряжений. В отличие от однородных пористых структур, где механические свойства в макромасштабе сходятся по мере увеличения размера образца, для градиентных образцов сходимость механических свойств не обеспечивается. Важным аспектом градиентных конструкций является сглаживание градиентов напряжений во избежание концентрации напряжений, вызванной резкими геометрическими изменениями. С точки зрения проектирования новых материалов и изделий, отдельной задачей является сочетание нескольких типов элементарных ячеек, так как автоматический переход от одного типа элементарной ячейки к другому не всегда происходит прямолинейно.

Данная работа посвящена разработке методов создания трёхмерных моделей геометрии решетчатых структур с градиентом объемной доли пористой фазы, а также моделированию особенностей деформирования полимерных структур с подобной геометрией. Геометрические модели неоднородных решетчатых структур получены с помощью метода разделения поверхностей на основе уравнения гироида с вариацией параметров. Модели механического поведения реализованы с помощью метода конечных элементов в пакете Abaqus.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края в рамках научных проектов № 20-48-596011 и № 19-41-590023.

Литература

- [1] Liu F. et al. Functionally graded porous scaffolds in multiple patterns: New design method, physical and mechanical properties // Mater. Des., 2018. Vol. 160. P. 849–860.
- [2] Abbasi N. et al. Porous scaffolds for bone regeneration // J. Sci. Adv. Mater. Devices., 2020. Vol. 5, № 1. P. 1–9.
- [3] Murdock M.H., Badylak S.F. Biomaterials-based in situ tissue engineering // Curr. Opin. Biomed. Eng. 2017. Vol. 1. P. 4–7.

ТУРБУЛЕНТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭВТ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ КАНАЛЕ: ЭКСПЕРИМЕНТ

Ельтищев В.А., Павлинов А.М., Колесниченко И.В.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

eltishchev.v@icmm.ru

Электровихревые течения – это течения, которые создаются в проводящих жидкостях электрическими токами, взаимодействующими с их собственным магнитным полем [1]. В работе экспериментально исследованы турбулентные характеристики электровихревого течения жидкого металла в цилиндрическом канале при различных значениях тока и наложенного вертикального магнитного поля.

Экспериментальная установка представляет собой цилиндрический канал, который изготовлен из нержавеющей стали. Дно канала выполнено из органического стекла и плотно соединено с боковой стенкой, оснащенной тремя шлюзами, в которые устанавливаются кондукционные датчики скорости (КДС), позволяющие определить как величину аксиальной и вертикальной компонент скорости в пристеночной области, так и получить спектр пульсаций скорости. Верхняя часть рабочей полости канала закрыта плексигласовой крышкой. Цилиндрический объем заполнен галлиевым сплавом GaZnSn. На оси канала расположены цилиндрические коаксиальные электроды, которые позволяют компенсировать собственное магнитное поле токоподвода. Центральный медный электрод, способный погружаться внутрь ячейки на необходимую глубину, расположен так, что его торец находится в контакте с жидким металлом. Наружный электрод соединяется с боковой стенкой через систему контактов. Электроды подключаются к выходу трехфазного выпрямителя тока, который питается от ЛАТРа. Катушки Гельмгольца позволяют создавать постоянное вертикальное магнитное поле.

Исследования течения в канале с твердой верхней границей, проведенные с помощью КДС, позволили получить как средние значения аксиальной и азимутальной компоненты скорости, так и их пульсации в широком диапазоне частот для трёх локализованных зон в пристеночной области. Получены зависимости средней скорости от величин пропускаемого через жидкий металл электрического тока и наложенного магнитного поля, а также спектры пульсаций скорости на трех различных высотах от нижней границы модели.

Литература

[1] Боярев В.В., Фрейберг Я.Ж., Шилов Э.В., Щербинин Э.В. Электровихревые течения – Рига: Зинатне, 1985. – 315 с.

СИСТЕМА ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО НИВЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ МОНИТОРИНГА НАДШАХТНОЙ КОНСТРУКЦИИ СКИПОВОГО СТВОЛА

Епин В.В.¹, Глот И.О.¹, Гусев Г.Н.¹, Цветков Р.В.¹, Шардаков И.Н.¹, Шестаков А.П.¹

¹*Институт механики сплошных сред Уро РАН, Пермь*

epin.v@icmm.ru, gusev.g@icmm.ru, glot@icmm.ru, flower@icmm.ru, shardakov@icmm.ru,
shap@icmm.ru

Для мониторинга ответственных инженерных конструкций эксплуатирующихся в сложных внешних условиях (перепады температур, агрессивная среда) требуются специальные измерительные системы, адаптированные к таким объектам. Их стабильная и надёжная работа имеет важное значение для оценки текущего механического состояния конструкции и её прогноза. В данной работе объектом исследования служит надшахтная конструкция скипового ствола, с помощью которой производится подъём руды. Её механическое состояние зависит от большого числа внешних факторов: взаимодействие грунтов со стволом шахты, ветровая нагрузка, работа механизмов, коррозия элементов и др., которые нужно контролировать.

Одним из основных факторов, определяющих квазистатическое деформационное состояние элементов надшахтного здания, является деформационное взаимодействие части несущих колонн со свайными фундаментами и деформационное взаимодействие остальной части колонн с железобетонным оголовком скипового ствола. Это деформационное взаимодействие в значительной степени определяется вертикальными смещениями нижних оснований колонн. Для регистрации изменения величин вертикальной составляющей осадок фундаментов, взаимодействующих с грунтом, использована оригинальная разработка на основе совокупности датчиков гидростатического нивелирования [1].

В работе описаны особенности установки и эксплуатации в условиях низких температур и агрессивной среды системы гидростатического нивелирования, адаптированной для рассматриваемой конструкции. Представлены результаты измерений неравномерных осадок конструкции за четырнадцать месяцев эксплуатации.

Литература

[1] Епин В.В., Цветков Р.В., Шардаков И.Н. Деформационный мониторинг фундаментов зданий методом гидростатического нивелирования //Инженерно-строительный журнал. –2015. –№ 3. – С. 21-28.

НЕЛИНЕЙНАЯ ВОЛНОВАЯ ДИНАМИКА ПОРИСТЫХ ЖИДКОНАСЫЩЕННЫХ СРЕД

Ерофеев В.И., Леонтьева А.В.

Институт проблем машиностроения РАН, Нижний Новгород

erof.vi@yandex.ru, aleonav@mail.ru

В работе рассматривается распространение плоских продольных волн в пористой жидконасыщенной среде с учетом нелинейной связи между деформациями и перемещениями. Пористая жидконасыщенная среда рассматривается в рамках классической теории Био. Показано, что математическая модель, учитывающая геометрическую нелинейность скелета среды, может быть сведена к системе эволюционных уравнений относительно смещений скелета среды и жидкости в порах. Система эволюционных уравнений, в свою очередь, в зависимости от наличия вязкости, сводится к уравнению простой волны или уравнению, внешне напоминающему уравнение Бюргерса. Решение уравнения Римана получено для колоколообразного начального профиля, показано характерное опрокидывание волны. Во втором случае решение найдено в виде стационарной ударной волны, имеющей профиль несимметричного кинка. Установлена связь амплитуды и ширины фронта ударной волны. Отмечено, что поведение нелинейных волн в таких средах отличается от стандартного, характерного для диссипативных недиспергирующих сред, распространение волн в которых описывается классическим уравнением Бюргерса.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЯЗКОУПРУГИХ СВОЙСТВ ЖИДКОСТЕЙ ДЛЯ ГИДРОРАЗРЫВА ПЛАСТА

Ефремов Д.В., Банникова И.А., Баяндин Ю.В.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

efremov.d@icmm.ru, buv@icmm.ru

Гидроразрыв пласта (ГРП) – это технологический процесс, который заключается в создании высокопроводимой трещины в пласте, под действием подаваемой в него жидкости под давлением, для обеспечения притока флюида через плотные горные породы в ствол скважины. Для предотвращения смыкания трещины вместе с жидкостью гидроразрыва в скважину подают расклинивающий наполнитель – пропант (отсев кварцевого песка, керамические шарики и другие материалы фракции 0.5–1.5 мм), который удерживает трещину от смыкания после снятия избыточного давления.

Целью данной работы является разработка и калибровка оригинального вискозиметра (ротационного реометра) для исследования реологического поведения жидкостей ГРП и проведения комплекса испытаний по определению реологических свойств жидкостей гидроразрыва на основе вязкоупругого ПАВ «Сурфогель» марки Д и на основе гуара (Рис. 1).

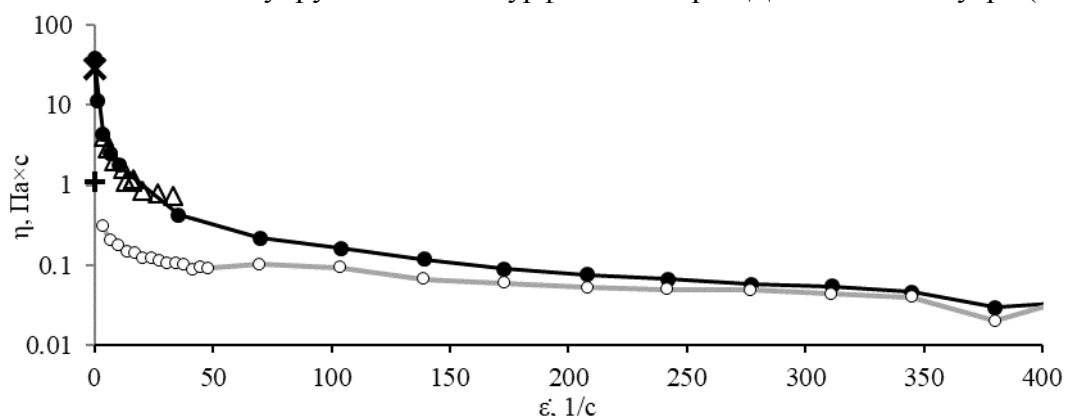


Рис. 1. Кривые вязкости жидкостей на основе вязкоупругого ПАВ (● – реометр Physica MCR501; X – метод Стокса; Δ – метод измерения вязкости с помощью коаксиальных цилиндров) и на основе гуара (○ – реометр Physica MCR501; + – метод Стокса)

В результате проделанной работы, проведена валидация вискозиметра оригинального изготовления, состоящего из соосных коаксиальных цилиндров и позволяющего измерять динамическую вязкость в широком диапазоне скоростей сдвига, а также осуществлять визуальное наблюдение за исследуемой жидкостью. С использованием реометра Physica MCR501 исследованы вязкоупругие свойства жидкостей ГРП. Жидкость на основе вязкоупругого ПАВ показала более высокую стабильность реологических свойств, заключающуюся в слабой зависимости от амплитуды осцилляций и частоты осцилляций в отличие от жидкости на основе гуара. Проведены квазистатические эксперименты по определению значений динамической вязкости жидкостей ГРП по методу Стокса. Полученные значения динамической вязкости хорошо согласуются между собой [1].

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края в рамках научного проекта № 19-48-590016.

Литература

[1] Ефремов Д. В., Банникова И. А., Баяндин Ю. В., Крутихин Е. В., Журавлёв В. А. Экспериментальное исследование реологических свойств жидкостей для гидроразрыва пласта // Вестник Пермского университета. Физика. 2020. № 4. С. 69–77. doi: 10.17072/1994-3598-2020-4-69-77

МЕТОД КВАЗИЛИНЕАРИЗАЦИИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ МЕХАНИКИ ДЕФОРМИРУЕМОГО ТВЕРДОГО ТЕЛА. УТОЧНЕННОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ОБ УСТАНОВИВШЕЙСЯ ПОЛЗУЧЕСТИ ВРАЩАЮЩЕГОСЯ ДИСКА

Жаббаров Р.М.¹, Степанова Л.В.¹

¹Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева,
Самара

zhabbarovrm@ssau.ru, stepanovaLv@ssau.ru

Метод квазилинеаризации в настоящее время является одним из наиболее перспективных методов получения решения нелинейных задач [1-3]. В рамках данной работы рассмотрены нелинейные задачи определения напряженно-деформированного состояния в условиях ползучести в материале со степенными определяющими уравнениями. В качестве степенной функции, отвечающей за нелинейное поведение материала, было использовано соотношение Бейли-Нортон. Результаты решения задачи об установившейся ползучести вращающегося диска представлены на рисунке; a , b – распределения компонент тензора напряжений, c , d – распределения компонент тензора скоростей деформаций ползучести.

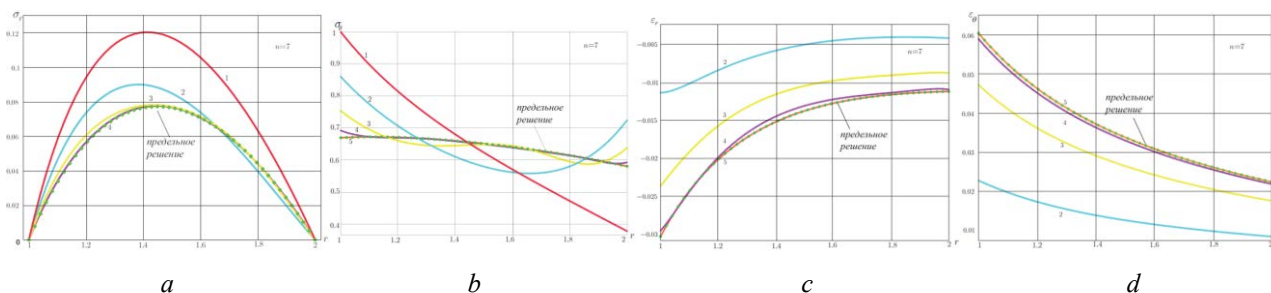


Рис. Распределения компонент тензора напряжений и тензора скоростей деформаций ползучести, полученные методом квазилинеаризации

В работе получены приближенно-аналитические решения для двух задач. В рамках задачи об установившейся ползучести вращающегося диска получено аналитическое решение для первого приближения, а также показано, что для достижения сходимости к предельному решению достаточно четыре итерации. В рамках задачи о всестороннем растяжении пластины выполнен ряд вычислений в пакете SIMULIA Abaqus, результаты которых показывают уменьшение коэффициента концентрации напряжений при увеличении показателя нелинейности. Максимальное значение тангенциального напряжения достигается не на круговом контуре, а на внутренней точке пластины.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 19-31-90100)

Литература

- [1] Guangwang S., Liang L., Bo T., Zhenhai L. Quasilinearization technique for solving nonlinear Riemann-Liouville fractional-order problems // Applied Mathematics and Computation. – 2020. – Vol. 378.
- [2] Stepanova L.V., Zhabbarov R.M. Approximate solutions to Nonlinear Problems of Solid Mechanics by Quasilinearization Method // Procedia Structural Integrity. – 2020. Vol. 28. – P. 2277-2282.
- [3] Polyanin A.D. Construction of exact solutions in implicit form for pdes: new functional separable solutions of nonlinear reaction-diffusion equations with variable coefficients // International Journal of Non-Linear Mechanics. – 2019. Vol. 111. – P. 95-105.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ЗАМОРАЖИВАНИЯ ГРУНТОВЫХ СЛОЕВ ДЛЯ ПРОХОДКИ ШАХТНОГО СТВОЛА

Желнин М.С.¹, Костина А.А.¹, Прохоров А.Е.¹, Плехов О.А.¹, Левин Л.Ю.²

¹*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

²*Горный институт УрО РАН, Пермь*

zhelnin.m@icmm.ru, kostina@icmm.ru, prokhorov.a@icmm.ru, poa@icmm.ru,
aerolog.lev@mail.ru

В настоящее время для разработки подземных месторождений полезных ископаемых возникает необходимость в проведении вертикальных шахтных стволов через водоносные горизонты и слабые, неустойчивые влагонасыщенные грунты. Искусственное замораживание породного массива является эффективным способом ведения проходческих работ в сложных гидрологических условиях. Цель данного способа заключается в формировании ледопородного ограждения (ЛПО) вокруг проектируемого сечения шахтного ствола. Во время проходки шахтного ствола ЛПО выполняет функции временной крепи, воспринимая на себя давление окружающих пород и препятствуя прорыву подземных вод в выработку.

Настоящее исследование посвящено построению связной термогидромеханической модели процесса промерзания влагонасыщенных грунтов с целью моделирования формирования ЛПО во влагонасыщенных грунтовых слоях и проведения под его защитой проходческих работ. Построение модели выполнено в рамках механики сплошной среды и использованием определяющих соотношений поромеханики. Особенностью построенной модели является возможность учета в полностью связной постановке взаимовлияния между промерзанием грунта, возникновением в нем морозного пучения и усадки, изменением его пористости и напряженно-деформированного состояния грунта, миграцией влаги к фронту промерзания. Кроме этого, для того чтобы описать деформирование ЛПО на этапе ведения проходческих работ, в модель добавлены определяющие соотношения для расчета ползучести замороженного грунта.

Разработанная модель была верифицирована по лабораторным экспериментам одностороннего искусственного замораживания цилиндрических образцов грунта. Показано, что модель позволяет описать наблюдаемое в экспериментах изменение со временем температуры грунта, пористости, а также деформации морозного пучения. В дополнение к этому модель была применена для анализа данных лабораторного эксперимента, направленного на исследование характера деформирования промерзающего грунта с помощью оптоволоконных датчиков.

Верифицированная модель была использована для комплексного расчета проведения вертикального шахтного ствола способом искусственного замораживания в грунтовых слоях с различной степенью пучинистости, залегающих на одном из калийных месторождений Республики Беларусь. Результаты численного моделирования показали, что возникновение криогенных течений приводит к неоднородному распределению льда по толщине ЛПО, способствует интенсивному развитию морозного пучения в замороженной зоне и дополнительному сжатию незамороженного грунта перед ЛПО. Вследствие этого происходит увеличение бокового давления на внешнюю стенку ЛПО, что на этапе ведения проходческих работ вызывает дополнительное смещение грунта к центру неподкрепленной выработки.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта
№ 19-31-90107

ТОЧЕЧНЫЙ ИСТОЧНИК В ПРОСТРАНСТВЕ РЕДУЦИРОВАННОЙ СРЕДЫ КОССЕРА

Зданчук Е.В., Лалин В.В.

Санкт-Петербургский Политехнический Университет Петра Великого, Санкт-Петербург
zelizaveta@yandex.ru, vllalin@yandex.ru

В данной работе рассматривается динамическая задача для редуцированной среды Коссера, среды, в которой кроме трансляционных есть и вращательные степени свободы, при этом моментные напряжения не создаются, аналогично классической теории упругости. Такую математическую модель среды предлагается использовать для сыпучих, гранулированных материалов [1]. Авторами получено выражение для нахождения перемещений в материале при произвольно зависящей от времени сосредоточенной силы, которое сравнивается с аналогичным решением динамической задачи для классической теории упругости, приведенном в [2]. Таким образом, есть возможность оценить влияние введения в математическую модель учета вращательных степеней свободы. В работе на примере композитного гранулированного материала приведено сравнение перемещений, возникающих в упругом пространстве под действием сосредоточенной динамической силы, при расчете по обеим моделям.

Литература

- [1] Schwartz L.M., Johnson D.L., Feng S. Vibrational modes in granular materials – Phys.Rev.Lett. V.52. №10, 1984 – 831–834 pp.
- [2] Кеч В, Теодореску П. Введение в теорию обобщенных функций с приложениями в технике – Москва, 1978. – 517 с.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНОГО МОДУЛЯ СДВИГА В УПРУГОМ ПОЛУПРОСТРАНСТВЕ

Зеленцов В.Б., Лапина П.А., Айзикович С.М.

Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону
vbzelen@gmail.com, polina_azarova86@mail.ru, saizikovich@gmail.com

Функционально-градиентные материалы широко используются в промышленности. Практический интерес представляет разработка и развитие методов определения упругих модулей неоднородных материалов. В основе таких методов лежат решения контактных задач механики сплошной среды о действии индентора на образец материала с целью определения напряжённо-деформируемого состояния образца. При этом при расчете напряженно-деформируемого состояния функционально-градиентных материалов необходимо учитывать изменение модулей упругости по глубине материала.

В работе предложен метод определения параметров переменного по глубине модуля сдвига экспоненциального вида на основе сравнения асимптотических аналитических решений контактной задачи о сдвиге поверхности функционально-градиентного полупространства полосовым штампом и экспериментальных данных [1, 2].

Предполагается, что модуль сдвига функционально-градиентного материала изменяется по глубине по экспоненциальному закону, параметрами которого являются интенсивность изменения модуля с глубиной и значение модуля на поверхности.

Контактная задача сведена к интегральному уравнению, решение которого строится асимптотическими методами при больших и малых значениях безразмерного параметра задачи, связывающего интенсивность изменения модуля сдвига и полудлину области контакта. При малых значениях безразмерного параметра используется метод Винера-Хопфа, а при больших значениях - разложение в ряд трансформанты ядра по отрицательным степеням параметра преобразования Фурье с последующим применением метода последовательных приближений. Определение интенсивности изменения модуля сдвига предлагается осуществлять путем сравнения теоретически рассчитанных и экспериментально полученных контактных напряжений, возникающих под штампом, или смещений поверхности материала вне области контакта. Значение модуля сдвига на поверхности предлагается определять из условия статики контактной задачи.

Работа выполнена при поддержке гранта Правительства РФ (договор № 14.Z50.31.0046).

Литература

- [1] Zelentsov V.B., Lapina P.A., Mitrin B.I., Kudish I.I. An antiplane deformation of a functionally graded half-space // Continuum Mechanics and Thermodynamics. 2019. DOI:10.1007/s00161-019-00783-1
- [2] Zelentsov V.B., Lapina P.A., Mitrin B.I., Eremeyev V.A. Characterization of the functionally graded shear modulus of a half-space // Mathematics. 2020. DOI:10.3390/math8040640

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ В ПЕРЕМЕННОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Зубарев А. Ю.^{1,2}, Чириков Д. Н.¹, Хужир П.³

¹Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

²Институт физики металлов имени М. Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия

³University Cote d'Azur, Ницца, Франция

a.j.zubarev@urfu.ru d.n.chirikov@urfu.ru pavel.kuzhir@unice.fr

Одна из основных проблем, возникающих при лечении инсультов, состоит в очень медленном и неэффективном диффузионном транспорте лекарств из-за отсутствия кровотока в тромбированном кровеносном сосуде. Поэтому важной задачей является разработка методов интенсификации этого транспорта при помощи внешних физических воздействий на пораженные участки головного мозга, та же, как и других участков организма, где происходит тромбирование кровеносных сосудов. В [1, 2] предложен перспективный метод решения этой задачи. Суть его заключается во введении капли биосовместимой феррожидкости в тромбированный кровеносный сосуд и в воздействии на этот участок переменным (вращательным) магнитным полем. Под воздействие поля частицы (их агрегаты) приходят во вращательное и поступательное движение, которое генерирует циркуляционные потоки крови в тромбированном сосуде. Эксперименты на мышах, перенесших инсульт, показали гораздо лучшую их выживаемость при применении такого подхода [1, 2], чем у контрольных групп. Однако теоретический анализ этих циркуляционных потоков является скудным [3], что очень сильно сдерживает развитие этого метода терапии инсультов и тромбозов.

В работе представлено теоретическое моделирование макроскопических потоков, в немагнитной жидкости, моделирующей кровь, с внедренной каплей феррожидкости под действием бегущего осциллирующего магнитного поля. В модели капля магнитной жидкости помещается в цилиндрический канал, заполненный немагнитной жидкостью. Диаметр канала составляет 1 мм, что соответствует кровеносным сосудам головного мозга. Мы предполагаем, что на канал «надеты» два коаксиальных соленоидов с расстоянием между ними около 10 см. Капля магнитной жидкости находится посередине между соленоидами, которые создают переменное осциллирующее магнитное поле с циклической частотой ω 15 с⁻¹ и амплитудой напряженности магнитного поля внутри капли H 20 кА/м.

Теоретические результаты показывают, что осциллирующее магнитное поле может вызвать циркуляционные потоки с амплитудой скорости порядка нескольких миллиметров в секунду в начальный момент времени после приложения магнитного поля, что представляется достаточным для интенсификации транспорта лекарств в кровеносных сосудах. Однако с течением времени скорость уменьшается из-за явления размытия профиля концентрации магнитной жидкости. Мы полагаем, что эта работа будет полезна для развития метода магнитоиндуцированного транспорта лекарств в тромбированных кровеносных сосудах.

Литература

- [1] Creighton F.M. Magnetic-based systems for treating occluded vessels. 2012. U.S. Patent No. 8,308,628.
- [2] Creighton F.M., Sabo M., Null C., Epplin G., Wachtman J.C. 2018. U.S. Patent No. 9,883,878.
- [3] Clements M.J. A mathematical model for magnetically assisted delivery of thrombolytics in occluded blood vessels for ischemic stroke treatment. 2016. Doctoral dissertation, Texas University.

РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАГНИТНЫХ ЖИДКОСТЕЙ С КОМПОЗИТНЫМИ ЧАСТИЦАМИ

Зубарев А.Ю.^{1,2}, Чириков Д.Н.¹

¹*Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия*

²*Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия*
a.j.zubarev@urfu.ru d.n.chirikov@urfu.ru

В последние, примерно, десять лет магнитные жидкости, состоящие из композитных частиц, которые, в свою очередь, состоят из большого числа однодоменных магнитных наночастиц, скрепленных полимерной матрицей, привлекают растущий интерес исследователей в связи с открывающимися перспективами их применения в промышленных и медико-биологических приложениях. Одним из интересных свойств этих систем является магнитореологический отклик, сопоставимый с таковым в традиционных магнитореологических суспензиях, с неплохой седиментационной устойчивостью. Вместе с тем, эксперименты показывают, что этим системам присуща реологическая вязкоупругая релаксация с характерными временами, находящимися в диапазоне от нескольких до нескольких сотен секунд, что на несколько порядков величины больше, чем для традиционных магнитных жидкостей. Это делает композитные магнитные жидкости интересным объектом с точки зрения науки о медленно релаксирующих процессах.

В докладе сообщается о теоретических и экспериментальных результатах о магнитореологических и медленных релаксационных явлениях в двух типах композитных магнитных жидкостей, синтезированных в Техническом университете Дрездена и в университете Латвии. Обе системы продемонстрировали, хотя и разные по величине, но существенные магнитореологические эффекты и медленную релаксацию напряжения после изменения скорости деформационного течения. Предложенная нами теоретическая модель основана на представлении о том, что под действием поля композитные частицы намагничиваются и объединяются в линейно-цепочечные агрегаты. Размер этих цепочек определяется конкуренцией между магнитными силами их притяжения и разрушающими гидродинамическими силами. При изменении градиента скорости течения направление цепочки меняется в течении конечного времени, которое определяет время реологической релаксации. Сравнение теории с экспериментами показало, что предложенная модель, по крайней мере, по порядку величины описывает экспериментальные результаты.

ПРИМЕНЕНИЕ РЕГИСТРАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ИМПЕДАНСА БИОЛОГИЧЕСКИХ ЖИДКИХ СРЕД ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО ЭЛЕКТРОННОГО МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ПАЦИЕНТОВ

Зуев А.Л.¹, Судаков А.И.¹, Шакиров Н.В.¹, Мишланов В.Ю.²

¹*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

²*ФГБОУ ВО Пермский государственный медицинский университет им. академика Е.А.Вагнера Минздрава России, Пермь*
zal@icmm.ru

В докладе предложено применение электроимпедансной спирометрии, связанной с регистрацией электрического импеданса биологических сред за период дыхательного цикла, для дистанционного мониторинга таких основных спирометрических медицинских показателей, характеризующих функционирование и состояние дыхательного аппарата пациента, как частота дыхания, скорость выдоха, объем выдыхаемого воздуха, концентрация некоторых компонентов бронхиального секрета. Регистрация колебаний величины импеданса осуществляется с помощью разработанного электроимпедансного спирометрического датчика и портативного аппаратно-программного комплекса, подключаемого к ноутбуку. Программное обеспечение прибора позволяет без участия оператора провести серию опытов с заданными в текстовом файле управления параметрами, обработать полученные данные и вывести их в виде таблиц и графиков.

На модельной электромеханической установке отработана поличастотная регистрация колебаний величины электрического сопротивления пористой среды, пропитанной электролитом, при продувании сквозь нее потока воздуха; экспериментально изучены зависимости параметров импеданса от скорости потока, расхода продуваемого воздуха, концентрации электролита, коэффициента пористости среды. На основе выполненных работ может быть предложен и реализован экспресс-метод удаленного клинического анализа функции дыхательных путей и легочной ткани, оценки динамики течения ряда социально значимых заболеваний легочной системы и эффективности проводимой терапии. Результаты интерактивного опроса будут автоматически помещаться в электронный клинический регистр пациентов для последующего анализа динамики основных респираторных симптомов. Применение таких систем телемедицинской диагностики и диспансерного наблюдения больных позволит организовать оперативное изучение динамики симптомов острых и хронических респираторных заболеваний и автоматический анализ состояния пациента в домашних условиях с целью оценки эффективности реабилитационных программ, том числе с применением солевых ингаляций, содержащих минеральный комплекс проводящих микроэлементов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ № 20-415-596008 р_НОЦ_Пермский край).

ПРОБЛЕМА МАГНИТОГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ФЕРРОЖИДКОСТЕЙ НА БАЗЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ НАЧАЛЬНОЙ ВОСПРИИМЧИВОСТИ

Иванов А.О.¹, Кузнецова О.Б.¹, Камп Ф.²

¹Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,
Екатеринбург Alexey.Ivanov@urfu.ru

²Университет г. Эдинбург, Великобритания

Доклад посвящен возможности разработки математического алгоритма магнитогранулометрического анализа феррожидкостей на базе обработки экспериментальных данных по частотным зависимостям действительной и мнимой частей динамической начальной магнитной восприимчивости [1].

Применительно к феррожидкостям методика магнитогранулометрического анализа включает определение гранулометрического распределения феррочастиц по размерам магнитных ядер и величинам магнитных моментов. Ранее такая методика была успешно реализована на базе обработки статических магнитных свойств феррожидкостей. Для частотных спектров динамической начальной восприимчивости алгоритм предполагает численную аппроксимацию экспериментальных данных на основе некоторой математической модели, описывающей магнитный отклик феррожидкостей. В настоящей работе алгоритм тестируется на данных компьютерного моделирования моно- и бидисперсных дипольных жидкостей при учете только броуновского механизма релаксации магнитного момента. В качестве теоретической модели использованы: теория Дебая, игнорирующая межчастичные взаимодействия; динамическая модель модифицированного среднего поля 1-го порядка [2]; и модифицированная теория Вейсса [3]. Две последние теории учитывают межчастичные магнитодипольные взаимодействия магнитных моментов феррочастиц в рамках различных статистико-механических подходов. Проведенные исследования показывают, что наиболее точно восстанавливаются гранулометрические данные при использовании модифицированной модели Вейсса. Ошибки, возникающие при обработке данных с помощью теории Дебая, оказываются очень большими, что однозначно указывает на важную роль межчастичных взаимодействий в магнитном отклике феррожидкостей.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках программы создания и развития Регионального научно-образовательного математического центра «Уральский математический центр».

Литература

- [1] Ivanov A.O., Kuznetsova O.B., Camp P.J. Dynamic magnetogranulometry of ferrofluids // Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2000, V. 498, art. num. 166153-01-04.
- [2] Ivanov A.O., Zverev V.S., Kantorovich S.S. Revealing the signature of dipolar interactions in dynamic spectra of polydisperse magnetic nanoparticles // Soft Matter, 2016, V. 12, P. 3507-3512.
- [3] Ivanov A.O., Camp P.J. Theory of the dynamic magnetic susceptibility of ferrofluids // Physical Review E, 2018, V. 98, Iss. 5, art. num. R050602-01-05.

ПЛАВАНИЕ НЕМАГНИТНЫХ ТЕЛ В ФЕРРОЖИДКОСТЯХ: ПРИСТЕНОЧНЫЕ ЭФФЕКТЫ

Иванов А.С., Хохрякова К.А.

Институт механики сплошных сред (ПФИЦ УрО РАН), г. Пермь

lesnichiy@icmm.ru, bca@icmm.ru

Плавание немагнитных тел в феррожидкостях представляет собой важную фундаментальную и практическую задачу, рассмотрению которой ранее была посвящена работа [1]. В этой работе силы, действующие на погруженные тела, были изучены экспериментально, численно и теоретически. Основное расхождение данных эксперимента и численного моделирования с одной стороны и аналитического решения с другой стороны, заключалось в описании пристеночных эффектов, когда твердое тело находится в непосредственной близости от стенки контейнера. Дополнительная трудность сравнения этих результатов заключалась в том, что проведенные ранее лабораторные измерения проводились с шагом (по координате) равным 0.1 мм, а характерная толщина придонного слоя составляет порядка 0.2 мм. Таким образом, на экспериментальных графиках удавалось зафиксировать лишь 1-2 точки, соответствующие этой интересной области.

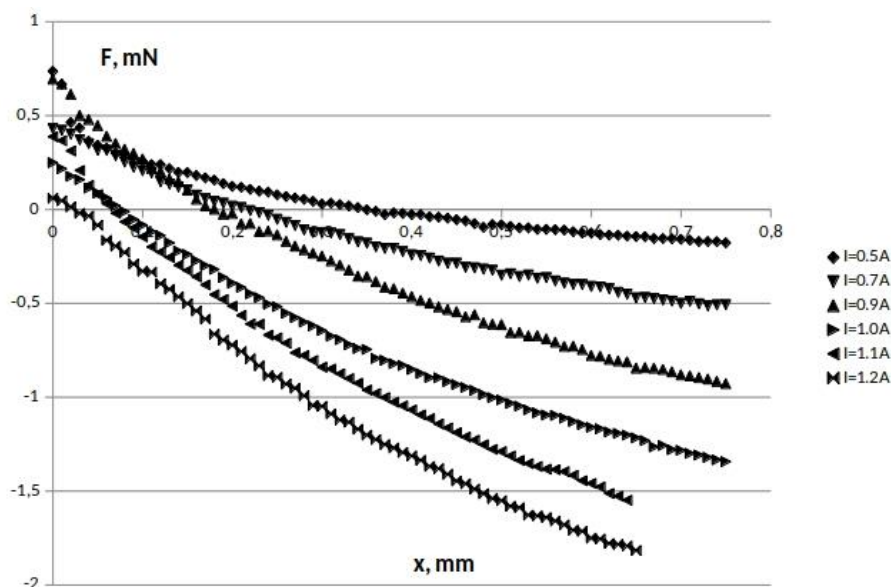


Рис. 1. Сила, действующая на немагнитную сферу, погруженную в магнитную жидкость, в широкой кювете (диаметр кюветы много больше диаметра тела). Различные кривые соответствуют различному значению напряженности внешнего магнитного поля.

В этой связи измерения в придонной области с уже использованными телами и контейнерами были повторены заново, но с шагом по координате 0.01–0.02 мм. Результат представлен на Рис. 1. Как видно, в придонной области сила, действующая на немагнитное тело, действительно меняет свой знак. Этот эффект нужно учитывать на практике для управления транспортом немагнитных тел в намагничивающихся средах.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 20-31-70034.

Литература

[1] Ivanov A.S., Pshenichnikov A.F., Khokhryakova C.A. Floating of solid non-magnetic bodies in magnetic fluids: comprehensive analysis in the framework of inductive approach // Physics of Fluids, 2020, Vol. 32, p. 112007-11.

ПРОСТЫЕ МОДЕЛИ В СОВРЕМЕННОЙ НАУКЕ О КОМПОЗИТАХ

Иванов С.Г.

Composite Studies, Chicago
ivanovsgen@gmail.com

Положим, инженеру надо вычислить модуль упругости однонаправленного композита (ОНК) в направлении волокон по свойствам компонентов. Не сомневаюсь, что он просто возьмет формулу смесей, подставив в нее продольный модуль волокон и модуль матрицы.

Упругие характеристики различных многонаправленных углепластиков в [1] вычисляются с использованием концепции «мастер-слоя». Так как выгода от знания точных значений трех второстепенных упругих констант ОНК минимальна, они заменяются некоторыми усредненными значениями, и в расчетах нужны исключительно модули ОНК вдоль волокон.

Только три характеристики ОНК: модуль, прочность и вязкость разрушения при нагружении вдоль волокон понадобились авторам [2] для успешного предсказания прочности квазиизотропного слоистого углепластика с открытыми отверстиями различного диаметра.

Используя формулы Лехницкого [3] для концентрации напряжений около отверстия, предскажем прочность с открытым отверстием для композитов, применяемых в конструкции крыла самолета, по известным значениям такой прочности для квазиизотропных композитов.

Несмотря на простоту полученных формул, сравнение экспериментальных данных [4,5] с расчетами показывает хорошие результаты для случая сжатия. Кроме того, неплохо предсказывается и прочность с открытым отверстием на сдвиг.

Вторая часть доклада касается оценок электропроводности эпоксидных связующих, модифицированных углеродными нанотрубками (УНТ). Из-за различия в способах перемешивания одна группа образцов имела структуру с шарообразными агломератами в сравнении с достаточно однородным распределением включений в другой группе.

Опираясь на метод самосогласования для эллипсоидальных включений, мы вывели упрощенные формулы, зависящие всего от двух параметров для однородной структуры УНТ. Для описания структуры с шарообразными агломератами УНТ к этим двум параметрам добавлялись еще два, характеризующих такую структуру [6].

Рассмотренные в докладе примеры иллюстрируют практическую целесообразность применения упрощенных расчетов в физике композитов, особенно на предварительной стадии проектирования. Конечно, такие расчеты отнюдь не подменяют собой более сложных подходов, в том числе численных – требующих, однако, гораздо большего числа параметров, далеко не всегда доступных из экспериментов.

Литература

- [1] Tsai S.W., Melo J.D.D., An invariant-based theory of composites, *Compos. Sci. Technol.*, 100, 2014, p. 237–243.
- [2] Furtado C., Arteiro A., Bessa M.A., Wardle B.L., Camanho P.P., Prediction of size effects in open hole laminates using only the Young's modulus, the strength, and the R-curve of the 0° ply, *Composites, Part A*, 101, 2017, p.306–317.
- [3] Лехницкий С.Г. Теория упругости анизотропного тела – Москва: Наука, 1977. – 416 с.
- [4] Marlett K., Hexcel 8552 IM7 Unidirectional Prepreg 190 gsm &35% RC Qualification Material Property Data Report, NCAMP Test report CAM-RP-2009-015 Rev A, NIAR, Wichita State University, 2011.
- [5] Marlett K., Hexcel 8552 AS4 Unidirectional Prepreg 190 gsm &35% RC Qualification Material Property Data Report, NCAMP Test report CAM-RP-2010-002 Rev A, NIAR, Wichita State University, 2011.
- [6] Иванов С.Г., Анискевич А.Н., Кулаков В.Л. Упрощенный расчет удельной электропроводности композитов с углеродными нанотрубками – *Механика композитных материалов*, т. 54, 2018, № 1, с. 89–102.

БИОМЕХАНИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УСИЛИЙ В МЫШЦАХ ШЕИ

Иванова М.Д., Никитин В.Н.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
ivanova-mashaa@mail.ru, nikitinvladislav86@gmail.com

Все процессы, протекающие в различных системах человеческого организма (например, дыхательная, нервная сердечно-сосудистая и т.д.) тесно взаимосвязаны. При нарушении прикуса (взаимного положения верхней и нижней челюстей в сомкнутом состоянии) равновесие головы по отношению к шейному отделу позвоночника нарушается. Шейный отдел позвоночника связан с черепом при помощи атланта (первого шейного позвонка). При изменении прикуса изменяется напряженность (усилия) не только жевательных мышц, поддерживающих нижнюю челюсть, но и мышц всего тела (в первую очередь, мышц шеи). Перераспределение усилий мышц зубочелюстной системы и мышц шеи влияет на усилия в мышцах всего позвоночного столба и опорно-двигательного аппарата в целом. Впоследствии изменение усилий мышц во всем теле может привести к изменению взаимного положения суставов, которые могут стать причинами нарушений симметрии тела человека, а также повлиять на функции, выполняемые этими суставами. По данным статистики Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), ежегодно до 30–50% взрослых людей сталкиваются с болевыми симптомами в области шейного отдела позвоночника [1].

Капанджи в своей работе предложил механизм влияния изменений прикуса зубочелюстной системы человека на форму шейного отдела позвоночника [2]. В предложенной нами модели рассматривается равновесие системы «череп - нижняя челюсть - подъязычная кость» под действием веса головы и при максимальной силе сжатия челюстей. В модель включены жевательные мышцы, связывающие: 1) нижнюю челюсть с черепом и 2) нижнюю челюсть с подъязычной костью, а также мышцы шеи, связывающие: 1) шейные позвонки с черепом и областью верхнего плечевого пояса и 2) шейные позвонки с подъязычной костью и областью верхнего плечевого пояса. В предложенной модели предлагается проследить как изменение положения подъязычной кости влияет на изменение величины и направления реакции в атланте, влияющей на нагружение и форму всего шейного отдела позвоночника. Поставленная задача решалась с помощью использования пакета программ *Maxima*.

В результате моделирования изменения положения подъязычной кости получены следующие результаты: 1) при перемещении подъязычной кости вперед (при этом увеличивается расстояние между подъязычной костью и шейными позвонками) реакция в атланте увеличивается, а также угол между вектором реакции и горизонтальной прямой, которая соответствует в нашей задаче франкфуртской горизонтали; 2) при перемещении подъязычной кости вниз реакция увеличивается, а угол уменьшается.

Таким образом, изменение прикуса или изменение положения любого из элементов зубочелюстной системы человека (нижняя челюсть, подъязычная кость) меняется и величина, и направление реакции в атланте. В нашей работе показано как положение подъязычной кости, которое зачастую меняется при коррекции прикуса, влияет на усилие в атланте, влияющем на весь шейный отдел позвоночника и весь опорно-двигательный аппарат в целом.

Литература

- [1] World health organization. – URL: <https://www.who.int/disability-and-health> (дата обращения: 13.11.2020).
[2] Капанджи А.И. Позвоночник. Физиология суставов. – М.: Эксмо, 2014. – 344 с.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ СИСТЕМЫ АКТИВНОГО ШУМОПОДАВЛЕНИЯ ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Иванцов А.О.^{1,2}, Клименко Л.С.^{1,2}, Любимова Т.П.^{1,2}, Б. Ры³

¹*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

²*Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь*

³*Aix-Marseille Université and Ecole Centrale Marseille, Marseille, France*

lyubimovat@mail.ru, aivantsov@gmail.com

В последнее время все большее применение получают активные глушители шума, принцип действия которых заключается в формировании звукового сигнала той же амплитуды и частоты, что и нежелательный звук, но противоположного по фазе. Активная компенсация основана на принципах суперпозиции и интерференции - наложения в пространстве (на поверхности) двух или нескольких звуковых (вибрационных) волн, при котором в разных точках пространства (поверхности) получается ослабление результирующей волны.

Изучаемая система активного шумоподавления представляет собой заслонку, помещенную внутрь выпускной трубы двигателя. Заслонка совершает вращательные колебания вокруг оси перпендикулярной оси трубы, контролируемые специальным двигателем. Одной из основных целей настоящей работы является определение необходимых характеристик данного двигателя: мощность, крутящий момент. Экспериментальное измерение колебаний давления в выхлопе двигателя показывает наличие широкого спектра шумов. Поэтому непосредственный численный анализ на основе экспериментальных результатов является сложной задачей. Однако спектральный анализ сигнала позволяет выделить гармонику, связанную с частотой работы двигателя, интенсивность данной гармоники значительно выше среднего значения. Более того частота данной гармоники является низкой, и поэтому ее амплитуда уменьшается с расстоянием медленно. Такая разница интенсивностей гармоник, позволяет существенно упростить задачу.

В качестве источника звука рассматривалась круглая пластинка, совершающая вращательные вибрации с заданной частотой и амплитудой. Моделирование осуществлялось с использованием пакета Ansys Fluent. Вычисления проводились на основе полных уравнений динамики сжимаемой жидкости с использованием k- ω модели турбулентности. Моделирование добавочного источника звука, создаваемого заслонкой, проводилось прямым методом, основанным на изменении положения заслонки на каждом шаге по времени. Изучено влияние формы заслонки и параметров входящей звуковой волны на работу системы активного шумоподавления двигателя внутреннего сгорания.

Построены зависимости эффективности шумоподавления при различных параметрах изучаемой системы. В качестве характеристики эффективности шумоподавления используется разность уровня шума на выходе из системы и уровня шума в отсутствие системы (просто труба без заслонки). Получены зависимости амплитуды колебаний статического и полного давления на выходе из системы шумоподавления от амплитуды и радиуса колеблющейся заслонки. Проведено моделирование для различных значений радиуса выхлопной трубы, а также изучено влияние размера расширительной камеры, находящейся перед колеблющейся заслонкой.

ВЛИЯНИЕ БЕГУЩЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ПРОЦЕСС ВЫРАЩИВАНИЯ КРИСТАЛЛА КРЕМНИЯ МЕТОДАМИ НАПРАВЛЕННОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ

Иванцов А.О.¹, Любимова Т.П.¹, Хлыбов О.А.¹

¹ *Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*
aivantsov@gmail.com, lyubimovat@mail.ru, okhlybov@yandex.ru

Проведено параметрическое численное моделирование [1] процессов выращивания кристаллов кремния методами Бриджмена и Осевого Теплопотока на Фронте кристаллизации (ОТФ) [2-3] в присутствии бегущего магнитного поля в условиях, приближенных к лабораторной 2" установке [4], с использованием плоскодонной ампулы со стенкой конечной толщины внутренним диаметром 4.8 см и высотой 16 см. Для случая ОТФ-метода рассмотрен кольцевой нагреватель высотой 4 см и различными диаметрами осевого канала. Исследованы режимы роста кристалла с несколькими различными приложенными осевыми градиентами температуры в диапазоне 10-30 К/см, различными тепловыми режимами погруженного нагревателя, позволявшими варьировать характерную ширину зазора между погруженным нагревателем и фронтом кристаллизации в диапазоне 0.5-1 см, различными скоростями роста кристалла, определявшимися скоростями движения погруженного нагревателя. Исследовано влияние бегущего вдоль оси симметрии вверх и вниз магнитного поля с частотой 50 Гц и индукцией 0-4 мТл на структуру и интенсивность течения в расплаве и форму фронта кристаллизации. Моделирование проведено с использованием пакета численного моделирования ANSYS Fluent в квазистационарной осесимметричной постановке. Примененная модель использует систему уравнений Навье-Стокса в приближении Буссинеска. Учитывались конвективный и диффузионный механизмы теплообмена. Однородное осесимметричное бегущее магнитное поле в низкочастотном безиндукционном приближении [5] вводилось в уравнение движения с использованием пользовательской функции.

Результаты моделирования показали эффективность погруженного нагревателя метода ОТФ как средства управления формой фронта кристаллизации: было получено значительное уменьшение прогиба фронта по сравнению с методом Бриджмена в сходной постановке. Бегущее магнитное поле показало высокую эффективность управления течением расплава и, как следствие, распределением примеси в выращенном кристалле. Показано, что магнитные поля с индукций порядка 3.5 мТл генерируют течение, с интенсивностью, превышающей интенсивность течения, вызванного гравитационно-концентрационными механизмами. Бегущее вверх магнитное поле подавляет морфологическую неустойчивость фронта кристаллизации за счет увеличения прогиба последнего. Бегущее вниз магнитное поле вызывает уменьшение прогиба фронта кристаллизации, что положительно сказывается на радиальной неоднородности примеси в выращенном кристалле.

Литература

- [1] T.P. Lyubimova et al. Influence of submerged heating on vertical Bridgman crystal growth of silicon under travelling magnetic field // Journal of Crystal Growth. 2020. Vol. 531. 125340.
- [2] V.D. Golyshev, M.A. Gonik. A temperature field investigation in case of crystal growth from the melt with a plane interface on exact determination thermal conditions // Crys. Prop. Prep. 1991. Vol. 623. P. 36-38.
- [3] S.V. Bykova et al. Features of mass transfer for the laminar melt flow along the interface // J. Crys. Growth. 2002. Vol. 237-239. P. 1886-1891.
- [4] A. Nouri, Y. Delannoy, K. Zaïdat. Influence of traveling magnetic field on the crystallization of multicrystalline silicon / Proc. Of Int. Conf. Crystalline Silicon for Solar Cells (CSSC5), Taipei, Taiwan, 2010.
- [5] K. Mazuruk. Control of melt convection using travelling magnetic fields // Adv. Space Res. 2002. Vol. 29. N. 4. P. 541-548.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАКОПЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ В ТИТАНОВЫХ СПЛАВАХ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЦИКЛИЧЕСКИХ НАГРУЗОК

Изюмова А.Ю.¹, Вшивков А.Н.¹, Прохоров А.Е.¹, Мубассарова В.А.¹, Пантелеев И.А.¹,
Костина А.А.¹, Плехов О.А.¹

¹ «Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук» –
филиал Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения
Российской академии наук («ИМСС УрО РАН»)

fedorova@icmm.ru, vshivkov.a@icmm.ru, prokhorov.a@icmm.ru, mubassarova.v@icmm.ru,
pia@icmm.ru, kostina@icmm.ru, poa@icmm.ru

Классический способ прогнозирования скорости роста усталостной трещины в металлических конструкциях основывается на соотношении Пэриса, в котором используется коэффициент интенсивности напряжений, являющийся параметром линейно-упругой механики разрушения. Этот подход успешно используется в практической инженерии, но не описывает явлений, лежащих в основе процесса распространения усталостной трещины. Одним из успешно применяемых параметров механика упругопластического разрушения является J-интеграл [1]. К сожалению, критерий разрушения на основе J-интеграла, применим к процессу зарождения трещины, но не описывает стабильного роста усталостной трещины. В основе энергетических критериев разрушения материалов лежит предположение о том, что, с физической точки зрения, определяющим для процесса распространения трещины является баланс энергии в её вершине [2].

Целью настоящей работы является экспериментальное и численное исследование энергетических особенностей процесса распространения трещины в титановых сплавах Вt1-0, OT4-0 и ПТ-3В. Механические испытания плоских образцов с боковым вырезом проводились на сервогидравлической испытательной машине Instron8802. Длина трещины оценивалась методом падения электрического потенциала. Тепловой поток регистрировался контактным датчиком потока тепла. Перемещения в области вершины трещины регистрировались навесным экстензометром. Величина накопленной энергии рассчитывалась как разница между работой пластической деформации и диссипируемой в процессе роста трещины тепловой энергией. Для численного расчета работы пластической деформации использовалась модель комбинированного упрочнения (изотропное упрочнение и модель кинематического упрочнения Шабоса). Для определения накопленной энергии была использована статистико-термодинамическая модель коллективного поведения ансамбля мезодефектов.

В результате получена эволюция величины накопленной энергии в процессе роста усталостной трещины в исследуемых титановых сплавах. Оценена возможность использования накопленной энергии в качестве критерия разрушения.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-31-70018»

Литература

- [1] Матвиенко Ю.Г. Тенденции нелинейной механики разрушения в проблемах машиностроения. — М.–Ижевск : Институт компьютерных исследований, 2015. — 56 с.
- [2] Ranganathan, N., Chalon, F., & Méo, S. Some aspects of the energy based approach to fatigue crack propagation. – International Journal of Fatigue. – 2008. – 30 (10-11). – pp. 1921-1929.

РОСТ МАГНИТНОЙ ЭНЕРГИИ НА НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ ДИНАМО

Соколов Д.Д.^{1,2}, Илларионов Е.А..¹

¹*Московский Государственный университет, Москва*

²*ИЗМИРАН, Троицк, Москва*

sokoloff.dd@gmail.com, egor.mypost@gmail.com

Гидромагнитным динамо называется процесс генерации магнитного поля в потоке проводящей жидкости. Считается, что в результате работы динамо формируются магнитные поля большинства небесных тел. Особый интерес вызывает поведение магнитной энергии в случайном потоке проводящей жидкости. При описании работы динамо, вообще говоря, необходимо учитывать пусть и небольшую омическую диссипацию магнитного поля. Тем не менее на самом первом этапе работы динамо омической диссипацией еще можно пренебречь. В этом случае сложные уравнения динамо можно свести к системе обыкновенных дифференциальных уравнений, рассматриваемых вдоль одной лагранжевой траектории. В этом случае возможно далеко идущее аналитическое исследование скорости роста магнитной энергии при различных предположениях о статистических свойствах случайного потока. Мы представляем эти результаты в докладе.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОСТАТОЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ КОМПОЗИТНОЙ ПАНЕЛИ В ПРОЦЕССЕ ИЗГОТОВЛЕНИЯ

Ильиных Г.В., Сметанников О.Ю., Марамыгин А.В.

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
ilinykh.pnpu@yandex.ru, sou2009@mail.ru, maramyginav@gmail.com*

Работа посвящена разработке комплексной методики прогнозирования напряженно-деформированного состояния изделий на основе тканых композиционных материалов в процессе их изготовления. В данном исследовании рассмотрена многослойная панель сложной формы, включающая в себя слои углепластика, стеклопластика, а также сотовый наполнитель. Начальными этапами процесса изготовления изделия являются выкладка тканых препрегов и наполнителей, установка вакуумного мешка, нагрев и повышение давления в автоклаве. Предполагается, что остаточные напряжения изделия на этих этапах релаксируют в процессе финишного нагрева и не оказывают существенного влияния на остаточную деформацию готового изделия. На последующем этапе охлаждения происходит накопление остаточных деформаций. Такие факторы изготовления как неравномерное поле температур, неоднородность свойств материалов конструкции, дефекты укладки слоёв и др. приводят к существенным остаточным деформациям, из-за которых после высвобождения изделия из оснастки происходит коробление изделия, и требования к его форме не выполняются. В пакете ANSYS Mechanical APDL построена параметрическая конечно-элементная модель заключительных этапов изготовления, которая позволяет учесть указанные факторы и спрогнозировать НДС изделия. Моделирование формования представляет собой краевую квазистатическую контактную задачу термомеханики. Нестационарное температурное поле определяется из соответствующей задачи теплопроводности.

Для идентификации констант моделей Прони и Вильямса-Ланделла-Ферри, описывающих термовязкоупругое поведение материалов, входящих в состав изделия, проведены соответствующие испытания. Проблема нахождения эффективных ортотропных вязкоупругих характеристик отдельных материалов в составе изделия решена с помощью численных экспериментов в рамках многоуровневого подхода [1].

Получено напряженно-деформированное состояние изделия. Форма и размер остаточных деформаций соответствуют экспериментальным данным. Разработана методика коррекции формы оснастки, основанная на многоэтапном изменении координат её рабочей поверхности путём добавления к ним полученных в прямом расчёте остаточных смещений с обратным знаком. Показано, что для рассматриваемой конструкции достаточно одного шага коррекции. Отклонение полученных в результате модификации оснастки контрольных размеров панели соответствует требованиям к изделию. Предложен алгоритм аппроксимации скорректированной формы оснастки системой параллельных сечений круглой формы. Таким образом, полученные результаты могут быть использованы при проектировании скорректированной формы оснастки, устраняющей дефекты геометрии панелей данного типа.

Литература

[1] Многоуровневое математическое моделирование термомеханического поведения тканевых композитов / Г. В. Ильиных, О. Ю. Сметанников // Научно-технический вестник Поволжья. - 2018. - № 10. - С. 105-109.

ЗАДАЧИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТРУБ С ПОКРЫТИЯМИ И ВТУЛОК С УЧЕТОМ СЛОЖНЫХ ПРОФИЛЕЙ КОНТАКТИРУЮЩИХ ТЕЛ

Казаков К.Е.

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук, Москва
kazakov-ke@yandex.ru

В работе описывается постановка и построение аналитического решения задач взаимодействия систем жестких цилиндрических втулок и труб с наружным покрытием в случае, когда контактирующие поверхности описываются сложными функциями. Учет подобных особенностей важен при расчете напряженно-деформированного состояния взаимодействующих тел, т.к. их наличие может повлиять на долговечность рассматриваемого соединения.

Поставленная задача сводится к необходимости исследовать и строить решение системы смешанных интегральных уравнений (т.е. уравнений, содержащих интегральные операторы различного типа), в состав которых входят функции, описывающие профили втулок (их переменный внутренний радиус) и толщины покрытия под каждой из втулок. Эти функции могут быть быстро изменяющимися, поэтому нахождение аналитического решения полученной системы уравнений при помощи классических подходов, не учитывающих особенности входящих в нее функций, может привести к существенным ошибкам при реальных расчетах. Это связано с тем, что эти решения представляют из себя бесконечные сходящиеся функциональные ряды, однако исследователи вынуждены ограничиваться конечным, сравнительно небольшим, числом членов ряда при проведении расчетов (порядка 30–50), так как при большем их числе начинает накапливаться вычислительная погрешность. Однако такого количества слагаемых зачастую не достаточно для корректного описания, например, свойств покрытия или профилей втулок. В настоящей работе описан подход, позволяющий учесть особенности входящих в уравнения функций и построить аналитическое решение. Оно также представляет из себя бесконечный сходящийся функциональный ряд, однако в нем в явном виде выделены функции, описывающие профили поверхностей. Это позволяет при проведении реальных численных расчетов ограничиться сравнительно небольшим количеством членов этого ряда.

При помощи полученного решения можно проанализировать влияние профиля покрытия, форм втулок и их близости, реологических свойств труб на распределение контактных давлений под втулками.

ПРИМЕНЕНИЕ БАЗИСА ВЕКТОРНЫХ СФЕРИЧЕСКИХ ФУНКЦИЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОРОГА ТЕРМОМАГНИТНОЙ КОНВЕКЦИИ В ШАРОВОЙ ПОЛОСТИ

Казанцев П.Н., Краузин П.В.

Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь
waidykpn@gmail.com, krauzin@gmail.com

Рассмотрена задача о конвективной устойчивости магнитной жидкости в шаровой полости, окруженной бесконечным массивом. Коэффициенты теплопроводности и магнитные проницаемости массива и жидкости равны λ_m , λ_j , μ_m , μ_j , соответственно. Вдали от полости заданы вертикальное однородное магнитное поле и температурный градиент, соответствующий подогреву снизу.

Система уравнений термомагнитной конвекции несжимаемой жидкости [1] сводится к задаче о собственных значениях, где собственные функции – амплитуды критических бесконечно малых возмущений, а собственные числа – критические гравитационное и магнитное числа Рэлея. Для отыскания критических чисел и возмущений используется метод Галеркина [2]. Применяется вариант метода Галеркина, в котором разложение температуры и магнитного потенциала по функциональному базису не является независимым, а определяется из точного решения соответствующих уравнений системы термомагнитной конвекции. В качестве базисных функций скорости выбраны первые восемь векторных сферических гармоник [3].

Нижним уровням полученного спектра критических чисел Рэлея соответствуют движения жидкости без радиальной компоненты скорости. При этом, первой моде неустойчивости отвечает одиночный конвективный вихрь с горизонтальной осью, как и в случае гравитационной тепловой конвекции. Показано, что магнитное поле понижает порог конвекции. Представлены зависимости критических чисел от относительной теплопроводности $\lambda = \lambda_j/\lambda_m$ и относительной магнитной проницаемости $\mu = \mu_j/\mu_m$. Данные зависимости согласуются с результатами аналогичной задачи для полости в форме горизонтального цилиндра [4]. Проведен сравнительный анализ результатов для полиномиального базиса и базиса векторных сферических гармоник.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (№ 20-01-00491).

Литература

- [1] Баштовой В.Г., Берковский Б.М., Вислович А.Н. Введение в термомеханику магнитных жидкостей – М.: ИВТАН, 1985. – 188 с.
- [2] Флетчер К. Численные методы на основе метода Галеркина – М.: Мир, 1988. – 352 с.
- [3] Barrera R. Vector spherical harmonics and their application to magnetostatics // European Journal of Physics. 1985. Vol. 6, no. 4. P. 287–294.
- [4] Krakov M.S., Nikiforov I.V. Natural convection in a horizontal cylindrical enclosure filled with a magnetic nanofluid: Influence of the uniform outer magnetic field // International Journal of Thermal Sciences. 2018. Vol. 133. P. 41–54.

КОНВЕКЦИЯ ВЯЗКОПЛАСТИЧЕСКОЙ ЖИДКОСТИ В КВАДРАТНОЙ ПОЛОСТИ

Казимарданов М.Г.¹, Любимова Т.П.¹

¹Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
kazimardanov@mail.ru, lyubimovat@mail.ru

Рассмотрена двумерная задача о конвективном движении вязкопластической жидкости в квадратной полости. На вертикальных твердых границах полости задавались постоянные разные температуры: $T=T_c$ при $x=0$ и $T=T_n$ при $x=L$, $T_n>T_c$. В качестве граничных условий на верхней и нижней твердых стенках принимались условие прилипания и линейное изменение температуры от T_c до T_n по x .

Задача решалась численно с помощью пакета прикладных программ ANSYS Fluent. В данном пакете реализована возможность исследования течений неньютоновских жидкостей. В настоящей работе в качестве модели неньютоновской жидкости была выбрана модель Балкли-Гершеля, описывающая нелинейно-вязкопластическое поведение. При определенных реологических параметрах эта модель переходит в модель неньютоновской жидкости, поведение которой также моделировалось в качестве предельного случая.

Задача о конвекции вязкопластической жидкости в квадратной области при нагреве сбоку была впервые исследована в работе [1] в рамках регуляризованной реологической модели – модели Уильямсона. Обнаружено, что, в отличие от случая ньютоновской жидкости, при малых значениях числа Релея наблюдается очень слабое конвективное движение, а при достижении некоторого значения числа Релея Ra_* наблюдается резкий рост интенсивности течения, определена структура зон квазитвердого и вязкопластического течения при различных числах Релея. Сформулирован простой вариационный принцип, с помощью которого найдено пороговое значение числа Релея Ra_* , при котором возникает конвекция в случае вязкопластической жидкости Бингама.

В настоящей работе исследовано возникновение конвекции жидкости Балкли-Гершеля в нагреваемой сбоку квадратной области. Параметры жидкости выбирались теми же, что в работе [1]. Расчеты, проведенные при различных числах Релея в диапазоне от 2500 до 20000, показали, при $Ra_* = 8000$ в центральной части полости имеется большая зона квазитвердого движения, окруженная узкой кольцевой зоной вязкопластического течения, и застойные зоны в углах полости. При $Ra = 16000$ зона квазитвердого движения имеет форму креста. При $Ra=20000$ зона квазитвердого движения в центре исчезает, остаются лишь застойные зоны в углах полости. При увеличении значения числа Релея эти зоны уменьшаются в размере.

По результатам проведенных расчетов построена зависимость максимального значения функции тока в полости от числа Релея. Полученное в расчетах для жидкости Балкли-Гершеля пороговое значение числа Релея, при котором возникает конвективное движение в нагреваемой сбоку квадратной полости, близко к значению, полученному с помощью вариационного принципа для жидкости Бингама в работе [1].

Литература

[1] Любимова Т.П. Численное исследование конвекции вязкопластичной жидкости в замкнутой области // МЖГ. – 1977. – №1. – С. 3–8.

АНАЛИЗ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛЕЙ ПЛАСТИЧЕСКОГО ВЫШАГИВАНИЯ К ОШИБКАМ ЭКСПЕРИМЕНТА

Кайгородцева А.А.^{1,2}, А.В. Шутов А.В.^{1,2}, Захарченко К.В.^{1,3}, Капустин В.И.^{1,3}

¹*Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск*

²*Новосибирский государственный университет, Новосибирск*

³*Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск*

a.a.kaigorodtseva@gmail.com, alexey.v.shutov@gmail.com

В работе анализируются закономерности накопления необратимой деформации в титановом сплаве ВТ6, под воздействием циклического нагружения с ненулевым средним напряжением. Для описания поведения материала используются модели комбинированного изотропно-кинематического упрочнения. Реализованы три типа феноменологических моделей пластического вышагивания (ратчетинга). Рассматривается модель Армстронга-Фредерика (AF), а также первая и вторая модели Оно-Ванга (OW-I и OW-II). Предложено новое правило изотропного упрочнения, основанное на применении длины дуги в пространстве полных деформаций и параметра Одквиста. На основе новых определяющих соотношений построены вычислительные алгоритмы.

Для определения оптимального набора параметров материала применяется вложенная процедура идентификации, реализованная с помощью комбинации безградиентного метода Нелдера-Мида и метода Левенберга-Марквардта. Все модели показывают хорошее соответствие результатов моделирования с экспериментальными данными, при этом с увеличением количества параметров точность моделирования растет. Дополнительная валидация параметров и моделей проведена сравнением расчетных и экспериментальных данных по диссипативному разогреву образца.

Для оценки чувствительности параметров материала к ошибкам в экспериментальных данных развит метод из [1], [2]. Разработана новая механически обоснованная метрика в пространстве параметров для моделей пластического вышагивания. Чувствительность параметров вычисляется с помощью указанной метрики.

Установлено превосходство моделей AF и OW-II над моделью OW-I с точки зрения устойчивости процедуры идентификации. Показано, что представленная методика позволяет обнаружить перепараметризованные модели.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 19-19-00126).

Литература

- [1] Shutov A. V., Kaygorodtseva A. A. Parameter identification in elasto-plasticity: distance between parameters and impact of measurement errors. // ZAMM. – 2019. – Т. 99 (8). – С. e201800340.
- [2] Shutov A. V., Kaygorodtseva A. A. Sample shapes for reliable parameter identification in elasto-plasticity // Acta Mechanica. – 2020. – Т. 231. – №. 11. – С. 4761-4780.

О ВЛИЯНИИ ПОВЕРХНОСТНОЙ ЭНЕРГИИ НА ОРИЕНТАЦИОННУЮ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ СЛОЯ НЕМАТИЧЕСКОГО ЖИДКОГО КРИСТАЛЛА

Калугин А.Г.¹, Павлов Д.В.¹

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва
kalugin@mech.math.msu.su, pavlovdmv@mail.ru

Нематические жидкие кристаллы представляют собой среды, обладающие дополнительным макроскопическим параметром, задающим анизотропные свойства, - единичным вектором ориентации (директором) $\vec{n}$, описывающим среднее направление молекул, которые у таких сред как правило сильно вытянуты, в частице среды. Предполагая, что анизотропная часть свободной энергии нематика квадратична по градиентам директора, из свойств симметрии среды можно получить выражение для свободной энергии упругости ориентации Франка, которая с точностью до тождественных преобразований в общем случае принимает вид

$$2F_V = K_{11}(\operatorname{div}\vec{n})^2 + K_{22}(\vec{n} \cdot \operatorname{rot}\vec{m})^2 + K_{33}|\vec{n} \times \operatorname{rot}\vec{m}|^2 + K_{24}(\nabla_i n_j \cdot \nabla^j n^i - (\nabla_k n^k)^2)$$

где K_{ii} - постоянные Франка.

Для поверхностной энергии нематика обычно рассматривается модель Рапини-Папулара $2F_\Sigma = 2\gamma + W(1 - (\vec{n} \cdot \vec{m})^2)$, где γ и W - постоянные коэффициенты, $\vec{m}$ - единичная ось легкого ориентирования, которая образует заданный угол с нормалью к границе среды.

В нематических жидких кристаллах экспериментально наблюдаются периодические структуры, которые возникают при однородных внешних воздействиях и граничных условиях в плоских слоях [1,2]. В предыдущей работе [3] было дано теоретическое объяснение таких эффектов и выведена связь между периодом наблюдаемых структур и параметрами среды при совпадающих значениях W на границах слоя в рамках модели Рапини-Папулара. В настоящей работе рассмотрены решения для периодических возмущений однородного плоского слоя нематика при разных значениях анизотропной части поверхностной энергии на границах. Получено соотношение, связывающее период таких возмущений, толщину слоя и параметры среды. Показано, как величина коэффициента W влияет на ориентационную неустойчивость слоя. Описан механизм, обеспечивающий ориентационную устойчивость слоя нематика за счет поверхностной энергии.

Также в работе рассмотрена модель поверхностной энергии с фиксированным вектором $\vec{m}$, когда анизотропная часть поверхностных сил имеет касательную (азимутальную) к границе составляющую. Для такой модели решена задача о периодических возмущениях в полубесконечном однородном слое нематика. Выведена связь между параметрами среды и периодом полученного решения, показано, как азимутальные поверхностные силы влияют на ориентационную неустойчивость слоя нематика.

Литература

- [1] Delabre U., Richard C., Cazabat A.M. Thin nematic films on liquid substrates – Phys. Chem. B 2009. V. 113(12). – P. 3647–3652.
- [2] Голованов А.В., Казначеев А.В., Сонин А.С. Ориентационная неустойчивость лиотропного нематика при течении – Известия РАН: серия физическая. 1998. Т. 62. № 8. – С. 1658-1661.
- [3] Kalugin A.G., Pavlov D.V. About orientational instability in nematic liquid crystal films – Journal of Physics: Conference Series. 2019. V. 1392. – P. 012009-1-012009-5.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СФЕРИЧЕСКИХ ОПОРНЫХ ЧАСТЕЙ МОСТОВ С РАЗНОЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ КОНФИГУРАЦИЕЙ УГЛУБЛЕНИЙ ПОД СМАЗОЧНЫЙ МАТЕРИАЛ

Каменских А.А., Носов Ю.О.

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

В России и многих странах мира одним из актуальных направлений развития является создание эффективно функционирующих транспортно-логистических систем, которые позволяют связать отдаленные регионы и населенные пункты. С увеличением пропускной способности и нагрузок на мостовые сооружения наблюдается увеличение научных и инженерных разработок связанных с рационализацией и оптимизацией ответственных элементов транспортных систем, таких как опорные части мостовых пролетов [1]. Исследования направлены на оценку влияния толщины и положения антифрикционных прослоек, геометрической конфигурации слоев скольжения и свойств материалов, из которых они изготовлены, на деформационное поведение опорных частей мостов [2]. Особый интерес представляет анализ влияния технологических углублений под смазочный материал на работу конструкций: положение и геометрическая конфигурация углублений.

В рамках работы выполнено моделирование автоматизированного создания углублений под смазочный материал в сферическом антифрикционном полимерном слое трехмерной конструкции опорной части мостового строения в виде канавок и сферических лунок. Автоматизирован процесс создания объемов смазочного материала в контактном узле. Выполнена параметризация моделей относительно толщины слоя скольжения, расположения и количества углублений под смазочный материал.

Исследования выполнены на примере сферического слоя скольжения из модифицированного фторопласта. При фрикционном контактом деформировании полимерного слоя стальными плитами опорной части при номинальной нагрузке 1000 кН. Физико-механические и фрикционные свойства материалов получены экспериментально д.ф.-м.н. Адамовым А.А. в ИМСС УрО РАН (г. Пермь).

В работе выполнен анализ влияния геометрической конфигурации углублений со смазочным материалом на напряженно-деформированное состояние исследуемой конструкции. Выполнена оценка влияния геометрии углублений на параметры поверхностей сопряжения прослойки из модифицированного фторопласта с плитами опорной части с заранее не известным распределением статусом контактных состояний. Проанализировано деформирование слоя скольжения, осадка конструкции, характер распределения и уровень контактного давления и контактного касательного напряжения для разного вида технологических углублений под смазочный материал в антифрикционной прослойке сферической опорной части.

Литература

- [1] Block T., Eggert H., Kauschke W. Lager im Bauwesen. – New-York: John Wiley & Sons Limited, 2015. – 646 p.
- [2] Адамов А.А., Каменских А.А., Панькова А.П. Численный анализ геометрической конфигурации сферической опорной части с антифрикционной прослойкой из разных материалов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2020. – № 4. С. 15-26.

О КОНТАКТНОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ПОЛИМЕРНОГО СЛОЯ С ПОЛИРОВАННОЙ СТАЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Каменских А.А., Носов Ю.О.

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

Полимерные покрытия и прослойки позволяют существенно повысить эффективность работы и срок службы деталей, механизмов, оборудования и сооружений различного назначения. Поэтому они получили широкое распространение в медицине, строительстве, недропользовании, авиации и других областях промышленности [1-3]. А анализ когезионного и адгезионного взаимодействия с металлическими и не металлическими элементами конструкций при разной геометрической конфигурации защитного слоя является одной из актуальных задач механики. В данной работе рассмотрено влияние толщины прослойки и геометрической конфигурации технологических углублений на деформирование полимерного слоя в рамках фрикционного контактного взаимодействия с плоской металлической поверхностью.

В рамках исследования построены параметризованные модели контакта полимерного слоя с одним технологическим углублением разной геометрической конфигурации (сферическая, трапецевидная и другие типы лунок) сопряженного с плоской полированной металлической поверхностью. Смоделированы 4 варианта скругления основания трапецевидного технологического углубления от 0,5 до 2 мм. Параметризация численных моделей учитывает три варианта толщины полимерной прослойки 4, 6 и 8 мм, при постоянной глубине технологических отверстий: сферические лунки – 2 мм; трапецевидные углубления с учетом и без учета скруглений основания – 3 мм. Объем материала в технологических углублениях отсутствует. Численное моделирование поведения материала защитного слоя реализовано в рамках деформационной теории пластичности с учетом возможности появления больших деформаций в объеме полимерной прослойки. На поверхности сопряжения реализовано фрикционное контактное взаимодействие типа поверхность-поверхность с заранее не известным характером распределения зон контактных состояний (прилипание, проскальзывание, полное отлипание).

Выполнена серия численных экспериментов о деформировании полимерного слоя плоской полированной стальной плитой для широкого диапазона рабочих давлений от 5 до 90 МПа. Установлены качественные и количественные закономерности деформирования профиля технологического углубления при фрикционном контакте и изменения контактных параметров при разной геометрии технологических углублений для всех вариантов толщины полимерного слоя.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края в рамках научного проекта № 20-48-596009.

Литература

- [1] Протасов В.Н. Теория и практика применения полимерных покрытий в оборудовании и сооружениях нефтегазовой отрасли. – М.: Недра, 2007. – 373 с.
- [2] Каменских А.А., Труфанов Н.А. Численный анализ напряженного состояния сферического контактного узла с прослойкой из антифрикционного материала // Вычислительная механика сплошных сред. – 2013. – Т. 6, № 1. – С 54 – 61.
- [3] Pinchuk L.S., Nikolaev V.I., Tsvetkova E.A., Goldade V.A. Tribology and biophysics of artificial joints. – London: Elsevier, 2006. – 350 p.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ СФЕРИЧЕСКОГО СЛОЯ СКОЛЬЖЕНИЯ ОТНОСИТЕЛЬНО СТАЛЬНЫХ ПЛИТ ОПОРНОЙ ЧАСТИ МОСТОВОГО СТРОЕНИЯ НА ДЕФОРМИРОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ

Каменских А.А., Струкова В.И.

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
anna_kamenskih@mail.ru, veloiv_pstu@mail.ru*

Опорные части мостов относятся к ответственным элементам мостостроительных конструкций, так как они воспринимают вертикальные и горизонтальные нагрузки от мостового пролета. К таким конструкциям предъявляются повышенные требования относительно надежности, долговечности и износостойкости [1-2]. А с высокими темпами развития транспортных систем и увеличением пропускной способности эстакад и мостов вопрос о модернизации классических конструкций опорных частей является актуальной междисциплинарной задачей.

Работа направлена на оценку влияния положения сферического слоя скольжения относительно стальных плит опорной части мостового пролета на напряженно-деформированное состояние узла. Рассмотрено два варианта положения антифрикционной прослойки: прослойка, нанесенная на сферический сегмент, и прослойка, расположенная в сферическом вырезе нижней стальной плиты. В рамках исследования выполнена оценка влияния свойств материала, из которых изготовлен слой скольжения, на работу конструкции. Рассмотрено шесть вариантов материалов антифрикционной прослойки: современные полимеры и композиты на их основе. Физико-механические свойства материалов получены экспериментально д.ф.-м.н. Адамовым А.А. в ИМСС УрО РАН (г. Пермь) [1]. Еще одним из направлений исследования стал анализ влияния угла наклона полимерного слоя относительно стальных плит, рассмотрено 10 вариантов углов наклона торца антифрикционной прослойки от 0 до 45°.

В рамках первого этапа исследования для конструкций со сферической прослойкой из модифицированного фторопласта выполнена оценка влияния углов наклона торца слоя скольжения на параметры зон контакта и деформационные характеристики для двух вариантов контактного узла. Установлено, что при углах наклона торца 25 и 40° для конструкции опорной части с прослойкой, расположенной в нижней стальной плите, и 0° для конструкции с прослойкой, нанесенной на сферический сегмент, наблюдается наиболее благоприятное распределение контактных параметров и деформационных характеристик.

В рамках второго этапа выполнен сравнительный анализ влияния материалов, из которых изготовлен антифрикционный слой скольжения, на деформирования двух вариантов конструкций опорных частей для разных углов наклона торца. Выполнено сравнение напряженно-деформированного состояния опорных частей с конструкциями со стандартным углом наклона торца антифрикционной прослойки 30°.

Литература

- [1] Block T., Eggert H., Kauschke W. Lager im Bauwesen. – New-York: John Wiley & Sons Limited, 2015. – 646 p.
- [2] Адамов А.А., Каменских А.А., Панькова А.П. Численный анализ геометрической конфигурации сферической опорной части с антифрикционной прослойкой из разных материалов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2020. – № 4. С. 15-26.
- [3] Адамов А.А., Каменских А.А., Носов Ю.О. Математическое моделирование поведения современных антифрикционных полимеров // Прикладная математика и вопросы управления. – 2019. – № 4. - С. 43-56.

АКТИВНОЕ ПОДАВЛЕНИЕ РЕЗОНАНСНЫХ КОЛЕБАНИЙ ДВУХ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ПЛАСТИН, СОДЕРЖАЩИХ ЖИДКОСТЬ

Каменских А.О., Лекомцев С.В., Ошмарин Д.А., Юрлов М.А.

*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
lekomtsev@icmm.ru, oshmarin@icmm.ru, yurlov@yandex.ru*

Демпфирование колебаний тонкостенных конструкций, контактирующих с жидкостью, является важной задачей во многих направлениях техники. Особый интерес представляют системы активного подавления, которые могут управлять поведением конструкции в зависимости от её состояния. Устройства такого рода состоят, как правило, из сенсоров, контроллера и актуаторов. Информация с сенсоров (перемещения, ускорения, деформации) поступает на контроллер, который рассчитывает ответную реакцию системы и пытается привести её в желаемое состояние с помощью управляющего воздействия, переданного на актуаторы. При использовании такой системы можно добиться практически полного исчезновения колебаний в общем случае произвольного вида. В условиях резонанса при известной и не зависящей от времени частоте внешнего возбуждения колебания могут быть эффективно подавлены внешней гармонической силой, действующей в противоположном прогибу направлении. На основе этого принципа в данном исследовании спроектировано устройство активного демпфирования резонансных колебаний и продемонстрирована его работоспособность.

Объектом исследования в эксперименте является массив из двух прямоугольных пластин, содержащих жидкость в зазоре между ними. Колебания возбуждаются электромагнитным полем. С этой целью на поверхность одной из пластин приклеивается лёгкий неодимовый магнит, рядом с которым позиционируется катушка. На неё через усилитель мощности подаётся переменный ток заданной частоты. Возникающая электромагнитная сила действует на магнит и приводит пластины в движение. Подавление резонансных колебаний осуществляется пьезоэлементами ЦТС 19, приклеенными с наружной стороны пластин. Их оптимальное расположение определяется из решения задачи по поиску максимума коэффициента электромеханической связи, в которой собственные частоты колебаний вычисляются с использованием метода конечных элементов. Один из пьезоэлементов используется в качестве сенсора, а другой выступает актуатором. Система контроля состоит из 16-битного АЦП, программного обеспечения и 16-битного ЦАП, который через усилитель подает управляющий сигнал на актуатор для корректировки состояния конструкции. Программа определяет частоту вынужденных колебаний на основе данных, полученных при помощи пьезоэлектрического сенсора, и создает управляющий сигнал, который осуществляет гармоническое воздействие через второй пьезоэлемент. Его амплитуда вычисляется на основе предварительно полученной передаточной функции. Сдвиг фаз между возмущением и реакцией системы, который обусловлен диссипативными свойствами конструкции и жидкости, распространением возмущений через жидкость от одной пластины к другой, а также задержками программно-аппаратной части системы подавления, подбирается с помощью ПИД-контроллера.

Продemonстрирована возможность подавления резонансных колебаний исследуемой конструкции с помощью разработанного устройства. Приведено сравнение с пассивным способом демпфирования, в котором пьезоэлементы соединяются с внешней электрической RL -цепью.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 18-71-10054).

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ СТЕНКИ РЕТОРТЫ В АППАРАТЕ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ТИТАНА.

Карасев Т.О.^{1,2}, Теймуразов А.С.², Перминов А.В.¹

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь

²Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
karasev.t@icmm.ru, tas@icmm.ru, perminov1973@mail.ru

Работа посвящена численному изучению теплового режима поверхности реторты в аппарате для производства титана. Рассматривается задача сопряженного теплообмена между стенкой цилиндрической реторты и стенкой печи с нагревателями. Между стенками находится зазор, через который прокачивается воздух. Целью работы является получение оценок для температурного режима стенки реторты и коэффициента теплоотдачи с ее поверхности при различных режимах нагрева и охлаждения аппарата. Данные о распределении тепловых потоков на стенках реторты необходимы для расчета турбулентных конвективных течений жидкого магния внутри реторты, поскольку неоднородность температуры может оказывать существенное влияние на процессы, происходящие у нее внутри [1]. Разработанная модель позволяет рассчитать тепловые режимы стенки реторты, внешней стенки печи и зазора с воздухом между ними по всей длине прямого вертикального участка высотой 0,5 м. Математическая модель основывается на системе нестационарных уравнений Навье–Стокса в осесимметричной постановке с применением RANS (Reynolds-averaged Navier–Stokes equations) подхода к описанию турбулентных полей. Модель позволяет наряду с механизмами вынужденной конвекции и теплопроводности учитывать также и радиационный теплообмен между двумя противоположными стенками. Исследованы четыре варианта нагрева, возможные к реализации в процессе восстановления титана методом Кролля. В зависимости от того, в верхней или нижней части реактора располагается моделируемый участок, средняя температура воздуха в зазоре составляла 25°C или 250°C.

Получены оценки для необходимой скорости обдува, позволяющей сохранять стенки реторты в рабочем диапазоне температур (от 750 до 950°C) во всех режимах нагрева. Для наиболее интенсивного нагрева эта скорость составляет 15 м/с, а для минимального нагрева достаточно 1 м/с. Показано, что температура вдоль выбранного участка существенно неоднородна, в среднем разность между ее значениями в верхней и нижней его частях составляет около 50°C. Для коэффициента теплоотдачи с боковой поверхности реторты построены зависимости от вертикальной координаты. Их применение в дальнейшем позволит задавать более близкие к реальным условия теплообмена на стенках реторты при моделировании турбулентной конвекции магния внутри нее. Проведено сопоставление значений коэффициента теплоотдачи, полученных в результате численных расчетов, со значениями, найденными по известной эмпирической формуле для плоской бесконечной поверхности с постоянным тепловым потоком через нее. Установлено, что результаты близки друг к другу только в части рассмотренных режимов нагрева и обдува. Обнаружено, что в значительном диапазоне использованных в расчетах параметров наблюдаются заметные отличия численных значений от упрощенных оценок, наибольшая разница имеет место вблизи входа в канал, где градиенты температуры максимальны [2].

Литература

- [1] Карасев, Т. О., Теймуразов, А. С. Моделирование турбулентной конвекции жидкого магния в аппарате восстановления титана в рамках подходов RANS и LES // Вычислительная механика сплошных сред, 2019, Т.12, №4, 353-365.
- [2] Карасев Т.О., Теймуразов А.С., Перминов А.В. Численное исследование теплоотдачи стенки титанового реактора при воздушном охлаждении // Вычислительная механика сплошных сред, 2020, Т.13, №4, С. 424-436

ДИНАМИКА ФАЗОВОГО ВКЛЮЧЕНИЯ В ОДНОСВЯЗНОЙ ПОЛОСТИ ПРИ ВРАЩАТЕЛЬНЫХ ВИБРАЦИЯХ

Карпунин И.Э.¹, Козлов Н.В.², Plouraboué F.³

¹*Пермский государственный гуманитарно-педагогический университет, Пермь*

²*Институт механики сплошных сред Уральского отделения РАН, Пермь*

³*Институт механики жидкостей Тулузы Национального центра научных исследований, Тулуза, Франция*

karpunin_ie@pspu.ru, kozlov.n@icmm.ru, fplourab@imft.fr

Управление массообменом на границе раздела представляет большой интерес для многих химических и биологических технологий. Классическим примером служит жидкостная экстракция, при которой происходит перенос вещества через границу раздела несмешивающихся жидкостей. Законы движения капель и массопереноса в них определяются многими параметрами [1]. Интенсификация массопереноса может быть осуществлена с помощью потоков, доставляющих реагенты к границе раздела. В частности, возможно возбуждение осредненных течений в результате колебаний границы раздела [2–4].

В настоящей работе экспериментально изучается динамика фазового включения в коаксиальном слое жидкости, разделенном радиальной перегородкой. Рабочий объем контейнера заполнен жидкостью, внутрь которой вводится капля второй жидкости, не смешивающейся с основным объемом жидкости, или газовый пузырёк. Фазовое включение имеет меньшую плотность по сравнению с окружающей жидкостью. Слой совершает вращательные колебания как единое целое с нулевым средним вращением. Такое движение слоя приводит к генерации колеблющегося гармонически азимутального сдвигового потока, который в свою очередь используется для возбуждения колебаний включения.

Эксперименты показывают, что вращательные колебания полости приводят к колебаниям фазового включения, при этом его геометрический центр движется по синусоидальной траектории, которая определяется колебаниями полости. На фоне колебательного движения включения также наблюдается его периодическая деформация, то есть граница раздела начинает осциллировать. Характер колебаний границы зависит от мгновенного направления движения фазового включения и частоты колебаний полости. Проведенные исследования свидетельствуют, что вращательные колебания коаксиального односвязного слоя могут быть использованы для возбуждения колебаний границы фазового включения в жидкости. Данный механизм применим для интенсификации массообмена между каплями и окружающей жидкостью.

Работа выполнена при поддержке Правительства Пермского края (грант МИГ С-26/174.9 и грант для ведущей научной школы С-26/1191).

Литература

- [1] Wegener M., Paul N., Kraume M. Fluid dynamics and mass transfer at single droplets in liquid/liquid systems – International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014. – Vol. 71. – P. 475-495.
- [2] Yarin A. L. Stationary d.c. streaming due to shape oscillations of a droplet and its effect on mass transfer in liquid-liquid systems – Journal of Fluid Mechanics, 2001. – Vol. 444. – P. 321-342.
- [3] Kozlov V. G., Kozlov N. V., Schipitsyn V. D. Steady flows in an oscillating deformable container: Effect of the dimensionless frequency – Physical Review Fluids, 2017. – Vol. 2. – No. 9. – P. 094501.
- [4] Kozlov V. G., Sabirov R. R., Subbotin S. V. Steady flows in an oscillating spheroidal cavity with elastic wall – Fluid Dynamics, 2018. – Vol. 53. – No. 2. – P. 189-199.

ВЛИЯНИЕ СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТИ ПЛАСТИН НА СОБСТВЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ ЗАЖАТОЙ КАПЛИ

Кашина М.А.¹, Алабужев А.А.^{1,2}

¹ Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

² Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь

Свойства поверхности подложки оказывают существенное влияние на движение линии контакта трех сред. Внимание к подобного рода явлениям вызвано не только исследованием физических процессов, но и прикладными технологическими задачами.

В данной работе изучается влияние свойств поверхностей подложек на собственные колебания капли жидкости, которая зажата между этими подложками и окружена другой жидкостью.

Движение линии контакта описывается граничным условием [1] (в главном порядке разложения по малой амплитуде вибраций):

$$z = \pm 1/2, \quad r = 1: \quad \zeta_t = \mp \Lambda_{u,b}(\alpha) \zeta_z, \quad (1)$$

где $\zeta^*(z^*, \alpha, t^*)$ – функция, описывающая отклонение боковой поверхности капли от равновесного положения, индексы u и b относятся к «верхней» ($z = 1/2$) и «нижней» ($z = -1/2$) пластине соответственно. Параметр Хокинга Λ определяет свойства поверхностей, которые ограничивают каплю, т.е. характеризует взаимодействие контактной линии с подложкой.

Влияние одинаковых однородных пластин было рассмотрено в работе [2], а неоднородных в работе [3]. Разные пластины рассматривались в работе [1]. В отличие от предыдущих работ, в данном случае поверхности пластин не только отличаются друг от друга, но и при этом являются неоднородными. В качестве примера влияния неоднородности поверхности пластин выбрана следующая периодическая функция в условии (1): $\Lambda_{u,b} = \lambda_{u,b} |\cos \alpha|$, при этом на каждой пластине параметр Λ свой. Решение задачи представлялось в виде ряда по собственным функциям оператора Лапласа.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 20-31-90104

Литература

- [1] Alabuzhev A.A., Kashina M.A. Influence of surface properties on axisymmetric oscillations of an oblate drop in an AC electric field // Radiophysics and Quantum Electronics. – 2019. – V. 61, Iss. 8-9. – P. 589-602.
- [2] Алабужев А.А., Любимов Д.В. Влияние динамики контактной линии на собственные колебания цилиндрической капли // ПМТФ. – 2007. – Т. 48, № 5 – С. 78-86.
- [3] Alabuzhev A.A., Kashina M.A. The dynamics of oblate drop between heterogeneous plates under alternating electric field: Non-uniform Field // Microgravity Science and Technology. – 2018. – V. 30, Iss. 1-2. – P.11-17.

САТЕЛЛИТНАЯ РОЛЬ ОРИЕНТАЦИОННЫХ СООТНОШЕНИЙ ПИТЧА ПРИ ГЦК-ОЦК (γ - α) МАРТЕНСИТНЫХ ПРЕВРАЩЕНИЯХ

Кашенко М.П.^{1,2}, Кашенко Н.М.¹, Чашина В.Г.^{1,2}.

¹Уральский федеральный университет, Екатеринбург

²Уральский государственный лесотехнический университет, Екатеринбург

mpk46@mail.ru, nad.kashenko@yandex.ru, vera.chashina.77@mail.ru

Ориентационные соотношения (ОС) относятся к совокупности однозначно связанных морфологических признаков, указывающих на кооперативный характер мартенситного превращения (МП). ОС демонстрируют параллельность (или близкую к таковой) соответственных плоскостей фаз и лежащих в плоскостях направлений. Для γ – α МП в сплавах на основе железа [1] наблюдаются ОС близкие (но не совпадающие) с идеализированными соотношениями Курдюмова-Закса (КЗ) и Нишиямы (Н):

$$\text{КЗ: } (111)_{\gamma} // (110)_{\alpha} \text{ and } [\bar{1}10]_{\gamma} // [\bar{1}11]_{\alpha}, \quad (1)$$

$$\text{Н: } (111)_{\gamma} // (110)_{\alpha}, [\bar{1}1\bar{2}]_{\gamma} // [\bar{1}10]_{\alpha}. \quad (2)$$

В тонких фольгах иногда наблюдаются [2] ОС Питча (П):

$$\text{П: } (110)_{\gamma} // (111)_{\alpha}, [\bar{1}10]_{\gamma} // [\bar{1}1\bar{2}]_{\alpha}. \quad (3)$$

В [3] предполагалось, что ОС (3) играют основную роль, поскольку характеризуются малыми собственными числами тензора дисторсии Питча (при неортогональных собственных векторах) по сравнению с деформацией Бейна, играющей ведущую роль (вместе с жестким поворотом) при феноменологическом кристаллогеометрическом описании [4]. Однако полярное разложение тензора показывает, что деформации растяжения при дисторсии Питча превышают бейновские, приводя к высоким значениям относительного изменения объема. Отсюда следует несостоятельность указанной в [3] аргументации. Хотя в последующем автор работы [3] провел полярное разложение (см., например, [5]), но значимых физических аргументов в пользу выделенности каких-либо ОС не приводит. Это связано с тем, что фактически анализ проводился в русле формального подхода [4].

Уместно отметить, что в разработанной динамической теории [6 - 8] рост мартенситного кристалла связан с распространением управляющего волнового процесса, стартующего из начального возбужденного (колебательного) состояния, локализованного в определенной области упругого поля дислокационного центра зарождения (ДЦЗ). Важно, что ОС (1) и (2) соответствуют ДЦЗ, имманентные решетке γ – фазы. Тогда как для реализации ОС (3) необходимы ДЦЗ, способные образоваться при взаимодействии кристаллов мартенсита с остаточным аустенитом. Таким образом, кристаллы с ОС Питча не могут относиться к первому поколению кристаллов и выполняют роль спутников.

Авторы выражают признательность Министерству науки и высшего образования России за поддержку при исполнении государственного задания № 075-00243-20-01 от 26.08.2020 в рамках темы FEUG-2020-0013 "Экологические аспекты рационального природопользования"

Литература

- [1] Курдюмов Г.В., Утевский Л.М., Энтин Р.И. Превращения в железе и стали. – М.: Наука, 1977. – 238 с.
- [2] Pitsch W. Phil. Mag. 1959. № 4. P. 577 - 584.
- [3] Cayron C. Acta Cryst. 2013, A69, P. 498 - 509.
- [4] Wechsler M.S., Lieberman D.S., Read T.A. Journal of Metals. 1953. November. P. 1503–1515.
- [5] Cayron C. Acta Mater. 2015. 96, P. 189–202.
- [6] Кашенко М.П., Чашина В.Г. УФН. 2011. Т. 181. № 4. С. 345–364.
- [7] Кашенко М.П., Кашенко Н.М., Чашина В.Г. ФММ. 2019. Т. 120. № 5. С. 457–463.
- [8] Кашенко М.П., Кашенко Н.М., Чашина В.Г. ФТТ. 2019. 61. № 12. С. 2274–2279.

КРИСТОННЫЕ ИСТОЧНИКИ СДВИГА И ФОРМИРОВАНИЕ ПОЛОС ЧЕРНОВА-ЛЮДЕРСА

Кашенко М.П.^{1,2}, Семеновых А.Г.², Нефедов А.В.², Кашенко Н.М.¹, Чашина В.Г.^{1,2}.

¹Уральский федеральный университет, Екатеринбург

²Уральский государственный лесотехнический университет, Екатеринбург

mpk46@mail.ru, semenovychag@m.usfeu.ru, a.nefedov@live.ru, nad.kashenko@yandex.ru,
vera.chashina.77@mail.ru

Полосы Чернова-Людерса (ПЧЛ), как правило, наблюдают при одноосных деформациях растяжения. Образование ПЧЛ, в частности, интерпретируется [1] как расширение первоначально возникшей полосы сдвига (ПС) при распространении пары медленных волновых фронтов деформации. Однако, деформация внутри ПЧЛ весьма неоднородна, обнаруживая внутреннюю полосчатую структуру. При этом внутренние ПС имеют границы и не обязательно параллельны. В связи с этим допустим сценарий формирования ПЧЛ за счет распространения кристонов - носителей сдвига по плоскостям, отличающимся от плотноупакованных [2-4]. Генерация кристонов осуществляется обобщенными источниками Франка-Рида (ОИФР), возникающими при сильном (контактном) взаимодействии дислокаций с пересекающимися плоскостями скольжения. При кристонном описании ориентаций границ полос сдвига существует простая связь с долевыми вкладами дислокаций в «состав» кристона. Например, для ГЦК-решетки простейшие стандартные ориентировки границ ПС имеют вид:

$$\{hhl\}, \quad h/l = (n - m)/(n + m), \quad (1)$$

где n и m целые числа, модули которых равны числу дислокаций двух контактно взаимодействующих систем. Представляет интерес привлечь кристаллографическую информацию для описания процесса формирования ПЧЛ. Поскольку, в большинстве случаев образование ПЧЛ фиксируют на поликристаллических образцах, удобно использовать образцы, обладающие выраженной текстурой после прокатки [5]. Характерно, что компоненты текстуры после горячей прокатки имеют вид $\{hhl\} \langle ll-2h \rangle$, вполне ожидаемый для кристонного механизма сдвига, приводящего к ориентациям границ (1). Наличие текстуры указывает тогда и на присутствие источников ОИФР. Ориентации сегментов ОИФР $\Lambda \parallel \langle 1-10 \rangle$ ортогональны $\langle hhl \rangle$, а направления сдвига $\langle ll-2h \rangle$ коллинеарны суперпозиционным векторам Бюргерса $\mathbf{b}$. Очевидно, что чисто винтовая компонента $\mathbf{b}_{\parallel}$ (коллинеарная Λ) обеспечивает возможность уширения и размножения ПС (за счет известного механизма переползания дислокаций), тогда как краевая компонента $\mathbf{b}_{\perp}$ обеспечивает продольный рост ПС. Важно, что при образовании ПЧЛ, кроме унаследованных ОИФР, рождаются и новые, о чем свидетельствуют дополнительные компоненты текстуры $\{112\} \langle 111 \rangle$ и $\{001\} \langle 110 \rangle$. Согласно (1), компоненте $\{001\} \langle 110 \rangle$, отвечает предельный вариант $n=m$ равноправия взаимодействующих систем дислокаций. Таким образом, кристонный подход позволяет прояснить механизм формирования ПЧЛ.

Авторы выражают признательность Министерству науки и высшего образования России за поддержку при исполнении государственного задания № 075-00243-20-01 от 26.08.2020 в рамках темы FEUG-2020-0013 "Экологические аспекты рационального природопользования"

Литература

- [1] Горбатенко В.В., Данилов В.И., Зуев Л.В. ЖТФ.-2017. Т. 7. № 3. С. 372–378
- [2] Кашенко М.П., Чашина В.Г., Семеновых А.Г. Физ. мезомех. 2003. Т. 6. № 1. С. 95–122.
- [3] Кашенко М.П., Чашина В.Г., Семеновых А.Г. Физ. мезомех. 2003. Т. 6. № 3. С. 37-56.
- [4] Kashchenko M.P., Chashchina V.G. Letters on materials. 2015. V.5. №1. P. 82-89.
- [5] Фарбер В.М., Морозова А.Н., Хотинков В.А., Карабаналов М.С., Щапов Г.В. Физ. мезомех. 2019. Т. 22. № 4. С. 75-82

ИДЕНТИФИКАЦИЯ КЭП-МОДЕЛИ ПЛАСТИЧНОСТИ ГИБКОГО ГРАФИТА

Келлер И.Э.¹, Адамов А.А.¹, Подкина Н.С.²

¹Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

²ООО «Силтур», Пермь

kie@icmm.ru

Гибкие графитовые листы и фольги получают прокаткой пуха терморасширенного графита до плотностей массы около трети плотности кристаллического графита и применяют для изготовления химически инертных прокладок, электродов, датчиков, устройств вибродемпфирования, теплоизоляции, защиты от электромагнитных полей [1]. В литературе предлагается определять механические и прочностные свойства данного материала исключительно из испытаний на одноосное растяжение и индентирование. Воспроизводимые в подобных испытаниях напряженно-деформированные состояния не характеризуются сжимающими средними напряжениями и уплотнением и потому не подходят для расчетов процессов производства и эксплуатации прокладок из гибкого графита, в которых подобные состояния реализуются во всем объеме изделия. Проектирование подходящих базовых экспериментов и методики калибровки моделей пластичности поэтому представляется необходимой и актуальной задачей. Необратимое уплотнение гибкого графита при сжатии изменяет его упругие, пластические и предельные свойства. Подходящие модели материала встречаются среди уравнений состояния пористых, порошковых, геологических и других некомпактных сред и характеризуются связанностью сдвиговых и объемных деформаций (дилатансией).

Авторами выделен ряд подходящих испытаний (всестороннее и трехосное сжатие цилиндра, свободное и стесненное сжатие цилиндра, сжатие цилиндра в упругой тонкостенной цилиндрической оболочке и сжатие параллелепипеда в канале), образцы для которых имеют форму сплошного цилиндра или куба и собираются из дисков или квадратов, вырезанных из листа [2]. Для колец, изготавливаемых навивкой графитовой фольги на цилиндрический сердечник с последующим осевым прессованием в матрице, дополнительно рассматриваются испытания всесторонним сжатием, осевым сжатием в зазоре между внешней и внутренней упругими цилиндрическими оболочками, а также растяжением в полудисках [2]. Для определения шести материальных констант кэп-модели Димаджио и Сэндлера [3] получены соотношения, связывающие их с измеряемыми и контролируемыми в перечисленных выше испытаниях величинами [2]. Для некоторых базовых экспериментов изготовлена оснастка и проведены испытания, данные которых в целом пока недостаточны для хорошей обусловленности задачи идентификации параметров модели.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 20-48-596012 р_НОЦ_Пермский край).

Литература

- [1] Chung D. Flexible graphite for gasketing, adsorption, electromagnetic interference shielding, vibration damping, electrochemical applications, and stress sensing // Journal of Materials Engineering and Performance. 2000. No. 9. – P. 161–163.
- [2] Адамов А.А., Келлер И.Э., Подкина Н.С. Базовые эксперименты для идентификации кэп-модели пластичности гибкого графита // Вестник ЧГПУ им. И.Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. 2020. № 3 (45). – С. 130-140.
- [3] DiMaggio F., Sandler I. Material models for granular soils // Journal of the Engineering Mechanics Division ASCE. 1971. No. 97. – P. 935–950.

НОВЫЙ СПОСОБ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ КАРТ ПАРАМЕТРОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ОБРАЗЦОВ С ПОМОЩЬЮ АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ

Кислицын В.Д.^{1,2}, Изюмов Р.И.¹, Свистков А.Л.¹

¹Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

²Пермский государственный университет, Пермь

kislitsynvd@mail.ru, izumov@icmm.ru, svistkov@icmm.ru

В работе предложен новый способ представления результатов исследования поверхности образцов с помощью атомно-силовой микроскопии. Состоит он в следующем. На картах показывается рельеф поверхности материала. Но раскраска поверхности делается не в соответствии с уровнями высот (как во многих программах), а в соответствие со значением исследуемого параметра. Примером таких карт являются изображения, показанные на рисунке 1. На них дается распределение параметра фазового сдвига, полученного в полуконтактном режиме. Отсчет фазового угла на представленном результате выполнялся от состояния, при котором математическое ожидание значения фазового угла равно нулю. Вторым важным моментом представления результата является нанесение на поверхность линий постоянного уровня. Для получения большей ясности поверхность освещена источником света, расположенным близко к горизонту.

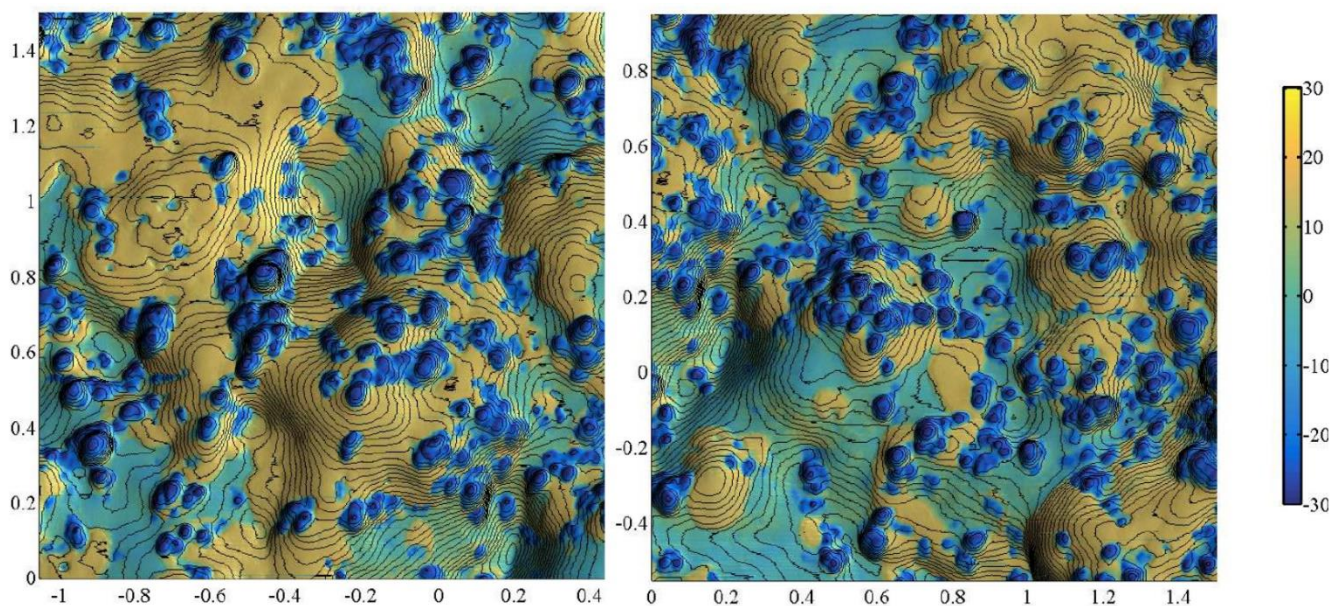


Рис. 1. Распределение значений угла сдвига фазы на поверхность образца эластомерного нанокompозита, наполненного техническим углеродом и детонационными наноалмазами

В приведенном на рисунке 1 примере показано распределение угла сдвига фазы для нанокompозита с твердыми частицами наполнителя. Его связующим является маслonaполненный бутадиен-метилстирольный каучук СКМС-30АРКМ-15. Проведено специальное исследование, которое позволило определить, являются ли желтые области на картах следами тяжей, полученных при движении макроразрыва материала, или представляют собой результат выцветания масла на поверхность материала. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края в рамках научного проекта № 20-48-596013. Экспериментальная часть выполнена при поддержке госбюджетной темы АААА-А20-120022590044-7.

НЕЛОКАЛЬНЫЕ МОДЕЛИ ИНТЕГРАЛЬНОГО ТИПА ДЛЯ АНАЛИЗА РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗОНЫ РАЗРУШЕНИЙ В МЕТАЛЛАХ

Ключанцев В.С.^{1,2}, Шутов А.В.^{1,2}

¹Новосибирский государственный университет, Новосибирск

²Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева, Новосибирск
alexey.v.shutov@gmail.com

В инженерной практике открыт вопрос о компьютерном моделировании процессов локализации деформаций в конструкциях из повреждаемых материалов. Результаты моделирования по классическим локальным моделям патологически зависят от мелкости разбиений: деформация склонна накапливаться на одном слое пространственной дискретизации (например, на слое конечных элементов или частиц). Для решения указанной проблемы применяются ряд приемов. Прагматичный подход состоит во включении размера элементов дискретизации в число параметров материала, при этом точность полученного решения зависит от механических свойств материала [1]. Более научным подходом является делокализация определяющих соотношений. При делокализации в модель вводится как минимум один скалярный параметр – характерный размер микроструктуры. Указанный параметр ограничивает ширину полосы локализованных деформаций. В рамках градиентного подхода к делокализации определяющие соотношения дополняются более высокими градиентами поля перемещений. Градиентный подход показал свою работоспособность [2], но сложен в реализации. Он является двойственным к интегральному методу делокализации [3]. В настоящей работе развит интегральный подход как в сочетании с методом конечных элементов, так и с методом сглаженных частиц. Исходная упругопластическая модель материала основана на соотношениях Simo-Miehe (1992). Мерой поврежденности материала является пористость; локальная модель – частный случай определяющих соотношений из [4]. В разработанной модели учитывается физическая и геометрическая нелинейность, что позволяет моделировать большие деформации. Применяется гибридная явно/неявная процедура интегрирования по времени, обладающая высокой точностью и численной устойчивостью [5]. Решен ряд задач о разрушении компактного образца. Показано, что нелокальные схемы позволяют получить физически осмысленные, сходящиеся решения при мельчении дискретизации. Исследовано влияние процедуры делокализации на характер разрушения. В частности, установлено влияние анизотропной схемы делокализации на трещеностойкость, энергозатраты на продвижение трещины и характер растрескивания конструкции.

Исследование поддержано грантом РНФ, номер проекта 19-19-00126.

Литература

- [1] Xue Z. et al. Calibration procedures for a computational model of ductile fracture // Engineering Fracture Mechanics, 2010. – Т. 77. – №. 3. – С. 492-509.
- [2] Brepols T., Wulfinghoff S., Reese S. Gradient-extended two-surface damage-plasticity: micromorphic formulation and numerical aspects // International Journal of Plasticity. – 2017. – Т. 97. – С. 64-106.
- [3] Bažant Z. P., Jirásek M. Nonlocal integral formulations of plasticity and damage: survey of progress // Journal of engineering mechanics. – 2002. – Т. 128. – №. 11. – С. 1119-1149.
- [4] Shutov A. V., Silbermann C. B., Ihlemann J. Ductile damage model for metal forming simulations including refined description of void nucleation // International Journal of Plasticity. – 2015. – Т. 71. – С. 195-217.
- [5] Shutov A. V. Efficient time stepping for the multiplicative Maxwell fluid including the Mooney-Rivlin hyperelasticity // International Journal for Numerical Methods in Engineering. – 2018. – Т. 113. – №. 12. – С. 1851-1869.

О СУЩЕСТВОВАНИИ ИНТЕГРАЛА УРАВНЕНИЙ ОСЕСИММЕТРИЧНОГО ТЕЧЕНИЯ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ

Князев Д.В.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

dvk@icmm.ru

Известно, что в некоторых случаях уравнения гидродинамики допускают интегралы движения [1]. В случае стационарного вихревого течения идеальной несжимаемой жидкости вдоль каждой линии тока сохраняется функция Бернулли (интеграл Бернулли). При потенциальном течении несжимаемой жидкости градиент функции Бернулли равен нулю, то есть в случае стационарного движения жидкости она сохраняет постоянное значение во всей области течения (интеграл Бернулли–Эйлера), а при неустановившемся движении значение функции Бернулли зависит лишь от времени (интеграл Коши). Во всех перечисленных случаях интегралы движения не зависят от вязкости среды либо в силу её идеальности, либо в силу безвихревого характера течения.

Анализ уравнений осесимметричного и двумерного течений вязкой несжимаемой жидкости показывает, что для всякого их решения существует функция S , зависящая от функции тока, единственной компоненты завихренности и функции Бернулли, градиент которой равен нулю. В случае двумерного стационарного течения показано, что при известном интеграле S уравнения Навье–Стокса редуцируются к системе трёх уравнений первого порядка, обладающей характеристическим многообразием.

Литература

[1] Кочин Н.Е., Кибель И.А., Розе Н.В. Теоретическая гидромеханика. Ч. 1 – М.: Физматгиз, 1963. – 584 с.

ДИНАМИКА СФЕРИЧЕСКОГО ТЕЛА В ЖИДКОСТИ ВБЛИЗИ ОСЦИЛЛИРУЮЩЕЙ СТЕНКИ

Козлов В.Г., Власова О.А.

Пермский государственный гуманитарно-педагогический университет, Пермь
kozlov@pspu.ru, vlasova_oa@pspu.ru

В работе изучается поведение легкого сферического тела вблизи границы цилиндрической полости, заполненной жидкостью и совершающей вращательные колебания вокруг своей оси. Ось цилиндра отклонена от вертикали на некоторый угол. Плотность тела меньше плотности жидкости, вследствие чего тело находится вблизи боковой стенки полости, в то же время оно удерживается в средней по длине части полости с помощью невесомой нерастяжимой нити, закрепленной на нижнем торце цилиндра. Такое расположение тела необходимо для исключения влияния на динамику тела осредненных тороидальных вихрей, генерируемых вблизи торцов осциллирующей полости [1].

В отсутствие вибраций тело находится вблизи стенки полости (рис.1,*а*) под действием силы Архимеда. На фотографии, сделанной через верхний торец кюветы, показано сферическое тело (снизу) и его отражение на стенке полости (сверху). При вибрациях полости осциллирующее движение стенки вызывает поступательно-вращательные колебания тела в жидкости, в результате чего генерируется осредненная подъемная сила, отталкивающая тело от стенки полости [2]. По достижении порогового значения амплитуды колебаний при заданной частоте, тело отходит от стенки (рис.1,*б*) и занимает квазиравновесное положение на некотором расстоянии от нее, с дальнейшим увеличением амплитуды колебаний зазор между телом и стенкой растет. В работе изучается действующая на тело осредненная подъемная сила в зависимости от величины зазора, амплитуды колебаний и безразмерной частоты.

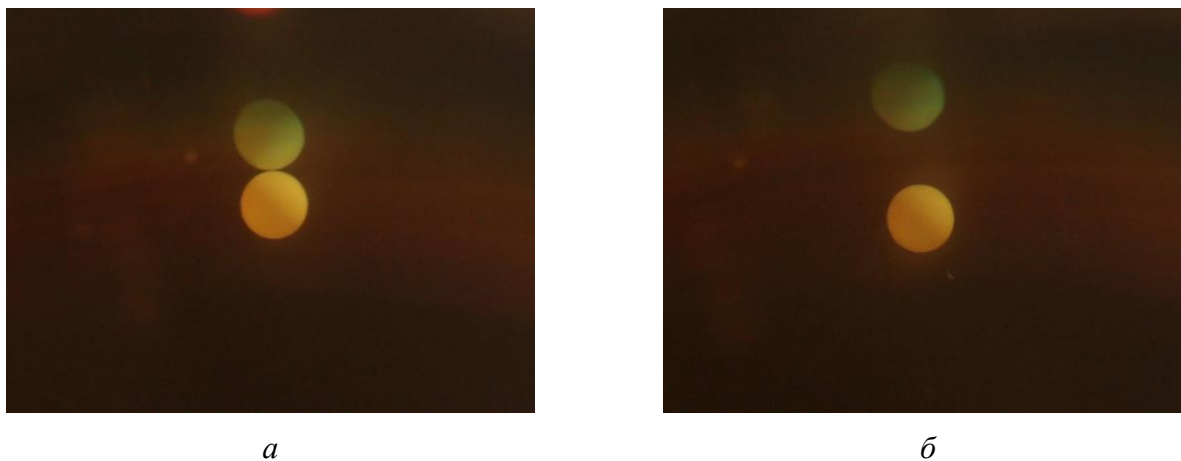


Рис.1. Положение тела вблизи стенки полости: *а* - до порога отрыва, *б* - в подвешенном состоянии

Работа выполнена при поддержке правительства Пермского края (гранты МИГ С-26/174.9 и Научная школа С-26/1191)

Литература

- [1] Lim T. G., Hyun J. M. Flow driven by a torsionally-oscillating shrouded endwall disk – Journal of Fluids Engineering, 1997. – Vol.119. – P.115-121.
- [2] Ivanova A. A., Kozlov V. G. Lift force acting on body in liquid in the vicinity of boundary executing tangential oscillations – Microgravity Science and Technology, 2014. – Vol. 26. – No. 3. – P. 179-187.

ПАЛЬЧИКОВАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА ЖИДКОСТЕЙ, ОСЦИЛЛИРУЮЩИХ В ЩЕЛЕВЫХ КАНАЛАХ

Козлов В.Г.¹, Власова О.А.¹, Карпунин И.Э.¹

¹Пермский государственный гуманитарно-педагогический университет, Пермь
kozlov@pspu.ru, vlasova_oa@pspu.ru, karpunin_ie@pspu.ru

Динамика систем с границей раздела в стеснённых (щелевых) каналах или пористых средах является актуальной проблемой в научном и прикладном аспектах. Особый интерес представляет случай жидкостей с высоким контрастом вязкостей, характерный для задач нефтедобычи. Распространённым приемом моделирования движения границы раздела несмешивающихся жидкостей в пористых средах является применение ячейки Хеле-Шоу. Задаче стационарного вытеснения одной жидкостью другой в ячейке Хеле-Шоу огромное количество исследований. В то же время, количество работ, в которых рассматривалась динамика межфазной границы при осциллирующей прокачке очень ограничено.

В [1] экспериментально изучена динамика границы раздела двух несмешивающихся жидкостей с высоким контрастом вязкостей в радиальной ячейке Хеле-Шоу при гармонической модуляции расхода прокачиваемой жидкости. Эксперименты обнаружили новый тип неустойчивости, проявляющийся в развитии пальцев на границе раздела жидкостей в определенных фазах колебаний.

В настоящей работе обобщаются результаты экспериментального исследования осцилляционной динамики границы раздела двух несмешивающихся жидкостей в узких щелевых каналах различной геометрии, в прямых и радиальных каналах. Показано, что колебания границы происходят в виде языков маловязкой жидкости, периодически проникающих в жидкость высокой вязкости. При этом линия контакта со стенками канала практически не смещается в ходе колебаний и совпадает с положением межфазной границы при амплитудном смещении в сторону маловязкой жидкости. Анализируется влияние осцилляций на среднюю по периоду форму межфазной границы; рассматривается неустойчивость осциллирующей границы, проявляющаяся в возникновении пальцев маловязкой жидкости. Последние развиваются в фазе вытеснения высоковязкой жидкости и полностью исчезают в фазе максимального смещения границы в сторону маловязкой жидкости. Особенностью обнаруженной неустойчивости является то, что порог ее развития определяется критической амплитудой колебаний границы. Показано, что пространственный период пальчиковых структур определяется капиллярным числом и удовлетворительно согласуется с теорией [2], развитой для стационарного смещения межфазной границы. Последнее свидетельствует о квазистационарном характере обнаруженной неустойчивости. Интересно, что несмотря на это, в надкритической области положение пальцев и впадин между ними периодически изменяется каждые два периода. Это связано с периодическим нарушением формы контактной линии и говорит о ее важной роли в развитии неустойчивости границы.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 20-41-596011 р) и правительства Пермского края (Научная школа С-26/1191)

Литература

- [1] Kozlov V., Karpunin I., Kozlov N. (2020) Finger instability of oscillating liquid–liquid interface in radial Hele-Shaw cell. *Physics of Fluids*, 32(10), 102102.
- [2] Fernandez, J., et al. (2001). Wavelength selection of fingering instability inside Hele-Shaw cells. *Physics of Fluids*, 13, 3120.

ИЗУЧЕНИЕ ХЕМОКОНВЕКЦИИ В ПОЛЕ ВИБРАЦИЙ

Козлов Н.В.^{1,2}, Мошева Е.А.^{1,2}

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь

²Институт механики сплошных сред Уральского отделения РАН, Пермь
kozlov.n@icmm.ru, mosheva@icmm.ru

Известно, что вибрации оказывают влияние на неоднородные по плотности гидродинамические системы [1]. Реагирующие системы в переменных инерционных полях, создаваемых вибрациями, представляют собой интересный и сложный объект для исследования. Их отличительная особенность, в ряде случаев, состоит в непостоянстве граничных условий и непрерывном перестроении конвективных структур. В настоящем исследовании предпринята попытка количественно исследовать конвекцию, вызванную в системе смешивающихся жидкостей реакцией нейтрализации, протекающей в конвективном режиме, для которого характерно интенсивное выгорание реагентов, сопровождающееся стремительным движением фронта реакции вниз [2], при одновременном воздействии вертикальными поступательными вибрациями. В начальный момент времени жидкости заполняют рабочий объём ячейки Хеле-Шоу таким образом, что стратификация устойчива (более плотный раствор располагается снизу) и два равных по высоте слоя разделены при этом узкой зоной контакта. После соприкосновения растворов, вследствие химической реакции незамедлительно начинается конвекция (Рис. 1). Вибрации приводят к некоторому замедлению конвекции, которое зависит как от величины вибрационного ускорения, так и от начальных концентраций реагентов. Проводится анализ поведения системы в зависимости от безразмерных параметров. Проводится сравнение хемовибрационной конвекции и термовибрационной [1].

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант 19-11-00133).

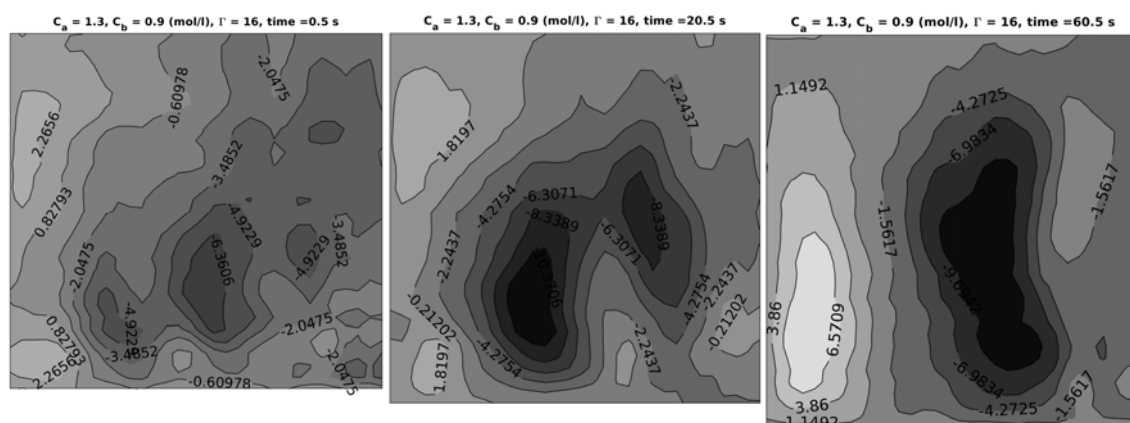


Рис. 1. Поле функции тока ($\text{мм}^2/\text{с}$) осреднённых течений в верхнем слое, в различные моменты времени, при реакции нейтрализации. Эксперимент при вертикальных вибрациях с частотой $f = 40.0$ Гц и амплитудой $b = 2.5$ мм

Литература

- [1] Gershuni G., Lubimov D. Thermal vibrational convection – Wiley, New York, 1998. – 358 с.
- [2] Bratsun D., Mizev A., Mosheva E., Kostarev K. Shock-wave-like structures induced by an exothermic neutralization reaction in miscible fluids. – Phys Rev E. – 2017. – Vol. 96. – Iss. 5. – P. 053106.

ВОЛНЫ НА СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ ВО ВНЕШНЕМ ПЕРЕМЕННОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Колесниченко Е.В.¹, Хохрякова К.А.¹

¹ *Институт механики сплошных сред ПФИЦ УрО РАН, Пермь*

kev@icmm.ru, bca@icmm.ru

Магнитные жидкости – это коллоидные растворы магнитных наночастиц в немагнитной жидкости-носителе, обладающие уникальными свойствами перемещаться под действием магнитного поля и изменять свою форму [1]. На свободной поверхности магнитной жидкости можно генерировать возмущения, источником которых могут быть как приложенное механическое воздействие, так и внешнее электромагнитное поле, или же они оба механизма одновременно. Если в случае механического воздействия любое по амплитуде возмущение вызывает волны на поверхности слоя жидкости, то в случае приложенного магнитного поля возникновение волн возможно лишь при определенных параметрах [2]. Если же амплитуда деформации поверхности становится сопоставима с толщиной слоя магнитной жидкости, возникает неустойчивость системы и слой разрушается с образованием структуры в виде отдельных капель [3]. Критическое значение волнового числа, при котором возникает неустойчивость слоя, определяются из минимума нейтральной кривой, полученной с помощью дисперсионного соотношения [4]. Для слоя магнитной жидкости, расположенного на твердой подложке, наблюдается один минимум нейтральной кривой. В более сложной, многофазной системе типа «жидкая подложка – магнитная жидкость – газовая среда или жидкостью», наблюдаются два таких минимума для обеих поверхностей слоя [3]. Жидкости в таких системах должны быть несмешивающимися и стратифицированными по плотности во избежание возникновения неустойчивости Релея-Тэйлора [5]. Особый интерес вызывает случай генерации волн на межфазной поверхности в системе «магнитная – немагнитная жидкость» при воздействии внешнего однородного осциллирующего, бегущего или вращающегося магнитного поля [6]. Под воздействием переменного магнитного поля на поверхности магнитной жидкости могут образовываться два типа волн: стоячая волна той же частоты, что и переменное магнитное поле, и стоячая волна, независимая от частоты поля. Эксперименты показывают, что вязкость оказывает значительное влияние на волны первого типа, и практически не оказывает на волны второго [7]. Данная работа посвящена обзору основных теоретических и экспериментальных исследований волновой неустойчивости систем с магнитной жидкостью, возникающей под воздействием однородного переменного внешнего магнитного поля.

Литература

- [1] Розенцвейг Р. Феррогидродинамика. – М.: Мир, 1989 г.
- [2] Muller H.W. Parametrically driven surface waves on viscous ferrofluids // Phys. Rev. E. – 1998. – Vol. 58, Iss. 5. – P. 6199–6205.
- [3] Rannacher D., Engel A. Double Rosensweig instability in a ferrofluid sandwich structure // Phys. Rev. E. – 2004. – Vol. 69. – P. 066306(1–8).
- [4] Browaeys J., Bacri J.-C., Flament C., Neveu S., Perzynski R. Surface waves in ferrofluids under vertical magnetic field // Eur. Phys. J. B. – 1999. – Vol. 9. – P. 335–341.
- [5] Pacitto G., Flament C., Bacri J.-C., Widom M. Rayleigh-Taylor instability with magnetic fluids: Experiment and theory // Phys. Rev. E. – 2000. – Vol. 62, No 6. – P. 7941–7948.
- [6] Rhodes S., He X., Elborai S., Lee S.-H., Zahn M. Magnetic fluid behavior in uniform DC, AC, and rotating magnetic fields // Journal of Electrostatics. – 2006. – Vol. 64, Is. 7–9. – P. 513–519.
- [7] Okubo M., Ishibashi Y., Oshima S., Katakura H., Yamane R. Interfacial waves of the magnetic fluid in vertical magnetic fields // JMMM. – 1990. – Vol. 85. – P. 163–166.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ КОНВЕКТИВНОГО РАССЛОЕНИЯ ВОЗДУШНЫХ ПОТОКОВ В ШАХТНЫХ СТВОЛАХ

Колесов Е.В., Семин М.А.

*Горный институт УрО РАН, Пермь
kolesovev@gmail.com*

Проведены экспериментальные исследования аэродинамических и теплофизических параметров воздуха в скиповых стволах рудника ООО «Кнауф Гипс Новомосковский» в летнее и зимнее времена года. В холодный период года в зависимости от температуры воздуха на поверхности шахты замечено опрокидывание воздушного потока вследствие попадания холодного тяжелого воздуха с поверхности в стволы. Для анализа данного явления разработана CFD-модель протекания аэродинамических и термодинамических процессов в шахтном стволе с учетом вертикального температурного градиента, шероховатости стенок выработок, теплообмена с крепью ствола в программном комплексе Ansys Fluent. На основе численного моделирования обнаружено, что при относительно низких скоростях исходящего из ствола воздуха и при относительно большом перепаде температур воздуха в исходящей струе и на поверхности шахты из устья ствола начинает опускаться холодный воздух [1,2]. Взаимодействие холодного воздуха с поверхности с теплым исходящим воздухом, а также с теплыми стенками ствола приводит к возникновению нестационарной конвективной вихревой ячеистой структуры вдоль ствола, глубина которой зависит от скорости исходящей струи, а также разницы температуры исходящего воздуха и температуры на поверхности. На основе полученных данных численного моделирования получена формула для расчета предельной минимальной скорости воздуха, при которой в поперечном сечении ствола возникают частично-возвратные течения воздуха. Данная формула может быть использована при проектировании систем вентиляции шахт и рудников и в методиках расчета требуемого количества воздуха для проветривания шахт и рудников в условиях существенной разницы температуры воздуха, исходящего из шахты, и атмосферного воздуха.

Литература

- [1] Kazakov B. P., Shalimov A. V., Semin M. A. Stability of natural ventilation mode after main fan stoppage. International Journal of Heat and Mass Transfer, 86, 2015, 288–293.
- [2] Семин М.А., Левин Л.Ю. Теоретическое исследование теплообмена между воздушным потоком и крепью шахтного ствола при наличии тепловой конвекции // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 6. – С. 151–167.

ВЛИЯНИЕ ПРИМЕСЕЙ NaCl НА РАСХОД ПРОТЕКАЮЩЕЙ СКВОЗЬ ПОРИСТУЮ СРЕДУ ВОДЫ

Колчанов Н.В.^{1,2}, Евграфова А.В.¹, Казакова Е.А.², Колчанова Е.А.^{1,2}

¹«Институт механики сплошных сред УрО РАН» - филиал ПФИЦ УрО РАН, Пермь

²Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь
kolchanovn@gmail.com, eavb@icmm.ru, kazakova.lizaa@mail.ru, kolchanovaea@gmail.com,

Работа посвящена экспериментальному исследованию фильтрационных свойств потока воды при добавлении примеси в виде растворов соли NaCl различной концентрации. Фильтрация производилась сквозь пористую среду, которая заполняла цилиндрическую трубу. Задачи просачивания жидкостей сквозь пористые среды актуальны ввиду широкого распространения последних. Например, в монографии [1] приводятся теоретические основы и прикладные аспекты, связанные с движением жидкостей и газов в природных пластах.

В качестве пористой среды использовался стеклянный гранулят с размером фракций 0.8-1.2 мм. Пористость среды была измерена при помощи пикнометра и составила 0.36. Труба имела длину $L = 392$ мм и диаметр $D = 15.6$ мм. В трубу подавалась вода из сосуда Мариотта, поднятого на определенную высоту. Вблизи входа и выхода трубы сделаны отверстия для манометрических трубок, с помощью которых определялся перепад давления в мм.вод.ст. Вытекая из трубы с пористой средой, вода попадала в ёмкость на весах. По графику изменения массы воды в ёмкости в дальнейшем рассчитывался расход.

Рассмотрен вариант вертикального расположения трубы, когда жидкость прокачивалась снизу вверх. Построены графики зависимости расхода от перепада давления на концах трубы. Показано, что конечное неизменное значение гидравлического сопротивления пористой среды устанавливается через несколько недель с момента заполнения трубы стеклянным гранулятом. На входе в систему с пористой средой смонтированы два параллельных друг другу канала. Через канал 1 изначально протекала вода без примесей. Канал 2 имел объём равный объёму порового пространства (27 см^3). Этот канал заполнялся раствором соли NaCl (от 5 до 20%). В начале каждого опыта устанавливался стационарный поток воды через канал 1 и трубу с пористой средой, после чего с помощью системы кранов поток быстро перенаправлялся с канала 1 на канал 2. Как только примесь достигала пористой среды, расход жидкости начинал резко уменьшаться. Опыты показали, что величина максимального уменьшения расхода зависит как от концентрации NaCl в примеси, так и от перепада давления на концах трубы. Эффект ослабления интенсивности потока воды из-за примеси можно объяснить осаждением части примеси на пористый «скелет», то есть увеличением немобильной компоненты примеси согласно MIM-модели [2].

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20-11-20125).

Литература

- [1] Баренблатт Г. И., Ентов В. М., Рыжик В. М. Движение жидкостей и газов в природных пластах. М., Недра, 1984, 211 с.
- [2]. Lai A.C.H., Yu D.L., Joseph H.W. Mixing of a Rosette Jet Group in a Crossflow // Journal of Hydraulic Engineering. V. 137, (8), 2011. P. 787-803.

ВИБРАЦИОННАЯ КОНВЕКЦИЯ В СЛОЕ БИНАРНОЙ ЖИДКОСТИ С ПОРИСТОЙ ЗОНОЙ В НУЛЕВОЙ ГРАВИТАЦИИ

Колчанова Е.А.¹, Колчанов Н.В.¹

¹Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь
kolchanovaea@gmail.com, kolchanovn@gmail.com

Работа посвящена задаче о генерации термоконцентрационной конвекции в слое бинарной жидкости, частично заполненном пористой средой, под действием продольной вибрации в условиях нулевой гравитации. Вибрация имеет высокую частоту и малую амплитуду, так что период внешнего воздействия считается малым по сравнению с характерными временами распространения гидродинамических, тепловых и концентрационных возмущений. Пористая среда делит слой на два субслоя: жидкостный и пористый. Поперек слоя поддерживаются фиксированные перепады температуры и концентрации.

Под действием вибрации в субслоях пороговым образом возникает осредненная валиковая конвекция различной длины волны. Определяются значения критерия подобия – вибрационного числа Рэлея-Дарси, – соответствующие порогу возбуждения этой конвекции. Задача моделируется на основе аналитического метода осреднения [1–4] и численного метода стрельбы. В работе мы используем параметр – отношение плавучестей N [2], – который задает отношение перепада плотности, вызванного неоднородностью концентрации, к перепаду плотности, возникающему из-за неоднородности температуры. Этот параметр входит в выражение для результирующей осредненной вибрационной силы, вызывающей конвекцию. Его положительные значения соответствуют сонаправленным тепловым и концентрационным градиентам плотности, а отрицательные значения – противоположно направленным тепловым и концентрационным градиентам плотности.

Проанализировано изменение структуры стационарных конвективных валов, появляющихся непосредственно после потери устойчивости основного состояния жидкости, с ростом отношения плавучестей. Основным называется состояние жидкости, при котором отсутствует среднее течение, и тепломассоперенос поперек субслоев осуществляется только за счет двойной диффузии (диффузии тепла и компоненты бинарной жидкости). Выделены четыре характерных вида валов, различающихся по размеру: коротковолновые валы, которые локализуются в пределах жидкостного субслоя, длинноволновые валы двух видов, охватывающие оба субслоя, и «суперкоротковолновые» валы, формирующиеся вблизи границы раздела субслоев. Длинноволновые валы генерируются при больших по модулю отношениях плавучестей, когда либо оба градиента плотности сонаправлены ($N > 0$), либо концентрационный градиент плотности преобладает ($N < -1$). Коротковолновые валы имеют место при $-1 < N < 0$, когда тепловой и концентрационный градиенты плотности соизмеримы по величине. «Суперкоротковолновые» валы зафиксированы при малых значениях N .

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-71-00067).

Литература

- [1] Gershuni G., Lyubimov D.. Thermal Vibrational Convection – Wiley, New York, 1998. – 359 p.
- [2]. Jounet A., Bardan G. Onset of thermohaline convection in a rectangular porous cavity in the presence of vertical vibration // Physics of Fluids. – 2001. – Vol. 13. – P. 3234–3246.
- [3]. Ouadhani S., Abdennadher A., Mojtabi A. Analytical and numerical stability analysis of Soret-driven convection in a horizontal porous layer: The effect of vertical vibrations // Eur. Phys. J. E. – 2017. – Vol. 40. – P. 38.
- [4]. Lyubimova T.P., Kolchanova E.A. The onset of double-diffusive convection in a superposed fluid and porous layer under high-frequency and small-amplitude vibrations // Transport in Porous Media. – 2018. – Vol. 122. – P. 97-124.

МНОГОУРОВНЕВАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОПИСАНИЯ НЕУПРУГОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ С УЧЕТОМ ДИНАМИЧЕСКОЙ РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИИ

Кондратьев Н.С., Трусов П.В.

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
kondratevns@gmail.com, tpv@matmod.pstu.ac.ru

Неупругое деформирование при высоких температурах широко применяется на практике для изготовления деталей и конструкций. Существенным отличием горячей деформации от холодной является то, что в металлах и сплавах имеет место два конкурирующих процесса – упрочнение и разупрочнение. Упрочнение, как правило, вызывается увеличением плотности дислокаций и их последующим торможением на препятствиях различной природы. Разупрочнение является следствием понижения запаса внутренней энергии, в том числе за счет уменьшения плотности дислокаций. Основными процессами разупрочнения при горячем деформировании являются динамический возврат и динамическая рекристаллизация [1]. Динамический возврат проходит при более низких температурах, чем рекристаллизация (при значительных степенях деформации – вплоть до 0,3-0,4 гомологической температуры). Динамический возврат включает совокупность процессов, происходящих на атомарных и микромасштабных уровнях, которые приводят к уменьшению предела текучести. Примерами таких процессов являются процессы образования субзерен, полигонизации, коалесценции субзерен, которые реализуются преимущественно за счет неконсервативного движения краевых дислокаций, поперечного скольжения винтовых дислокаций, диффузией точечных дефектов. Динамическая рекристаллизация реализуется в результате прохождения совокупности диффузионно-контролируемых процессов, связанных с образованием и миграцией (перемещением) большеугловых границ зерен в процессе пластической деформации. Движущей силой первичной рекристаллизации является разность запасенной энергии в соседних зернах, которая в первую очередь определяется плотностью дислокаций в кристаллическом материале, а также неравновесностью границ, обусловленной формированием в них высокой плотности дефектов. Новые зерна образуются в областях наибольших искажений решетки, как правило – на границах зерен. Рекристаллизация вызывает как изменение среднего размера зерен, так и уменьшение плотности дефектов в поликристалле, как следствие, изменение одной из основных механических характеристик – предела текучести. По мере деформирования новые зерна испытывают упрочнение, и процесс образования новых зерен циклически повторяется [3]. В работе предлагается структура разрабатываемой многоуровневой модели с внутренними переменными, основанной на физическом подходе [2], предназначенной для исследования эволюции дефектной и зеренной структуры в результате высокотемпературного деформирования с учетом процесса динамической рекристаллизации, ее влияния на физико-механические свойства материала.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края в рамках научного проекта № 20-41-596002.

Литература

- [1] Humphreys F.J., Hatherly M. Recrystallization and related annealing phenomena – Elsevier, 2004. – 605.
- [2] Трусов П.В., Волегов П.С., Кондратьев Н.С. Физические теории пластичности – Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2013. – 244 с.
- [3] Luton M. J., Sellars C. M. Dynamic recrystallization in nickel and nickel-iron alloys during high temperature deformation //Acta Metallurgica. – 1969. – Vol. 17 (8). – P. 1033-1043.

ЭФФЕКТ ВЯЗКОСТИ ВОЗДУХА НА ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ МАТЕРИАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ СРЕД МЕТОДОМ ЛЕВИТИРУЮЩЕЙ КАПЛИ

Коновалов В.В.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

konovalov@icmm.ru

Достаточно известными являются сейчас методы бесконтактного измерения материальных параметров сред, главным образом коэффициентов вязкости и поверхностного натяжения [1]. В указанных экспериментах капля жидкого материала «левитирует» в акустическом либо электромагнитном поле. Поверхность капли испытывает нестационарные возмущения, из эволюции которых, сканируемых посредством видеосистемы, находятся характеристики ее свободных колебаний, непосредственно связанные с физическими свойствами образца. Актуальным является сейчас повышение точности метода путем учета ряда осложняющих факторов, таких, например, как деформация формы капли в поддерживающем ее поле [2], неконцентричность составной капли [3] либо наличие адсорбированного в поверхностном слое жидкости ПАВ [4]. Нами исследуется сферическая в равновесии жидкая капля, которая помещена в объем неподвижного газа и испытывает свободные малоамплитудные колебания под действием капиллярных сил. Жидкость и газ считаются несжимаемыми вязкими средами, для которых записываются линеаризованные уравнения Навье-Стокса и непрерывности. Используются обычные граничные условия, где дополнительно учитывается связь коэффициента поверхностного натяжения с концентрацией ПАВ, а также поверхностные вязкости. Полученное из детерминанта системы амплитудных уравнений дисперсионное соотношение упрощается в рамках приближения малой вязкости жидкости, а также сдвиговой и дилатационной поверхностных вязкостей. Получены ряд оценочных соотношения для поправок к собственной частоте и коэффициенту затухания, а также условия их применимости. Интерес представляет обычно пренебрегаемый эффект вязкости газа [5]. Показано, что при обезразмерных значениях эластичности Гиббса и коэффициентов сдвиговой и дилатационной поверхностной вязкости много меньших, чем корень из обратного числа Рейнольдса для жидкости, все вязкости, за исключением вязкости газа, дают линейные слагаемые в оценке коэффициента затухания. Относительный вклад вязкой диссипации в газе, определенный по вкладу жидкости, увеличивается как корень четвертой степени из размера капли и составляет порядка десяти процентов для капли воды в воздухе диаметром шесть миллиметров. При большей концентрации ПАВ, когда его эффект ощутим, отношение двух вкладов перестает уже зависеть от размера капли и составляет около тринадцати процентов для капли воды, взвешенной в воздушной среде.

Литература

- [1] Egrý I. Surface tension measurements of liquid metals by the oscillating drop technique // J. Mat. Sci. – 1991. – V. 26. – N. 11. – P. 2997-3003.
- [2] Cummings D.L., Blackburn D.A. Oscillations of magnetically levitated liquid droplets // J. Fluid Mech. – 1991. – V. 224. – P. 395-416.
- [3] Lyubimov D.V., Kononov V.V., Lyubimova T.P., Egrý I. Oscillations of a liquid spherical drop encapsulated by a non-concentric spherical layer of dissimilar liquid // European Journal of Mechanics – B/Fluids. – 2012. – V. 32. – P. 80-87.
- [4] LYUBIMOV, D. V., KONOVALOV, V. V., LYUBIMOVA, T. P., & EGRY, I. (2011). Small amplitude shape oscillations of a spherical liquid drop with surface viscosity. Journal of Fluid Mechanics, 677, 204–217.
- [5] Dore B.D. Some effects of the air-water interface on gravity waves // Geophysical & Astrophysical Fluid Dynamics. – 1978. – V. 10. – N. 1. – P. 215-230.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ПЕРОКСИДНОЙ СШИВКИ ИЗОЛЯЦИИ КАБЕЛЕЙ НА СРЕДНЕЕ НАПРЯЖЕНИЕ

Корелин А.А.¹, Труфанова Н.М.¹

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
korelin-art@yandex.ru, ktei@pstu.ru

Для кабелей на среднее и высокое напряжение используют сшитый полиэтилен, механические свойства которого существенно выше линейного полиэтилена. Сшивка производится пероксидным методом, который происходит в вулканизационной трубе в среде азота при температуре 400С°. Наклонная вулканизационная труба представляет собой ряд секций с регулируемой температурой. Для получения качественной изоляции необходимо определение рациональных параметров технологического процесса, позволяющего получить высокую степень сшивки полимера. Определить параметры рассматриваемого процесса можно эмпирически или методом математического моделирования. **Цель работы:** разработка плоской и пространственной математических моделей процессов тепломассопереноса. Сравнение результатов, полученных при реализации моделей. Определение степени сшивки по всему объему изоляционного покрытия. Определение рациональных режимов процесса. **Результаты:** Предложенные математические модели процессов тепломассообмена в трубе вулканизации реализованы методом конечных элементов. Реализация геометрии модели происходила при помощи сеточного генератора ANSYS ICEM CFD, расчет производился решателем ANSYS Fluent. Проведена оценка сходимости моделей. Приведены результаты сравнения основных параметров процесса для двух математических моделей. Подтверждена адекватность разработанных моделей процессов тепломассопереноса в линии вулканизации полиэтиленовой изоляции кабеля, путем сравнения с результатами натурного эксперимента. Получены температурные поля по всей длине линии вулканизации, определены параметры оптимального режима работы вулканизационной линии. Для описания процесса сшивки использовано регрессионное выражение для определения степени сшивки в объеме изоляционного покрытия по полученным температурным полям. В ходе исследования были получены кривые распределения температуры на поверхности жилы и изоляции по длине линии вулканизации. Оценено влияние на распределение температуры таких производственных факторов, как скорость изолирования и режим нагрева линии. На основе полученных данных был произведен расчет степени сшивки изоляции и представлен оптимальный технологический режим сшивки. **Практическая значимость:** возможность использования предложенной математической модели при описании вулканизационных процессов для широкого спектра марко-размеров кабелей среднего и высокого напряжения. Подбор рациональных параметров режима вулканизации, таких как скорость изолирования, режим нагрева линии и охлаждения, степень сшивки, как для проектируемых линий, так и для оптимизации уже существующих технологических режимов, что позволит повысить производительность без потери качества изготавливаемой продукции.

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ СИНГУЛЯРНОСТИ НАПРЯЖЕНИЙ В ВЕРШИНЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ СОПРИКАСАЮЩИХСЯ ТРЕЩИН.

Корепанов В.В.¹, Корепанова Т.О.¹

¹Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
kvv@icmm.ru, ton@icmm.ru

Для задач теории упругости нарушение гладкости исходных данных в некоторых точках, называемых особыми, может привести к появлению в решениях бесконечных напряжений. К числу таких точек принадлежат: точки нарушения гладкости поверхности, точки смены типа краевых условий, точки поверхности, где имеет место контакт различных материалов. Особые точки часто встречаются в расчетных схемах при анализе напряженного состояния, а их окрестности, как правило, являются зонами высокой концентрации напряжений.

Среди многообразия вариантов особых точек наибольший интерес, обусловленный практическим значением, представляют особые точки, определяющие вершины плоских или пространственных трещин, рассматриваемых, соответственно, в рамках двумерной или трехмерной постановок задач теории упругости.

Для двумерных задач проблема построения сингулярных решений практически закрыта [1,2]. При решении этих задач доминировали два аналитических подхода. Оба подхода приводят рассматриваемую задачу к трансцендентному (характеристическому) уравнению относительно показателя сингулярности, которое имеет счетное множество корней, в общем случае комплексных, как с положительными, так и с отрицательными действительными частями.

Иная ситуация имеет место для пространственных трещин, где требуется построение решений трехмерных задач теории упругости. Для их решения в подавляющем большинстве используются различные варианты численных методов. Следует отметить, что численный метод по сравнению с аналитическим методом имеет более широкие возможности, например, при анализе сингулярности напряжений в неоднородных или анизотропных телах, при смешанных краевых условиях.

В работе [3] приводятся основные положения численного метода построения сингулярных решений в окрестности особых точек трехмерных тел и его приложения для анализа характера сингулярности напряжений в окрестности вершины одной и двух пересекающихся клиновидных трещин в различных плоскостях.

В настоящей работе представлены возможности численного метода построения сингулярных решений трехмерных задач теории упругости для анализа характера сингулярности напряжений в окрестности вершины одной и более соприкасающихся плоских клиновидных трещин при различных граничных условиях на боковых гранях.

Работа выполнена в рамках государственного задания ПФИЦ УрО РАН по теме № АААА-А19-119012290100-8

Литература

- [1] Sinclair G.B. Stress singularities in classical elasticity -I: Removal, interpretation, and analysis – Appl. Mech. Rev. – 2004. – V. 57. – N. 4. – P. 251-297.
- [2] Sinclair G.B. Stress singularities in classical elasticity -II: Asymptotic identification – Appl. Mech. Rev. – 2004. – V. 57. – N. 4. – P. 385-439.
- [3] Корепанова Т.О., Матвеев В.П., Севодина Н.В. Численный анализ сингулярности напряжений в вершине пространственных пересекающихся трещин. – 2011. – Т. 4. – № 3. – С.68-73.

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫЙ АНАЛИЗ ПЕН, МОДЕЛИРУЕМЫХ РЕГУЛЯРНЫМИ И НЕРЕГУЛЯРНЫМИ РЕШЕТКАМИ ИЗ ЯЧЕЕК ГИБСОНА-ЭШБИ

Корниевский А.С., Наседкин А.В.

*Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону
alexandr5koren@gmail.com, nasedkin@math.sfedu.ru*

Как известно, естественные материалы имеют ячеистые структуры, например, древесина, кости или кораллы. В последнее время увеличился интерес к исследованию таких структур. Это связано с тем, что они обладают относительно высокими модулями жесткости при низкой плотности [1, 2]. Кроме того, такие материалы могут быть произведены искусственно из различных видов пластика или даже металлов [3, 4]. Существует множество подходов для описания таких клеточных структур, но самым популярным на сегодняшний день является модель Гибсона-Эшби [1, 2]. В данной работе численно исследуются пористые упругие материалы, моделируемые с помощью конечно-элементного программного комплекса ANSYS. Рассматривались как регулярные, так и нерегулярные решетки, состоящие из открытых ячеек Гибсона-Эшби. Разработан набор программ на языке APDL ANSYS, позволяющий строить такие решетки ячеек и их конечно-элементные модели, решать задачи гомогенизации и определять полный набор эффективных модулей упругости для материалов произвольного типа анизотропии.

В качестве примера рассматривался пористый поликарбонат. Это изотропный материал, но неоднородность его решетки может приводить к анизотропии. Поэтому для определения эффективных свойств таких структур численно решались шесть задач с граничными условиями в перемещениях (три задачи о растяжении вдоль осей и три различные сдвиговые задачи). Численные эксперименты для поликарбонатных пен показали, что модель Гибсона-Эшби хорошо описывает поведение высокопористых материалов с пористостью более 75 %, причем при достаточно макрорегулярной структуре. Это также подтверждается другими экспериментами [4, 5]. Для структур с большей плотностью или с сильной нерегулярностью данная модель дает менее удовлетворительное предсказание. Так, эксперименты демонстрируют, что для нерегулярных решеток может наблюдаться существенный разброс значений упругих модулей. Из этого следует, что в случае нерегулярных решеток у поликарбонатных пен возникает геометрическая анизотропия, которая может сильно влиять на значения эффективных модулей для высокопористых структур.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ по проекту № 20-31-90057.

Литература

- [1] Gibson L.J., Ashby M.F. Cellular solids: structure and properties. – Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1997. – 510 p. DOI: 10.1017/CBO9781139878326
- [2] Gibson L.J., Ashby M.F. The mechanics of three-dimensional cellular materials // Proc. Royal Soc. Lond. A 1982. – Vol. 382, iss. 1782. – P. 43-59. DOI: 10.1098/rspa.1982.0088
- [3] Ramirez D. A., Murr L.E., Li S.J., Tian Y.X., Martinez E., Martinez J.L., Machado B.I., Gaytan S.M., Medina F., Wicker R.B. Open-cellular copper structures fabricated by additive manufacturing using electron beam melting // Mater. Sci. Eng. A. – 2011. – Vol. 528, iss. 16-17. – P. 5379-5386. DOI: 10.1016/j.msea.2011.03.053
- [4] Maheo L., Viot P., Bernard D., Chirazi A., Ceglia G., Schmitt V., Mondain-Monval O. Elastic behavior of multi-scale, open-cell foams // Compos. Part B – Eng. – 2013. – Vol. 44, iss. 1. – P. 172-183. DOI: 10.1016/j.compositesb.2012.06.006
- [5] Maconachie T., Leary M., Lozanovski B., Zhang X., Qian M., Faruque O., Brandt M. SLM lattice structures: Properties, performance, applications and challenges // Mater. Des. – 2019. – Vol. 183. – Article 108137. DOI: 10.1016/j.matdes.2019.108137

СТАЦИОНАРНАЯ ТЕРМОМАГНИТНАЯ КОНВЕКЦИЯ В ЗАМКНУТОМ КОНТУРЕ

Косков М.А., Пшеничников А.Ф.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт механики
сплошных сред УрО РАН, г. Пермь
koskov.m@icmm.ru, pshenichnikov@icmm.ru

Исследуется развитая стационарная конвекция магнитной жидкости в замкнутом протяжённом гидродинамическом контуре, подогреваемом сбоку (рис. 1). Контур располагается в вертикальной плоскости и обдувается потоком термостатированного воздуха, обеспечивающего постоянство коэффициента теплоотдачи с поверхности труб, а в стационарном состоянии наблюдается экспоненциальное распределение температуры вдоль охлаждаемого участка контура. Измеряемый в эксперименте показатель экспоненты позволяет получить информацию об интегральном осевом тепловом потоке – числе Нуссельта. Тестовые опыты проведены на ундекане в режиме гравитационной конвекции. Опыты с магнитной жидкостью умеренной концентрации проводились как в режиме гравитационной конвекции, так и в режиме смешанной (гравитационной и термомангнитной конвекции). В последнем случае на участок контура вблизи нагревателя накладывалось градиентное магнитное поле. Показано, что в диапазоне чисел Релея 10^3 - 10^4 термомангнитная конвекция увеличивает интенсивность теплообмена в 4-6 раз.

Актуальность исследования обусловлена тем, что в большинстве работ по термомангнитной конвекции, например [1], исследовалось механическое равновесие или слабые надкритические режимы, а приложенное к системе магнитное поле было близко к однородному. В этих условиях интенсивность гравитационной конвекции сравнима с интенсивностью термомангнитной.

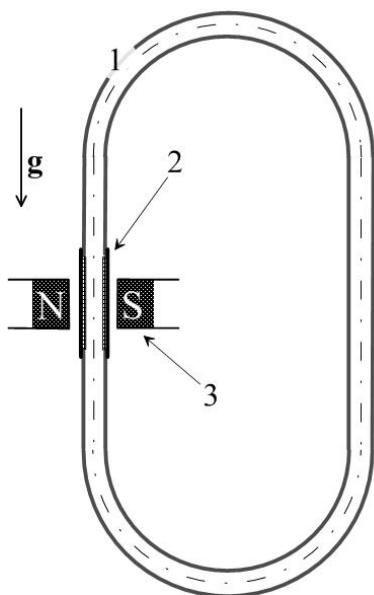


Рис. 1. Схематическое изображение экспериментального контура. 1- стеклянная трубка, 2-нагреватель, 3- полюсные наконечники намагничивающей системы.

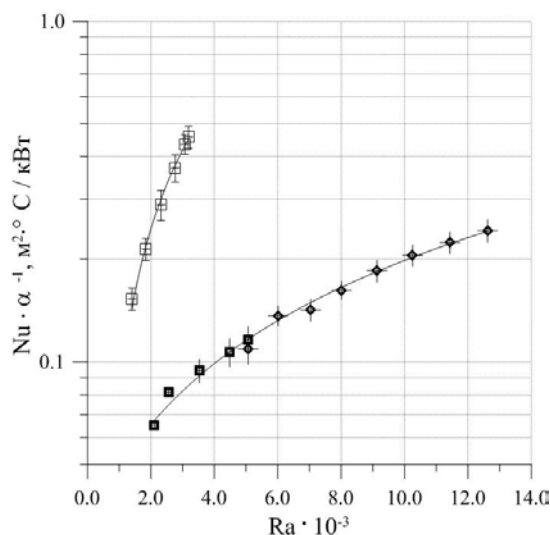


Рис. 2. Число Нуссельта на охлаждаемом участке контура, нормированное на коэффициент теплоотдачи в зависимости от теплового числа Релея. $\diamond$ - ундекан, $\blacksquare$ - магнитная жидкость в нулевом поле, $\square$ - магнитная жидкость во внешнем градиентном поле.

Литература

- [1] Suslov S.A., Bozhko A.A., Sidorov A.S., Putin G.F., Thermomagnetic convective flows in a vertical layer of ferrocolloid: Perturbation energy analysis and experimental study// Phys. Rev. E 86/ 2012. 016301.

О БИОКОНВЕКЦИИ ВЫСШИХ ЖИВОТНЫХ

Костарев К.В., Брацун Д.А.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
KVKostarev@pstu.ru, DABracun@pstu.ru

Коллективное поведение в сложных биологических системах может выступать в роли механизма сохранения энергии и играть ключевую роль при выживании группы организмов [1]. Одним из хорошо известных примеров такого рода является биоконвекция, которая наблюдается в растворах с аэробными микроорганизмами и свободной поверхностью. Движение бактерий по градиенту кислорода приводит среду к фазовому переходу второго рода, запуская макроскопическое упорядоченное движение элементов среды. Вся система в целом приобретает новые свойства, такие как длинные корреляции и согласованное взаимодействие микроорганизмов. Таким образом, биоконвекция имеет, прежде всего, физическую природу. Подобные явления в среде высших животных трудно дифференцировать от социального поведения в группе, поэтому они практически не изучены.

В данной работе в среде высших животных рассматривается явление, которое имеет сходство с конвективным движением жидкости в физической системе с действующей подъемной силой. В качестве конкретного примера приводится коллективное поведение во время зимовки императорских пингвинов, которые демонстрируют спорадический переход к плотно сжатой среде, а затем к макроскопическим вихревым структурам в этой среде. Установлено, что в этих вихревых движениях участвуют сотни особей, а внутри плотной стаи устанавливается комфортная температура [2].

Мы предлагаем математическую модель явления, которая опирается на гипотезу о том, что эффективная подъемная сила в стае генерируется градиентом температуры (аналог тепловой конвекции). Особи в модели представлены в виде совокупности дискретных тел, взаимодействующих друг с другом в соответствии с эффективным потенциалом, вид которого зависит как от физических эффектов, так и от социо-физических процессов в стае [3]. Управляющими параметрами задачи являются температура окружающей среды и скорость ветра. Показано, что модель воспроизводит большинство явлений, наблюдаемых в стае императорских пингвинов в естественных условиях. Например, продемонстрирован фазовый переход к вихревому движению при понижении температуры внешней среды, а также асимметрия паттерна в случае бокового ветра. Предложено сплошносредное описание данной системы, которое оказалось аналогичным тепловой конвекции в пористой среде с цилиндрической симметрией и радиальным направлением подъемной силы.

Работа финансово поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (грант № FSNM-2020-0026).

Литература

- [1] Trenchard H., Perc M. Energy saving mechanisms, collective behavior and the variation range hypothesis in biological systems: a review //BioSystems. – 2016. – Vol. 147. – P. 40-66.
- [2] Ancel A., Beaulieu M., Le Maho Y., Gilbert C. Emperor penguin mates: keeping together in the crowd //Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences. – 2009. – Vol. 276. – No. 1665. – P. 2163-2169.
- [3] Костарев К.В., Брацун Д.А. Математическое моделирование фазовых переходов при коллективном поведении императорских пингвинов в условиях антарктической зимовки // Материалы всероссийской конференции «Глобальные проблемы Арктики и Антарктики» посвященной 90-летию со дня рождения акад. Н. П. Лавёрова, Архангельск, 2 – 5 ноября 2020 г. – Архангельск, 2020. – С. 482-485.

КОНТРАКЦИЯ В ЖИДКОСТЯХ

Костарев К.Г., Торохова С.В.

*Институт механики сплошных сред ПФИЦ УрО РАН, Пермь
kostarev@icmm.ru, torokhova.s@icmm.ru*

Контракция – неаддитивное изменение объема (и, соответственно, плотности) смеси жидкостей при вариации концентрации одной из ее компонент. Причиной наблюдаемого феномена является изменение межмолекулярного расстояния вследствие переупаковки молекул и образования/разрушения «шубы» молекул одной компоненты смеси вокруг молекул другой компоненты при изменении их концентрации, например, в ходе процессов поглощения или растворения.

Сам эффект контракции обнаружен давно – достаточно вспомнить уменьшение суммарного объема при смешивании равных объемов воды и этилового спирта, но исследован он с позиции физико-химии растворов и известен как избыточный молярный объем. С точки зрения гидродинамики контракцию можно отнести к второстепенным эффектам, таким как термодиффузия и конвекция Марангони, которые в обычных условиях маскируются интенсивной гравитационной конвекцией, но – в отличие от них – ее проявление до сих пор остается практически неизученным. Как и указанные выше эффекты, контракция занимает свою специфическую нишу, в которой она может сыграть значительную роль – это системы жидкостей с близкой или равной плотностью. В подобных системах диффузия одной из компонент может привести к развитию различных гидродинамических явлений – от неустойчивости межфазной границы до формирования конвективных течений при наличии устойчивой стратификации по плотности – в связи с тем, что контракция может изменяться от аномально большой до нулевой для смесей различных жидкостей даже на основе общего растворителя.

К сожалению, прогнозирование и исследование таких явлений сильно осложнено отсутствием данных о величине контракции для большинства используемых растворов. Для устранения этого недостатка проведен расчет контракции для ряда наиболее известных бинарных растворов. Предпринята попытка систематизации полученных данных, определения зависимостей контракции от температуры и числа метиленовых групп для гомологических рядов одноатомных спиртов и карбоновых кислот, а также установления корреляции контракции и других физико-химических свойств растворов.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта РФФИ № 19-41-590009.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ГРЕЮЩЕГО КАБЕЛЯ ПРИ ДЕПАРАФИНИЗАЦИИ НЕФТЯНЫХ СКВАЖИН

Костарев Н.А., Труфанова Н.М.

¹ *Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь*
nikostarev@gmail.com, trufanova@pstu.ru

Осаждение асфальтосмолопарафиновых отложений (АСПО) на внутренней поверхности стенок лифтовых труб и насосном оборудовании при движении нефтяной жидкости является одной из самых болевших проблем в нефтяной промышленности. Парафиновые отложения значительно снижают эффективность работы скважины вплоть до ее полного выхода из строя, а также увеличивают износ оборудования [1]. Для предупреждения и удаления АСПО применяются химические, механические, физические, тепловые и другие методы [2-5]. Многолетняя работа исследователей в данном направлении показала, что осаждение АСПО происходит по кристаллизационному механизму, а определяющим фактором является снижение температуры потока нефтяной жидкости [6].

Одним из способов борьбы с АСПО является прогрев участка скважины, подверженного отложению парафина, греющим кабелем [2]. Применение греющего кабеля позволяет поддерживать температуру потока нефтяной жидкости выше температуры начала кристаллизации парафина, тем самым предупреждая осаждение АСПО.

В работе представлена пространственная, нестационарная осесимметричная математическая модель процессов тепломассопереноса в нефтяной скважине с греющим кабелем, численная реализация которой позволяет получать поля температур по всей длине вертикальных скважин, что представляется существенным для задач борьбы с АСПО. Рассмотрены режимы работы кабеля при различной тепловой мощности. Получено значение необходимой мощности нагрева, позволяющей эффективно решить проблему отложения парафина при использовании кабеля в номинальном режиме работы. Был разработан рациональный режим работы греющего кабеля в периодическом режиме, в результате реализации которого происходит экономия электрической энергии.

Литература

- [1] Каменщиков Ф. А. Тепловая депарафинизация скважин. М., Изд.: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2005.
- [2] Kostarev N. A., Trufanova N. M. Simulation and automation of thermal processes in oil well. – IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018. – Vol. 327. 6 p.
- [3] Kovrigin L.A, Kukharchuk I.B. Automatic control system for removal of paraffin deposits in oil well in permafrost region by thermal method // Chem. Eng. Res. and Des. 2016. – V. 115. Part A. P. 116.
- [4] Balakirev V.A., Sotnikov G.V., Tkach Yu.V., Yatsenko T.Yu. Heating and melting of asphalt–paraffin plugs in oil-well equipment using an electromagnetic radiation source operating in a periodic mode // J. of Applied Mech. and Tech. Phys. 2001 – V. 42. № 4. P. 680.
- [5] Fatykhov M.A. Heating and Melting of Paraffin in a Coaxial System under the Effect of High-frequency Electromagnetic Radiation // 2002. High Temperature. V. 40. № 5. P. 746
- [6] Сорокин С.А., Хавкин С.А. Особенности физико-химического механизма образования АСПО в скважинах // Бурение и нефть. 2007. №10. С. 30-31.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЛЕДОПОРОДНОГО ОГРАЖДЕНИЯ ПРИ ЕГО РАЗМОРАЖИВАНИИ

Костина А.А.¹, Желнин М.С.¹, Плехов О.А.¹, Левин Л.Ю.²

¹*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

²*Горный институт УрО РАН, Пермь*

kostina@icmm.ru, zhelnin.m@icmm.ru, poa@icmm.ru, aerolog.lev@mail.ru

Искусственное замораживание грунтов широко применяется при строительстве вертикальных шахтных стволов с целью создания временного водонепроницаемого барьера, обеспечивающего безопасность проходческих работ. Реализация данной технологии предполагает бурение замораживающих колонок по периметру будущего шахтного ствола, по которым циркулирует охлаждающий рассол. На первой стадии искусственного замораживания происходит формирование сплошной ледопородной стенки с заданной толщиной, способной выдерживать давление окружающих пород. В течении второго этапа возводится постоянная крепь, при этом толщина ограждающей конструкции из замороженного грунта поддерживается на заданном уровне. На заключительном этапе происходит размораживание горных пород.

Наибольшую нагрузку ледопородное ограждение (ЛПО) испытывает в период времени, когда грунт в пределах ограждения вынут, а внутренняя стенка еще не закреплена постоянной крепью. Таким образом, исследование изменения напряженно-деформированного состояния породного массива при возведении постоянной крепи является актуальной и важной задачей с точки зрения безопасности проходки шахтного ствола. На время проведения буровзрывных работ проводится отключение замораживающих колонок, что может способствовать потере устойчивости ЛПО и вывалу размороженного грунта вглубь шахтного ствола. В данной работе проводится оценка безопасности проходческих работ при отключении замораживающих колонок на период времени, равный четырем суткам. Предполагается, что ЛПО теряет свою несущую способность при перемещении стенки незакрепленного участка заходки более, чем на 10 см. Расчеты проводятся для двух грунтовых слоев: кварцево-глауконитового алевролита, залегающего на глубине 48.8-58.0 м, и глауконито-кварцевого песка, расположенного на глубине 58-85.6 м. Первая из рассмотренных пород характеризуется тем, что при ее замораживании происходит интенсивная миграция влаги к фронту фазового перехода. Моделирование работы ЛПО осуществляется методом конечных элементов в пакете Comsol Multiphysics. Перемещения внутренней стенки при размораживании ЛПО определяются для двух случаев его начальной толщины. Первый случай соответствует ситуации, когда грунт полностью промораживается до контура, совпадающего с контуром будущего ствола. Во втором случае начальная толщина ЛПО совпадает с проектным значением. В результате было показано, что ЛПО в кварцево-глауконитовом алевролите не потеряет своей несущей способности даже при полностью размороженном грунте. Для глауконито-кварцевого песка расчетное время потери несущей способности ЛПО составило 85 суток в случае, когда исходная толщина совпадала с контуром шахтного ствола, и 24 дня, когда начальная толщина ЛПО была равна проектной.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда в рамках проекта № 17-11-01204.

ПРИМЕНЕНИЕ МНОГОУРОВНЕВОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ОПИСАНИЯ МЕЖКРИСТАЛЛИТНОГО РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛОВ

Котельникова Н.В.

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
kotelnickova@gmail.com*

Исследования в области разрушения материалов – одна из ключевых проблем, стоящих перед физиками и механиками. Основной сложностью в решении этой проблемы является многообразие свойств исследуемых металлов и сплавов, а также условий нагружения деталей (в процессах изготовления и эксплуатации). Существующее множество научных работ, посвященных описанию разрушения (как правило, для конкретных материалов и определенных условий нагружения), не позволяют считать полностью решенной задачу повышения надежности деталей. Вероятно, в настоящее время имеется необходимость создания универсального подхода исследования разрушения, который позволит описывать все стадии этого процесса – от возникновения в материале микротрещин (в том числе – на стадии изготовления), до развития магистральных трещин и потери деталью несущей способности.

Представляется возможным реализовать такой подход при помощи многоуровневой математической модели, основанной на физических теориях пластичности (ФТП) [1]. Учёт ФТП позволяет явным образом описывать внутреннюю дефектную и зеренную структуру материала, а также процессы деформирования и разрушения деталей. В рассматриваемой многоуровневой модели выделен мезоуровень-I, служащий для описания упругопластического деформирования и изменения ориентации кристаллитов. Подмодель мезоуровня-II позволяет описывать эволюцию плотностей дислокаций на системах скольжения (СС) за счёт таких механизмов, как зарождение новых дислокаций, аннигиляция разноименных дислокаций, образование барьеров Ломера-Коттрелла. Также на мезоуровне-II описывается зарождение микротрещин, для чего используется модель Стро, согласно которой дислокации, поджатые к некоторому препятствию, могут образовать супердислокацию (зародыш микротрещины) [2, 3]. Отмечается, что модель Стро применима для описания как внутрикристаллитного, так и межкристаллитного разрушения. Реализация определенного сценария разрушения зависит от множества факторов: наличие примесей на границах, несовместность СС соседних зерен, ведущая к накоплению в границах дислокаций ориентационного несоответствия, может привести к возникновению раскола между зернами, тогда как, например, наличие барьеров Ломера-Коттрелла или же включений жесткой фазы может вызвать возникновение и распространение трещин внутри зерна и, далее, в соседних зернах. Результаты реализации модели дислокационной динамики качественно соответствуют известным экспериментальным данным.

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

Литература

- [1] Трусов П.В., Швейкин А.И. Многоуровневые модели моно- и поликристаллических материалов: теория, алгоритмы, примеры применения. – Новосибирск: Издательство СО РАН, 2019. – 605 с. DOI: 10.15372/MULTILEVEL2019TPV.
- [2] Владимиров В.И. Физическая природа разрушения металлов. – М.: Металлургия, 1984. – 280 с.
- [3] Stroh A. N. The formation of cracks as a result of plastic flow// Proc. R. Soc. London. Ser. – 1954. – A 223. – P. 404–414. DOI: 10.1098/rspa.1954.0124.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ НЕОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ТЕЛ В ГРУНТОВЫХ СРЕДАХ

Котов В.Л., Линник Е.Ю.

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород
vkotov@inbox.ru, ElenkaLinnik@gmail.com

При решении задач удара и проникания широкое распространение получили численные методы [1] на основе известных моделей грунтов, а также приближенные методики, в частности модель локального взаимодействия (МЛВ). Численно исследовалось проникание осесимметричных ударников [2] по нормали к поверхности мягкого грунта, однако движение тел более сложной формы в настоящее время по-прежнему изучено недостаточно. В данной работе проводится численное исследование процессов удара и проникания жестких тел по нормали в упругопластическую грунтовую среду в пространственной постановке. Математическая модель динамики среды записывается в прямоугольной декартовой системе координат в виде системы дифференциальных уравнений, выражающих законы сохранения массы и импульса и уравнений теории пластического течения с условием пластичности Мизеса-Шлейхера [3]. Расчеты проводились при постоянных и начальных скоростях внедрения 150, 300 и 600 м/с, что при заданных параметрах среды соответствует дозвуковому и сверхзвуковому режимам проникания.

В качестве тела проникания был выбран ударник со звездообразным поперечным сечением. Четырехлучевая звезда образована пересечением под прямым углом двух ромбов с отношением диагоналей равным 2. Высота такого тела равна высоте четырехугольной пирамиды с отношением диагоналей равным 3 и составляет 70% высоты конуса с тем же наклоном боковой поверхности.

Установлено, что с ростом начальных скоростей проникания различия между максимальным значением силы сопротивления внедрения и значением на квазистационарной стадии увеличиваются. При этом отмечается, что силы сопротивления внедрению в диапазоне изменения скоростей 150-600 м/с аппроксимируются квадратным трехчленом, что свидетельствует о возможности разработки на основе МЛВ инженерных моделей для решения задач удара и проникания в грунт и не осесимметричных тел.

Работа выполнена при частичном финансировании РФФИ (№ 19-08-00430 а).

Литература

- [1] Баженов В.Г., Брагов А.М., Котов В.Л. Экспериментально-теоретическое исследование процессов проникания жестких ударников и идентификация свойств грунтовых сред // Прикладная механика и техническая физика, 2009. Т. 50, № 6. - С. 115-125.
- [2] Котов В.Л., Линник Е.Ю., Константинов А.Ю. Моделирование процессов динамического внедрения пространственных тел в сжимаемую упругопластическую среду – Вестник ПНИПУ, 2017, №4. - С. 92-108.
- [3] Линник Е.Ю., Котов В.Л., Константинов А.Ю. Сравнительный анализ сил сопротивления внедрению конических и пирамидальных тел в упругопластическую среду // Проблемы прочности и пластичности, 2017. Т. 79, № 3. – С. 245–255.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛНОВОЙ КАПИЛЛЯРНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ В ПЛОСКО-СИММЕТРИЧНОЙ ГЕОМЕТРИИ

Кочурин Е.А.¹,

¹Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург
kochurin@iep.uran.ru

Проведено прямое численное моделирование волновой капиллярной турбулентности поверхности жидкости, развивающейся в плоско-симметричной одномерной геометрии. Хотя нетривиальные трех- и четырех-волновые резонансные взаимодействия отсутствуют в этой вырожденной геометрии, результаты расчетов демонстрируют, что передача энергии между масштабами все же происходит, сосредоточившись вокруг линейного дисперсионного соотношения, которое уширяется вследствие нелинейных эффектов. Спектр волн демонстрирует четкий скейлинг волнового числа по степенному закону, который хорошо согласуется с аналитическим спектром турбулентности, полученным на основе размерностного анализа, включающего резонансные четырех-волновые взаимодействия. Проведенный корреляционный анализ высокого порядка подтверждает количественно, что доминирующую роль в исследуемой задаче играют четырех-волновые квазирезонансные взаимодействия. На основе вычислительных данных в работе дана оценка для постоянной Колмогорова-Захарова. Мы интерпретируем наши результаты как первое численное наблюдение анизотропной капиллярной волновой турбулентности, в которой четырех-волновые квази-резонансные взаимодействия играют доминирующую роль, см. [1]. Работа поддержана Советом по грантам Президента РФ, МК-3003.2021.1.2

Литература

[1] Kochurin E., Ricard G., Zubarev N., Falcon E. Numerical simulation of collinear capillary-wave turbulence // Письма в ЖЭТФ, Т. 112, В. 12, С. 799 (2020)

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНВАЗИВНОЙ КАРЦИНОМЫ: БИОМЕХАНИКА МАЛЫХ ГРУПП РАКОВЫХ КЛЕТОК

Красняков И.В.¹, Брацун Д.А.¹, Писмен Л.М.²

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь

²Израильский технологический институт – Технион, Хайфа

krasnyakov_ivan@mail.ru, dabracun@pstu.ru, pismen@technion.ac.il

Рост инвазивной карциномы сопровождается многообразием различных структур, которые наблюдаются при клинических исследованиях [1]. Все возможные случаи можно разделить на многоклеточные (число клеток в структуре $N > 10$), и малоклеточные ($N \leq 10$). К первым структурам можно отнести солидную, криброзную, папиллярную и некоторые др. Ко вторым можно отнести альвеолярную, тубулярную, трабекулярную структуры и группы отдельных клеток [2]. Моделирование биомеханики многоклеточных раковых структур было проведено в работе авторов [3]. Были определены управляющие параметры, при изменении которых возникают опухолевые структуры, исследована динамика роста, а также дифференциация клеток в раковом социуме. Возникающие структуры были классифицированы в терминах «Энтропия-Сложность».

Данная работа посвящена построению математической модели биомеханики малых групп раковых клеток карциномы, которые играют принципиальную роль при инвазии опухоли. В её основе лежит биомеханическая клеточная модель, предложенная в [4] и развитая на случай опухоли в [3]. Особенность образования малых групп клеток, мигрирующих в ткани, заключается в описании почкования группы от основной опухоли, а затем описании совместного движения группы. Также возможен другой вариант исследуемого структурообразования. Для его моделирования мы переформулировали определение потенциальной энергии ткани в следующем виде:

$$E = \sum_{cells} \left[\eta (A_i - A_0)^2 + \sum_{edges} \mu_{ij} L_{ij}^2 \right],$$

где η – параметр, отвечающий за сохранение начальной площади клетки A_0 . Во втором слагаемом суммирование осуществляется по числу сторон клетки, где L_{ij} – длина j -границы i -ой клетки, а $\mu_{ij} = \mu_0 - \beta C_i$. Здесь μ_0 и β – параметры задачи. Как известно, раковые клетки осуществляют синтез белков, способствующих размягчению здоровой ткани при миграции и инвазии раковых клеток [2]. Поэтому C_i обозначает здесь концентрацию такого белка в i -ой клетке. Второе слагаемое уравнения влияет на интеркаляцию, которая инициирует самодвижение отдельных раковых клеток. Таким образом мы описываем образование малых групп раковых клеток. В работе представлены результаты численного моделирования процессов структурообразования, отпочковывания и миграции малых групп раковых клеток в эпителиальной ткани.

Работа осуществляется при финансовой поддержке РФФИ (грант № 20-31-90024).

Литература

- [1] Sinn H.P., Kreipe H. A brief overview of the WHO classification of breast tumors, 4th edition, focusing on issues and updates from the 3rd edition // Breast Care. – 2013. – Vol. 8(2). – P. 149-154.
- [2] Крахмаль Н.В., Завьялова М.В., Денисов Е.В. и др. Инвазия опухолевых эпителиальных клеток: механизмы и проявления // Acta Naturae. – 2015. – Т. 7, № 2. – С. 18-31.
- [3] Bratsun D.A., Krasnyakov I.V., Pismen L.M. Biomechanical modeling of invasive breast carcinoma under a dynamic change in cell phenotype: collective migration of large groups of cells // Biomech. Model. Mechanobiol. – 2019. – Vol. 19. – P. 723-743.
- [4] Salm M., Pismen L. Chemical and mechanical signaling in epithelial spreading // Phys. Biol. – 2012. – Vol. 9. – P. 026009-026023.

МАГНИТОВЯЗКИЙ ЭФФЕКТ В СУСПЕНЗИИ МАГНИТНЫХ НАНОКЛСТЕРОВ

Кузнецов А.А.^{1,2}

¹Уральский федеральный университет им. первого президента России Б.Н. Ельцина,
Екатеринбург

²Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь
andrei.kuznetsov@urfu.ru

Магнитовязким эффектом называется изменение эффективной вязкости феррожидкости под действием приложенного магнитного поля. Уже много десятилетий этот значимый с прикладной точки зрения эффект изучается на примере жидкостей, содержащих однодоменные магнитные наночастицы [1–3]. Настоящая работа посвящена теоретическому исследованию магнитовязкого эффекта в слабо концентрированной суспензии кластерных («многоядерных») наночастиц.

Исследуемая система – квазисферический жёсткий кластер однодоменных магнитных ядер, взвешенный в изотропной немагнитной жидкой матрице. В матрице создано сдвиговое течение, а также действует однородное внешнее магнитное поле. Ориентация поля относительно вектора скорости вращения жидкости может быть произвольной. Вращательная вязкость системы рассчитана с помощью гидродинамической теории Шлиомиса для жидкостей с внутренним вращением и метода неравновесной ланжевеновской динамики. Зависимости вязкости от напряженности поля качественно совпадают с известными зависимостями для суспензий однодоменных частиц. Показано, что результирующий реологический отклик системы при заданных внешних условиях сильно зависит от интенсивности диполь-дипольных взаимодействиями между ядрами кластерной частицы. Увеличение характерной энергии этих взаимодействий ведёт у уменьшению вращательной вязкости.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 19-72-10033.

Литература

- [1] Шлиомис М. И. Магнитные жидкости // Успехи физических наук. – 1974. – Т. 112. – № 3. – С. 427-458.
- [2] Soto-Aquino D., Rinaldi C. Magnetoviscosity in dilute ferrofluids from rotational Brownian dynamics simulations // Physical Review E. – 2010. – Vol. 82. – № 4. – Art. no. 046310.
- [3] Zablotsky D., Blums E., Herrmann H. J. Self-assembly and rheology of dipolar colloids in simple shear studied using multi-particle collision dynamics // Soft Matter. – 2017. – Vol. 13. – № 37. – P. 6474-6489.

ЭВОЛЮЦИЯ РАЗМЕРА РАСТВОРИМОЙ АЭРОЗОЛЬНОЙ ЧАСТИЦЫ ВО ВЛАЖНОМ ВОЗДУХЕ

Кузнецова Ю.Л.

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

Изучение закономерностей изменения размеров аэрозольных частиц вследствие сорбции влаги из воздуха имеет большое значение при решении многих прикладных задач. В частности, при описании распространения загрязнений окружающей среды и моделировании климатических явлений, для оценки слеживаемости растворимых дисперсных веществ, при проектировании систем рудничной вентиляции следобывающих шахт.

Витающие в воздухе и осевшие водорастворимые аэрозольные частицы активно взаимодействуют с влагой воздуха. В результате этих процессов происходит рост их массы и объема, увеличивается скорость оседания и коагуляции частиц. Эти превращения влияют на макроскопическое поведение ансамбля частиц дисперсной фазы и, в конечном счете, на свойства аэрозоля в целом.

Известно, что гигроскопические свойства аэрозольных частиц могут в значительной степени отличаться от гигроскопических свойств соответствующих объемных фаз. В частности обнаружено, что сложная микроструктура наночастиц приводит к избыточному объемному поглощению воды, вызывая в ряде случаев их полное растворение при более низких значениях относительной влажности, чем в идентичных по составу макросистемах [1]. Также большое значение на состояние аэрозолей оказывает несовпадение кривых гигроскопического роста и испарения частиц, проявляющееся в формировании гистерезисной петли на изотерме абсорбции.

В работе рассмотрены различные модели для определения изменения количественных характеристик массы и объема в следствие взаимодействия с влагой воздуха для водорастворимых аэрозольных частиц различного химического состава и исходного радиуса [2, 3]. Построена физико-математическая модель динамики функции распределения частиц по размеру с учетом гигроскопических процессов.

Литература

- [1] Mikhailov E., Vlasenko S., Martin S., Koop T., Poschl U. Amorphous and crystalline aerosol particles interacting with water vapor: conceptual framework and experimental evidence for restructuring, phase transitions and kinetic limitations // Atmos. Chem. Phys. - 2009. - т. 9. - с. 9491—9522
- [2] Clegg S.L., Brimblecombe P. On-line aerosol inorganics model <http://www.aim.env.uea.ac.uk/aim/aim.htm>
- [3] Архипов В. И. Зависимость радиуса обводнения аэрозольной частицы, находящейся во влажном воздухе, от химического состава и внешних термодинамических условий // Известия высших учебных заведений. Приволжский регион. Физико-математические науки. — 2007. — т. 4, - с. 75-85

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ И ДЕФОРМАЦИОННЫХ СВОЙСТВ СОЛЯНЫХ ПОРОД ПОД ДЕЙСТВИЕМ РАСТЯГИВАЮЩИХ УСИЛИЙ

Кузьминых В.С.

ГИ УрО РАН, Пермь

vskuzminyh@mail.ru

Приоритетным задачей, при безопасном ведении горных работ в условиях Верхнекамского месторождения калийных солей, является поддержание устойчивости элементов подземных конструкций, в том числе, кровли выработок различного назначения [1]. Ввиду малого значения прочности при растяжении, зачастую именно растягивающие напряжения являются причиной разрушения грузонесущих элементов подземных сооружений [2,3]. Таким образом, обеспечение безопасных условий ведения горных работ невозможно без экспериментальных исследований по изучению процессов деформирования и разрушения соляных пород при растяжении.

Для проведения экспериментов были изготовлены прямоугольные образцы из соляных пород длиной 250 мм и поперечным размером 50×50 мм, которые выпиливались из породных монолитов. Испытания проводились на универсальной испытательной машине Zwick/Z050. В процессе испытаний поддерживалась постоянная скорость перемещения траверс пресса, составляющая 0,1 мм/мин. Измерение продольных (осевых) деформаций осуществлялось на поверхности образца с помощью трех специальных выносных датчиков консольного типа.

Полученные результаты представлялись в виде полных диаграмм деформирования «относительная деформация растяжения – растягивающее напряжение», которые использовались для определения прочностных и деформационных параметров. Анализ результатов позволил установить, что значение предела прочности соляных пород при прямом растяжении изменяется в интервале 0,25÷1,01 МПа; относительная разрушающая деформация варьировалась в пределах 0,027÷0,136%; предельный модуль деформации – 0,28÷1,94 ГПа; начальный модуль деформации – 0,61÷2,37 ГПа; модуль спада – 0,09÷1,51 ГПа.

Литература

- [1] Указания по защите рудников от затопления и охране подрабатываемых объектов на Верхнекамском месторождении калийно-магниевых солей – Пермь, 2014 г. – 132 с.
- [2] Карташов Ю.М., Матвеев Б.В., Михеев Г.В., Фадеев А.Б. Прочность и деформируемость горных пород. – М.: Недра, 1979. – 269 с.
- [3] Рыльников М.В., Зотеев О.В. Геомеханика – Москва, 2003. – 240 с.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАРОЖДЕНИЯ МИКРОТРЕЩИН В ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛАХ В РАМКАХ ДИСЛОКАЦИОННО-ОРИЕНТИРОВАННОГО ПОДХОДА

Курмоярцева К.А.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
kurmoiartseva.k@mail.ru

Исследования прочности и долговечности деталей и конструкций из металлов и сплавов уже в течение многих десятилетий остаются весьма актуальными. Важным остается вопрос прогнозирования поведения деталей при их эксплуатации с учетом накопления дефектов на стадии изготовления. В процессе изготовления материал испытывает значительные неупругие деформации, которые ведут к эволюции внутренней структуры и возможному появлению областей с высокими локальными напряжениями. Появление технологических дефектов на стадии изготовления может оказывать значительное влияние на срок эксплуатации. Известно, что процесс деформирования существенно зависит от изменений внутренней структуры материала, в том числе дефектной. Перспективным инструментом исследования поведения поликристаллических материалов является математическое моделирование с использованием физических теорий пластичности, позволяющее отслеживать влияние отдельных механизмов накопления повреждений и деформирования на особенности поведения материалов. Целью данного исследования является построение прямой дислокационно-ориентированной математической модели, обеспечивающей возможность описания процессов деформирования и разрушения на мезо- и микроуровнях, в том числе зарождение и развитие трещин в результате эволюции внутренней дефектной структуры материала. Деформирование и разрушение являются сложными, многоэтапными процессами с различными ведущими механизмами, от скольжения дислокаций, образования скоплений и зарождения микротрещин до распространения магистральной трещины, разделяющей всё материальное тело. В связи с этим в модели выделяются несколько структурно-масштабных уровней, для описания разных этапов процесса деформирования и разрушения. Особое внимание уделяется исследованию дефектной структуры материала, в частности дислокационной, эволюция которой оказывает значительное влияние на пластическое деформирование и процессы зарождения микротрещин.

Рассматривается поликристаллический агрегат, состоящий из совокупности зерен. Каждое зерно представляется совокупностью субзерен (кристаллитов), в пределах каждого из которых распределение плотности дислокаций полагается равномерным. Выделяется уровень описания упругого и пластического деформирования зерен, в рамках которого переменными являются континуальные механические характеристики – скорости сдвигов и касательные напряжения в системах скольжения. Следующий уровень ориентирован на описание эволюции плотностей дислокаций и скоростей их движения, на котором рассматриваются механизмы эволюции плотностей дислокаций: зарождение новых в результате работы источников Франка – Рида, аннигиляция разноименных дислокаций близких систем скольжения, потоки дислокаций между кристаллитами, которые в общем случае могут привести к образованию дислокаций ориентационного несоответствия. Кроме того, при локальном скоплении дислокаций одного знака, превышающем критическое значение, образуется микротрещина по механизму Стroh [1]. Преимуществом данного подхода является рассмотрение механизмов деформирования на мезо- и микроуровнях и физическая обоснованность критериев образования микротрещин в материале. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект №17-19-01292).

Литература

- [1] Stroh A. N. The formation of cracks as a result of plastic flow // Proc. R. Soc. Lon. Ser. –1954. – A 223. – Pp. 404–414.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ АКУСТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ В СОНОХИМИЧЕСКОМ РЕАКТОРЕ

Кучинский М.О.^{1,2}, Любимова Т.П.^{1,2}, Рыбкин К.А.^{1,2}, Козлов М.В.²

¹ Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

² Пермский государственный университет, Пермь

kat6chinskiy@gmail.com <mailto:ivanov@org.ru>

Универсальность использования ультразвука позволяет сочетать его с другими технологиями, доказывая огромный потенциал его использования в различных сферах. Ультразвуковое воздействие нашло применение в таких областях как: материаловедение, химический синтез [1], очистка воды [2], биотехнологии [3].

В настоящей работе экспериментально исследовано распределения акустического давления, возникающего в жидкости под воздействием ультразвука с частотами 28 кГц и 1.7 МГц на жидкую среду, содержащую ионы солей и поверхностно активное вещество.

Исследование проводилось в сонохимическом реакторе флотационной машины ФМЛ - 1, который представлял из себя полость с размерами 110×116×160 мм³, изготовленную из оргстекла толщиной 3 мм. Источник ультразвука располагался заподлицо с дном экспериментальной установки. Для измерения степени интенсивности акустического поля, возникающего от источника ультразвука при частотах 28 кГц и 1.7 МГц в жидкости, использовался пьезокерамический сенсор KS0272, диаметр сенсора составлял 2 см.

Исследование выполнено при финансовой поддержке из средств гранта Российского научного фонда (проект № 20-69-46066).

Литература

- [1] Cravotto G., Cintas P. Power ultrasound in organic synthesis: moving cavitation chemistry from academia to innovative and large-scale applications // Chemical Society Reviews. – 2006. – Т. 35. – №. 2. – С. 180-19.
- [2] González-García J. et al. Sonochemical treatment of water polluted by chlorinated organocompounds. A review // Water. – 2010. – Т. 2. – №. 1. – С. 28-7.
- [3] Rokhina E. V., Lens P., Virkutyte J. Low-frequency ultrasound in biotechnology: state of the art // Trends in biotechnology. – 2009. – Т. 27. – №. 5. – С. 298-30

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ВКЛАДА ВЫСШИХ ФОРМ КОЛЕБАНИЙ В ЗАДАЧАХ ДИНАМИКИ КОНСТРУКЦИЙ

Лалин В.В.¹, Лалина И.И.¹, Вавилова А.М.¹, Ле Т.К.Ч.¹, Нго Х.Х.¹

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург
vlalin@yandex.ru

Задачи динамики сложных конструкций решаются в настоящее время с использованием программных комплексов, в которых реальный объект заменяется конечномерной математической моделью. При этом используются достаточно подробные модели, которые могут иметь миллионы неизвестных – динамических степеней свободы. Вычисление собственных частот и форм колебаний таких математических моделей представляет собой трудоемкую и затратную по необходимому времени и ресурсам проблему. Поэтому при решении практических задач ограничиваются учетом некоторого количества первых собственных частот и форм колебаний. При этом вклад отброшенных высших форм колебаний, как правило, никак не учитывается и не оценивается.

В настоящем докладе приводятся некоторые из существующих методов учета вклада высших форм колебаний в задачах динамики конструкций [1 - 4]. На примерах простых задач оценивается точность и трудоемкость методов. Отмечается, что применение таких методов требовало до сих пор создания дополнительных программных модулей.

Для одного из таких методов [4] – метода «матрицы остаточной податливости» или «статического учета высших форм колебаний» предлагается алгоритм, при котором метод может быть использован на любом существующем программном комплексе по расчету конструкций без каких-либо дополнительных модулей.

На примерах показывается возможность использования разработанного алгоритма для решения разных типов динамических задач: со стационарной (гармонической) и нестационарной динамической нагрузкой; при одновременной действии на конструкцию нескольких гармонических сил с разными частотами; при сейсмическом воздействии на сооружение.

Литература

- [1] Rubin S. Improved component-mode representation for structural dynamic analysis. // AIAA Journal. 1975. Vol.13. Issue 8. – Pp. 995-1006.
- [2] Тяпин А.Г. Реализация «концепции остаточного члена» в расчетах сооружений на сейсмическое воздействие модальным и спектральным методами. // Сейсмическое строительство. Безопасность сооружений. 2014. №4. – С.32-35.
- [3] Филимонов А.В. Учет найденных форм собственных колебаний при расчете реакции зданий и сооружений на сейсмические воздействия. // Строительная механика и расчет сооружений. 2014. №2.- С. 46-53.
- [4] Цейтлин Б.В. Построение матрицы остаточных податливостей и ее использование при решении задач динамики конструкций. // Труды IV Международной конференции «Научно-технические проблемы прогнозирования надежности и долговечности конструкций и методы их решения». – СПб: «Нестор». 2001. С. 325-331.

ДИНАМИКА ПЛОСКИХ ЧАСТИЦ ГЕКСАФЕРРИТА БАРИЯ В ЛИОТРОПНОМ ЖИДКОМ КРИСТАЛЛЕ

Лебедев А.В.¹, Лысенко С.Н.²

¹*Институт механики сплошных сред, Пермь*

²*Институт технической химии, Пермь*

lav@icmm.ru

Идея придать жидким кристаллам сильные магнитные свойства обсуждается в литературе достаточно давно [1]. Поскольку ЖК молекулы не имеют магнитных свойств, их предполагалось получить, введя в жидкокристаллическую среду частицы ферромагнетиков нанодисперсного размера. К сожалению, оказалось, что частицы, покрытые слоем стандартного ПАВа (олеиновой кислотой) не совместимы с термотропными ЖК. Успешными оказались эксперименты с частицами, стабилизированными двойным слоем ПАВа в водном растворе смеси ПАВ, проявляющей свойства лиотропного ЖК [2].

Совсем недавно были синтезированы магнитные жидкости на основе наночастиц гексаферрита бария, стабилизированных в воде двойным слоем из лауриновой кислоты и додецил сульфата натрия [3]. На основе измерения их динамических свойств был сделан вывод о дискообразной форме частиц с ориентацией магнитного момента нормально к плоскости диска.

В предлагаемой работе приводятся результаты исследования процессов перемагничивания частиц гексаферрита бария в концентрированном растворе смеси додецилсульфата натрия и лауриновой кислоты. При определенных условиях в таком растворе образуются жидкокристаллические структуры. Однотипный состав оболочек частиц и ЖК-подобной среды обеспечивает их полную совместимость и устойчивость.

Вязкость жидкого кристалла на несколько порядков превышала вязкость воды. Это делало практически невозможными измерения с помощью переменных синусоидальных полей. Была выбрана форма переменного поля в виде прямоугольника частотой 0.1 Гц. При изменении поля на противоположное значение происходит переориентация магнитных частиц ГФБ и, соответственно, меняется интенсивность света, проходящего через систему поляроидов. Сигнал имел форму плавного максимума с медленно затухающим хвостом. Амплитуда максимума определяла величину эффекта ДЛП, а его положение – характерное время переориентации частиц гексаферрита бария.

Были измерены зависимости времени переориентации и амплитуды сигнала ДЛП от величины магнитного поля при различных концентрациях ЖК матрицы. Было обнаружено, что полевая зависимость эффекта ДЛП для частиц, взвешенных в ЖК, существенно отличается от зависимости для частиц, взвешенных в воде. Сигнал ДЛП для частиц в ЖК существенно быстрее выходит на насыщение с ростом поля. С уменьшением концентрации ЖК (при разбавлении его водой) кривые полевых зависимостей постепенно сближаются.

Литература

- [1] Райхер Ю.Л., Бурылов С.В., Захлевных А.Н. Ориентационная структура и магнитные свойства ферронематика во внешнем поле // Журнал экспериментальной и теоретической физики, Т91, N2, 1986, С 542-551.
- [2] Бережнов В.В. Лиотропный ферроколлоид на основе системы лаурат калия/1-деканол/вода // Коллоидный журнал, Т62, N4, 2000, С 464-474.
- [3] Lysenko S.N., Lebedev A.V., Astaf'eva S.A., Yakusheva D.E., Balasoiu M., Kuklin A.I., Kovalev Yu.S., Turchenko V.A. Preparation and magneto-optical behavior of ferrofluids with anisometric particles // Physica Scripta, 95 (2020) 044007 (12pp).

МЕТОД ЛАЗЕРНОЙ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ ДЛЯ АНАЛИЗА МИКРОДЕФОРМАЦИЙ ДЕМИНЕРАЛИЗОВАННОЙ ЭМАЛИ В ПРОЦЕССЕ ЛЕЧЕНИЯ

Левицкая А.Д.¹, Гилева О.С.¹, Даурова Ф.Ю.², Акмалова Г.М.³

¹Пермский государственный медицинский университет, Пермь

²Российский университет дружбы народов, Москва

³Баширский государственный медицинский университет, Уфа
smehach713@mail.ru, o.s.gileva@yandex.ru

Изучение *in vitro* напряженно-деформированного состояния (НДС) деминерализованной эмали зуба до и после различных лечебных мероприятий - актуальная задача физического и стоматологического материаловедения [1]. Эффективным методом качественного анализа состояния микроархитектоники поверхности эмали и композитных материалов для её реставрации является лазерная голографическая интерферометрия (ГИ) [2]. Цель работы – изучение НДС поверхности деминерализованной эмали (начальная стадия кариеса зубов), леченной различными методами, в динамике эквивалентных циклических испытаний (ЭЦИ), имитирующих отдаленные результаты лечения *in vivo*. Исследования проведены на 27 премолярах, на вестибулярной поверхности которых моделировали кариес эмали (патенты на ПМ №172561 от 17.07.2017, №171409 от 30.05.17; РП №2757 от 17.05.2018). Образцы распределяли в три группы: 1-я – моделирование *in vitro* стандартного инфильтрационного лечения (СИЛ); 2-ая – модифицированного инфильтрационного лечения (МСИЛ, 4 мин. кондиционирования); 3-я – комбинированного лечения (КИЛ): МСИЛ с последующим финишным ламинированием эмали биоактивным гибридным стеклоиономером. Для проведения ГИ при ЭЦИ использовали голографическую схему Денисюка Ю.Н., оригинальную установку для проведения голографии (РП №2784 от 15.04.19) и специальное оборудование (РП №2799 от 01.07.19, РП №2786 от 15.04.19) для обработки, восстановления и фотосъемки фотопластинок. Голограмму после каждого цикла испытания сравнивали с базовой. При тестировании образцов зубов в ходе ЭЦИ в зоне раздела интактной и леченной по СИЛ-методике эмали микротрещина с ответвлениями в виде утонения образовалась через 9 мес. ($0,9 \times 10^6$ циклов) в 11,2% случаев; через 12 мес. ($1,2 \times 10^6$ циклов) - в 55,5% случаев; через 18 мес. ($1,8 \times 10^6$ циклов) - в 33,3% случаев. С клинической точки зрения образование трещины в переходной зоне «интактная – проинфильтрированная эмаль» создал бы предпосылки к образованию вторичного кариеса и необходимости инвазивного лечения зуба. При тестировании образцов зубов, прошедших лечение по МСИЛ и КИЛ-методикам, через 100 мин. испытания ($6,0 \times 10^6$ циклов) отмечали нарастание кривизны интерференционных полос, однако трещины в зоне раздела не выявлялись. Ламинирование эмали гибридным стеклоиономером не отражалось на физико-механических свойствах эмали, однако в условиях *in vivo* могло объективизировать преимущества КИЛ за счет пролонгированного (до 6 мес.) реминерализующего, гипосенситивного, кариес-статического и кариес-профилактического действия защитного покрытия.

Литература

[1] Левицкая А.Д. Лазерная голографическая интерферометрия для контроля напряженно-деформированного состояния деминерализованной эмали в процессе лечения / А.Д. Левицкая, О.С. Гилева // Стоматология. – 2019. – С.35-36.

[2] Puškar T. Holographic interferometry as a method for measuring strain caused by polymerization shrinkage of dental composite / T. Puškar, D. Jevremović, L. Blažić, D. Vasiljević, D. Pantelić, B. Murić, B. Trifković // Contemporary Materials. – 2010. – Vol.1. – Issue.1. – P. 105-111.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант №17-48-590562-р_урал_a).

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗРУШЕНИЯ АЛЮМИНИЕВЫХ И ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ ПРИ КОМБИНИРОВАННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ: ДИНАМИЧЕСКОЕ И УСТАЛОСТНОЕ НАГРУЖЕНИЕ

Ледон Д.Р., Оборин В.А., Банников М.В., Баяндин Ю.В.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

ledon@icmm.ru

Математическая модель деформируемого твердого тела с мезоскопическими дефектами [1-3], учитывающая эволюцию поврежденности, применена для моделирования комбинированных воздействий на материал. В качестве исследуемых материалов выбраны алюминиевый сплав АМг6 и титановый сплав ВТ6. Исследовали поведение материалов при усталостном, а также при комбинированном: динамическом и последующем усталостном нагружении.

Предложенная модель хорошо описывает усталостное разрушение исследуемых материалов о чём свидетельствует соответствие расчётных и экспериментальных кривых Вёлера. Также описаны эффект падения усталостной долговечности вследствие предварительного динамического нагружения для сплава АМг6 и эффект дуальности кривой Вёлера для сплава ВТ6. Результаты расчётов сравнивали как с собственными экспериментами, так и с результатами других авторов [4, 5].

Современная вычислительная техника не позволяет проводить прямое численное моделирование разрушения в условиях гигацикловой усталости для конструкций. Поэтому для прогнозирования разрушения в сверхмногоцикловой области предложена аналитическая зависимость числа циклов до разрушения от условий нагружения. Предложенный подход имеет бóльшую погрешность в сравнении с прямым численным моделированием, однако требует существенно меньших временных затрат.

Построенная модель внедрена в конечно-элементный пакет для возможности проведения расчётов на усталостную долговечность для реальных конструкций. Внедрённая процедура позволяет оценивать статическую, динамическую и усталостную прочность, а также моделировать комбинированные воздействия на конструкцию.

Литература

- [1] Билалов Д.А., Баяндин Ю.В., Наймарк О.Б. Математическое моделирование процесса разрушения сплава АМг2.5 в режиме много- и гигацикловой усталости // Вычислительная механика сплошных сред. – 2018. – Т. 11, № 3. – С. 323-334.
- [2] Билалов Д.А., Соколов М.А., Чудинов В.В., Оборин В.А., Баяндин Ю.В., Терёхина А.И., Наймарк О.Б. Численное моделирование и экспериментальное исследование локализации пластической деформации при динамическом нагружении образцов в условиях близких к чистому сдвигу // Вычислительная механика сплошных сред. – 2017. – Т. 10, № 1. – С. 103-112.
- [3] Баяндин Ю.В., Билалов Д.А., Уваров С.В. Верификация широкодиапазонных определяющих соотношений для упруговязкопластических материалов с использованием теста Тейлора–Гопкинсона // Вычислительная механика сплошных сред. – 2020. – Т. 13, № 4. – С. 449-458.
- [4] Билалов Д.А., Оборин В.А., Наймарк О.Б., Нарыкова М.В., Кадомцев А.Г., Бетехтин В.И. Влияние предварительного динамического нагружения на усталостную долговечность сплава АМг6 // Письма в Журнал технической физики. – 2020. – Т. 46, № 8. – С. 44-46.
- [5] Шанявский А.А., Никитин А.Д., Солдатенкова М.А. Самоорганизация процессов усталостного разрушения титановых сплавов // Сложные системы. – 2015. – № 2 (15). – С. 4-22.

ОСОБЕННОСТИ ГИДРОДИНАМИКИ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ В ЗОНАХ АКТИВНОГО ТЕХНОГЕНЕЗА (НА ПРИМЕРЕ ВЕРХНЕ-ЗЫРЯНОВСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА)

Лепихин А.П.¹, Мирошниченко С.А.¹, Богомолов А.В.¹, Ляхин Ю.С.¹, Тиунов А.А.¹,
Любимова Т.П.², Паршакова Я.Н.²

¹Горный институт УрО РАН, Пермь

²Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

lepin49@mail.ru, lyubimovat@mail.ru

В настоящее время активно осваивается одно из крупнейших в мире Верхне-Камское месторождение калийных и магниевых солей (ВКМКС). Применяемые технологические процессы требуют значительного количества свежей воды. Для этих целей создаются специальные водохранилища, способные обеспечивать промышленные комплексы водой с высокой надежностью. При их создании априорно предполагается, что водные массы в них будут достаточно однородны как по акватории, так и глубине, и возможные накапливаемые в них загрязнения будут успешно промываться при пропуске весенних паводков. На таких принципах было создано Верхне-Зырянское водохранилище, являющееся основным источником технического водоснабжения БКПРУ-2 и БКПРУ-4 ПАО УралКалий. При этом необходимо подчеркнуть, что современное технологическое оборудование предъявляет весьма высокие требования к качеству потребляемой воды, в ряде случаев они даже более жесткие, чем к качеству питьевой воды. Рассматриваемое водохранилище расположено в 3,50 км юго-восточнее г. Березники. Оно было введено в постоянную эксплуатацию в 1969 году. Длина водохранилища при НПУ - 7 км, а средняя ширина при НПУ - 0,6 км.

В последние годы стали наблюдаться серьезные проблемы с обеспечением требуемого качества забираемой воды на водозаборе БКПРУ-4. Для установления причин ухудшения качества забираемой воды на данном водозаборе и разработки мероприятий по повышению устойчивости водоснабжения был проведен комплекс исследований, включающий в себя детальные гидрометрические и гидрохимических наблюдения и построение гидродинамических моделей данного водного объекта в 2D и 3D постановках.

Проведенные наблюдения показали, что данный водный объект характеризуется значительной вертикальной неоднородностью по минерализации. При этом наблюдается ярко выраженная граница плотностного разделения водных масс на отметке ~118 м абс. Минерализация воды в придонном горизонте практически на порядок может превышать ее содержание в поверхностном слое. Граница раздела водных масс в зимний период повышается на ~0.5 м, а весной снижается. Проведенные вычислительные эксперименты на основе сопряжения гидродинамических моделей в 2D и 3D постановках показали, что при принятой конструкции водопропускного устройства на плотине водохранилища не может проходить эффективной промывки водохранилища при пропуске даже высоких весенних паводков. Свежая весенняя неминерализованная вода, «скользя» по границе раздела водных масс, практически не замещает более минерализованную воду из придонных слоев. В связи с этим, при наличии фильтрационных разгрузок подземных вод в придонной области, наблюдается рост минерализации воды, а соответственно и снижение надежности систем водоснабжения. К сожалению, действующие нормативно методические документы не предусматривают учет стратификационных эффектов как при оценке надежности систем водоснабжения, так и при организации мониторинга водных объектов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 17-77-20093).

О ВЛИЯНИИ ГЕОМЕТРИИ МНОГОСЛОЙНОГО ЗАЩИТНО-УПРОЧНЯЮЩЕГО ПОКРЫТИЯ НА РАБОТУ ВОЛОКНА ТИПА PANDA

Лесникова Ю.И., Труфанов А.Н.

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
ulesig@gmail.com, ant@pstu.ru*

В системах навигации используются специальные оптические волокна, которые должны корректно работать в широком диапазоне температур. Основные факторы, влияющие на оптические характеристики волокна в условиях нарушения термостатики: существенное отличие коэффициентов линейного температурного расширения материалов защитно-упрочняющего покрытия (ЗУП) и кварцевого стекла, гетерогенность кварцевой части волокна, вязкоупругие эффекты в полимерах ЗУП, несовершенство технологических процессов, приводящее к отклонениям геометрических параметров конструктивных элементов от проектных значений (изменение формы и смещение конструктивных элементов относительно центра волокна, общая толщина многослойного ЗУП и соотношения толщин отдельных слоев при сохранении внешнего диаметра волокна).

В рамках данного исследования сделана попытка оценить влияние соотношения толщин отдельных слоев ЗУП при сохранении внешнего диаметра волокна на оптические характеристики волокна в условиях термоцикла. В качестве предварительного анализа было рассмотрено три соотношения толщин двух слоев ЗУП при стандартном диаметре оптического волокна. Проектные размеры внешнего покрытия $h_1=25$ мкм, внутреннего ЗУП $h_2=18,5$ мкм, что составляет 57,5 и 42,5 % соответственно от общей толщины многослойного покрытия. Проанализировано влияние соотношения h_1/h_2 в двух пограничных вариантах 20/80 и 80/20 в сравнении со стандартным соотношением слоев ЗУП. Исследование было выполнено на части термоцикла [1] без учета возвращения волокна к комнатной температуре. Установлено, что изменение температуры оказывает влияние на уровень отклонений показателя преломления света, обусловленного НДС в светопроводящей жиле, за счет релаксационных процессов, проходящих в ЗУП.

Для более детального анализа влияния соотношения толщин слоев ЗУП было рассмотрено 6 соотношений при расширенном циклическом изменении температуры: 2 цикла нагружения с выдержкой при комнатной температуре после второго цикла.

Были получены зависимости компонент тензора напряжений от времени, при изменении температуры по заданной программе. Установлено, что уже на первом термоцикле, напряжения, сформированные в волокне при силовой намотке, релаксируют тем сильнее, чем меньше диаметр катушки и больше сила натяга. Для катушек малого диаметра характерно нелинейное изменение исследуемых параметров при высоких температурах, что связано с релаксационными процессами в ЗУП. С увеличением толщины мягкой буферной прослойки, в условиях термоцикла уровень контактных напряжений, а также уровень отклонений показателя преломления света, обусловленного НДС в светопроводящей жиле, снижается. Но в результате релаксации при увеличении толщины внутреннего ЗУП на графике появляются локальные пики в зонах нагрева и охлаждения.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края в рамках научного проекта № 20-48-596009.

Литература

[1] Лесникова Ю.И., Труфанов А.Н. Влияние геометрической конфигурации защитно-упрочняющего покрытия на характеристики анизотропного волокна в условиях термосилового воздействия// Материалы XXI Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам. – 2019. – С. 293-296.

ИОННО-ПЛАЗМЕННАЯ ОБРАБОТКА ПРОТЕЗА КРОВЕНОСНОГО СОСУДА

Литвинов В.В.¹, Чудинов В.С.², Шардаков И.Н.², Солодников С.Ю.³, Галкин С.В.³,
Савицкий Я.В.³, Кондюрин А.В.⁴

¹Пермский государственный медицинский университет, Пермь

²ИМСС УрО РАН, Пермь

³Пермский государственный технический университет, Пермь

⁴Пермский государственный университет, Пермь

chudinovsl@mail.ru, shardakov@icmm.ru

Одной из актуальных задач в ангиохирургии является разработка новых материалов для протезов вен и артерий малого диаметра, т.к. это может быть обусловлено дефицитом собственных сосудов для замещения пораженных участков [1]. А применение синтетических протезов приводит к тромбозу, окклюзии, поддержанию воспаления, гиперплазии неоинтимы и требует постоянной антикоагулянтной терапии [2]. Считается, что тромбоз протезов возникает из-за реакции на инородное тело. Стимулом данной реакции является взаимодействие белков крови и тканевой жидкости с поверхностью имплантата. [3]. В наших работах было показано уменьшение реакции иммунной системы на полимерные имплантаты, обработанные ионно-плазменным методом. В результате ионно-плазменной обработки изменяются физико-механические и химические свойства поверхности материалов, что влияет на взаимодействие белков организма с поверхностью имплантата и уменьшает иммунный ответ [4, 5]. В данной работе метод ионно-плазменной обработки использовался для модификации поверхности полиуретанового протеза кровеносного сосуда диаметром 2 мм. При этом метод обработки был адаптирован для создания ионного потока ортогонально внутренней поверхности протеза. После обработки полимерных имплантатов на их поверхность был нанесен синтетический белок тропоэластин. Обработанные и необработанные полимерные протезы имплантировались в кровеносное русло сонной артерии лабораторных животных. Через 7 дней экспозиции был проведен сравнительный анализ проходимости необработанных и обработанных плазмой протезов гистологическим методом и с помощью томографии. Полученные результаты разными методами анализа в относительных величинах имеют сходимость. Установлено, что метод ионно-плазменным обработки протезов кровеносных сосудов улучшает их проходимость и может быть рекомендован для создания гемосовместимых покрытий.

Работа поддержана грантом РФФИ №20-48-596014 п_НОЦ_Пермский край.

Литература

- [1] Г. И. Попов, П. В. Попрядухин, Г. Ю. Юкина, Е. Г. Сухорукова, Е. М. Иванькова, В. Н. Вавилов, В. Е. Юдин Морфологическое исследование биорезорбируемой трубчатой матрицы малого диаметра из поли(L-лактида) для тканеинженерного сосудистого имплантата – Цитология. Т. 62. № 1. 2020. С. 38–46.
- [2] Попова И.В., Степанова А.О., Сергеевичев Д.С. и др. Сравнительное исследование трех типов протезов, изготовленных методом электроспиннинга в эксперименте in vitro и in vivo – Патология кровообращения и кардиохирургия. Т. 19. № 4. 2015. С. 63–71.
- [3] Biomaterials Science and Technology Fundamentals and Developments. Yaser Dahman – NW, CRC Press. 2019. P. 358.
- [4] V. Chudinov, I. Kondyurina, V. Terpugov, A. Kondyurin. Weakened foreign body response to medical polyurethane treated by plasma immersion ion implantation – Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. V. 440. 2019. P. 163-174. DOI: 10.1016/j.nimb.2018.12.026.
- [5] Chudinov, V.S., Kondyurina, I.V., Terpugov, V.N., Shardakov I. N., Maslova V. V., Solodnikov S. Yu., Fefilova I. V., Kondyurin A. V. Plasma Ion Treatment of Polyurethane Implants for Reducing the Foreign Body Rejection Rate – Biomed Eng. 54. 2020. P. 255–257. doi.org/10.1007/s10527-020-10016-4.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ НЕОГРАНИЧЕННОЙ СТРУНЫ С ДВИЖУЩЕЙСЯ ГРАНИЦЕЙ В НЕЛИНЕЙНОЙ ПОСТАНОВКЕ

Литвинов В.Л.

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва
Самарский государственный технический университет, Самара*

vladlitvinov@rambler.ru

До настоящего времени задачи о продольно – поперечных колебаниях объектов с движущимися границами решались в основном при линейной постановке, не учитывался энергетический обмен через движущуюся границу и взаимодействие между продольными и поперечными колебаниями [1–5, 7, 8]. В редких случаях учитывалось действие сил сопротивления внешней среды [6]. Реальные же технические объекты намного сложнее, например, при увеличении интенсивности колебаний большое влияние на колебательный процесс оказывают геометрические нелинейности объекта.

В связи с интенсивным развитием численных методов появилась возможность более точного описания сложных математических моделей продольно–поперечных колебаний объектов с движущимися границами, учитывающих большое число факторов, влияющих на колебательный процесс.

В работе поставлена новая нелинейная математическая модель поперечных колебаний неограниченной струны с движущейся границей, в которой учтена геометрическая нелинейность. Получены граничные условия в случае наличия взаимодействия между частями объекта слева и справа от границы.

Произведена линеаризация полученной модели. При этом соблюдается принцип однородности: в частном случае малых колебаний полученные линейные модели совпали с классическими, что свидетельствует о корректности полученных результатов. Полученная математическая модель позволяет описывать колебания большой интенсивности струны с движущейся границей.

Литература

- [1] Савин Г.Н., Горошко О.А. Динамика нити переменной длины // Наук.думка, Киев, 1962, 332 стр.
- [2] Самарин Ю.П. Об одной нелинейной задаче для волнового уравнения в одномерном пространстве // Прикладная математика и механика. – 1964. – Т. 26, В. 3. – С. 77–80.
- [3] Весницкий А.И. Волны в системах с движущимися границами и нагрузками // Физматлит, М., 2001, 320 стр.
- [4] Лежнева А.А. Изгибные колебания балки переменной длины // Изв. АН СССР. Механика твердого тела. – 1970. – №1. – С. 159–161.
- [5] Литвинов В.Л. Решение краевых задач с движущимися границами при помощи приближенного метода построения решений интегро-дифференциальных уравнений // Тр. Ин-та математики и механики УрО РАН. 2020. Т. 26, № 2. С. 188-199.
- [6] Анисимов В.Н., Литвинов В.Л. Математические модели продольно-поперечных колебаний объектов с движущимися границами // Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. Науки, 2015. Т. 19, №2. С. 382-397.
- [7] Литвинов В.Л., Анисимов В.Н. Математическое моделирование и исследование резонансных свойств механических объектов с изменяющейся границей: монография / В. Л. Литвинов, В. Н. Анисимов – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2020. – 100 с.
- [8] Литвинов В.Л., Анисимов В.Н. Применение метода Канторовича – Галеркина для решения краевых задач с условиями на движущихся границах // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. 2018. №2. С. 70–77.

ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ВОДОЗАЩИТНОЙ ТОЛЩИ В УСЛОВИЯХ ГЛУБОКИХ КАЛИЙНЫХ РУДНИКОВ

Лобанов С.Ю.¹

¹ «ГИ УрО РАН», Пермь

LSerg@Mi-Perm.ru

Востребованность калийных удобрений приводит к тому, что на территории Российской Федерации и во всем мире в разработку вовлекаются разведанные участки существующих месторождений, начинается освоение запасов новых месторождения. При этом усложняются горно-геологические и горнотехнические условия разработки и в первую очередь увеличивается глубина залегания продуктивных пластов. Увеличение глубины ведения горных работ, априори, предопределяет не только повышение горного давления, но и обуславливает появление ряда особенностей геологического строения, зачастую, не присущих малым глубинам. В этих условиях сохраняются риски, связанные с опасностью прорыва пресных вод в выработанное пространство рудников, с негативным воздействием горных работ на поверхностные промышленные и гражданские объекты. Ситуация усложняется тем, что «глубокие» калийные рудники только приступают к отработке шахтных полей и содержателный экспериментальный материал о характере деформирования несущих элементов, развитии процесса сдвижения либо отсутствует, либо весьма скуден. В этой связи приоритетной является разработка геомеханических моделей, основанных на фундаментальных подходах к описанию характера деформирования и разрушения структурно-неоднородных толщ и адекватно отражающих горнотехнические условия отработки.

В рамках выполнения данной работы построена геомеханическая математическая модель подработанного массива, отражающая основные особенности геологического строения Гремячинского месторождения и проектные параметры камерной системы разработки. В расчетную модель посредством контактных элементов Гудмана введена возможность расслоения породного массива по границам толщ со значимым отличием деформационных свойств.

Методами математического моделирования проведена оценка безопасных условий подработки водозащитной толщи (ВЗТ) при проектных параметрах разработки. Расчеты выполнялись на примере двух субширотных профилей. Математическое моделирование, проводилось в плоской постановке методом конечных элементов. Связь между деформациями и напряжениями на допредельной стадии описывалась законом Гука, а предельные напряжения в области сжатия определялись критерием Кулона-Мора. Для анализа нарушения сплошности пластов ВЗТ в области действия растягивающих напряжений использовался предел прочности при растяжении.

Функция ползучести для соляных пород определялась на основе информации о развитии процесса сдвижения земной поверхности для условий Саскачеванского калийного месторождения.

Согласно результатам математического моделирования, при реализованных параметрах камерной системы разработки сохранность ВЗТ обеспечивается вплоть до завершения процесса сдвижения. Полученные предварительные результаты показали, что ввиду значительной глубины разработки, с позиции обеспечения безопасных условий подработки ВЗТ извлечение руды из недр может быть существенно повышено.

НЕСТАЦИОНАРНАЯ ФУНКЦИЯ ПРОГИБА ДЛЯ ПОЛУБЕСКОНЕЧНОЙ АНИЗОТРОПНОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ

Локтева Н.А.^{1,2} Сердюк Д.О.¹ Скопинцев П.Д.¹

¹Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
Москва

²НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва
nlok@rambler.ru, d.serduk55@gmail.com, chgpashka@gmail.com

Оболочки как конструктивный элемент применяются во многих отраслях промышленности, например, в самолетостроительной, ракетно-космической, судостроительной, атомной и нефтегазодобывающей. Также конструкции типа тонкостенных оболочек применимы в строительстве, химическом и пищевом машиностроении. При расчете прочности большого количества конструкций может быть использована расчетная схема тонких оболочек. Для исследования современных, обладающих высокими требованиями, конструкций, работающих в нестационарных режимах, необходимо располагать знаниями о процессах нестационарных вынужденных колебаний. Исследование поведения оболочек при нестационарном динамическом воздействии затрудняется присутствием значительной неоднородности напряженно-деформированного состояния по времени и координатам.

Процессы нестационарного воздействия на изотропные пластины и оболочки в рамках модели Кирхгофа-Лява достаточно хорошо изучены в данное время. Вопросы нестационарной динамики анизотропных пластин разобраны в работе [1]. Задачи нестационарного воздействия на боковую поверхность неограниченных анизотропных цилиндрических оболочек рассмотрены в статьях [2, 3]. В настоящей работе рассматривается начально-краевая задача о вынужденных нестационарных колебаниях полубесконечной упругой анизотропной цилиндрической оболочки, один торец которой жестко защемлен.

Постановка задачи включает в себя уравнения движения упругой анизотропной оболочки Кирхгофа-Лява в перемещениях, начальные и граничные условия. Задача решается в цилиндрической системе координат, связанной с осью цилиндрической оболочки. Целью является нахождение нестационарной функции нормальных перемещений при воздействии сосредоточенной нагрузки с переменной во времени амплитудой и анализ распространения возмущений около защемленного торца для полубесконечной упругой анизотропной цилиндрической оболочки.

Искомая функция нормальных перемещений для полубесконечной упругой анизотропной цилиндрической оболочки найдена с помощью функции Грина для неограниченной оболочки [2] и метода компенсирующих нагрузок [4], как сумма свертки функции Грина с действующей и компенсирующими нагрузками. Для нахождения функции Грина к соответствующей задаче применены экспоненциальные ряды Фурье по угловой координате и интегральные преобразования Лапласа по времени и Фурье по осевой координате. Компенсирующие нагрузки найдены из решения системы уравнений построенной с учетом граничных условий для нормального прогиба полубесконечной оболочки в защемленном торце.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ проект №19-08-00968.

Литература

[1] Сердюк А.О., Сердюк Д.О., Федотенков Г.В. Нестационарный прогиб анизотропной пластины на упругом основании // «Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред». Сборник

- трудов 10-ой Всероссийской научной конференции с международным участием. – Москва. 2020. – 199-204 с. DOI 10.33113/conf.mkmk.ras.2020.199_204.29
- [2] Lokteva N.A., Serdyuk D.O., Skopintsev P.D. Non-stationary influence function for an unbounded anisotropic Kirchhoff-Love shell // Journal of Applied Engineering Science, 2020. Vol. 18, No. 4, 737 – 744 p. DOI: 10.5937/jaes0-28205
- [3] Локтева Н.А., Сердюк Д.О., Скопинцев П.Д., Федотенков Г.В. Нестационарное напряженно-деформированное состояние композитной цилиндрической оболочки // Механика композиционных материалов и конструкций, Т. 26, № 4, 544 – 559 с. DOI: 10.33113/mkmk.ras.2020.26.04.544_559.08
- [4] Венцель Э.С., Джан-Темиров К.Е., Трофимов А.М., Неголыша Е.В. Метод компенсирующих нагрузок в задачах теории тонких пластинок и оболочек – Харьков, 1992. – 92 с.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПРОЦЕССОВ РАССЛОЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО МЕЖДУПЛАСТЯ НА УСТОЙЧИВОСТЬ МЕЖДУКАМЕРНЫХ ЦЕЛИКОВ

Ломакин И.С.¹, Цаюков А.А.¹

*¹«Горный институт Уральского отделения Российской академии наук» - филиал
Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского федерального
исследовательского центр Уральского отделения Российской академии наук («ГИ УрО
РАН»), Пермь*

Lomakin@Mi-Perm.ru, andrei.tsayukov@inbox.ru

В пределах Верхнекамского месторождения солей продуктивные сильвинитовые пласты АБ и Кр II разрабатываются камерами с поддержанием вышележащей толщи опорными целиками разных размеров, степень устойчивости которых определяется механическими свойствами пород, глубиной ведения горных работ, порядком выемки пластов, размерами очистных камер. Существенное влияние на несущую способность междукамерных целиков (МКЦ) оказывает состояние кровли и почвы очистных камер и, особенно, технологического междупластья АБ - КР II. Наличие глинистых прослоев снижает устойчивость пород кровли подземных сооружений, обуславливая ее интенсивное расслоение и обрушение пород междупластья, что приводит к увеличению высоты междукамерных целиков и, как следствие, к снижению их несущей способности.

Оценка динамики нагружения МКЦ в процессе расслоения почвы и кровли очистных камер проводилась на основе многовариантного математического моделирования напряженно-деформированного состояния двухпластового камерного блока с учетом основных особенностей геологического строения и геометрии сечения форм выработок. Математическое моделирование выполнялось в постановке плоской деформации. Напряженное состояние камерного блока описывалось идеальной упруго-пластической средой.

Анализ результатов показал, что максимальное увеличение степени нагружения междукамерных целиков при разрушении технологического междупластья соответствует его наибольшей мощности, при которой может реализоваться процесс его полного обрушения. Величина этой мощности зависит от особенностей геологического строения междупластья и ширины очистной камеры. Установлено изменение степени нагружения целиков от величины расслоения почвы и кровли очистных камер.

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ МНОГОФАЗНЫХ СРЕД В ЗАДАЧАХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ГЕНЕРАЦИИ ТЕЧЕНИЙ

Лосев Г.Л., Колесниченко И.В., Ельтищев В.А.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

Losev.G@icmm.ru, KIV@icmm.ru, Eltishchev.V@icmm.ru

В данной работе рассматривается методика, применяемая при численном исследовании процесса кристаллизации жидкого металла, находящегося под действием электромагнитных сил. Численное исследование таких процессов производится с помощью математической модели, сформулированной в рамках магнитной гидродинамики. Скорость течения расплавленного металла относительно небольшая, а его электропроводность – умеренная. Поэтому магнитное число Рейнольдса существенно меньше единицы. Это означает, что интенсивность индуцированного потоком металла магнитного поля много меньше интенсивности исходного поля, т.е. процесс переноса поля посредством движущейся проводящей среды, является пренебрежимо слабым. Поэтому используется безындукционное приближение, не учитывающее влияние течения проводящей жидкости на электромагнитное поле. В связи с этим, задачи нахождения распределения электромагнитных сил и распределения гидродинамических и теплофизических полей можно решать отдельно. Электродинамическая часть задачи описывается системой уравнений Максвелла. Гидродинамическая часть задачи описывается уравнением Навье-Стокса и неразрывности поля скорости, при этом для описания турбулентности использована полуэмпирическая модель.

Возможность разделения задач на электродинамическую и гидродинамическую части является существенным преимуществом, позволяющим изучить процессы за приемлемое время. Однако существует проблема при исследовании кристаллизации: электрическая проводимость у большинства металлов в расплавленном и твердом состоянии различается в несколько раз. Этот факт в большинстве проводимых исследований упускается. Метод, когда электродинамическая задача пересчитывается каждый раз после изменения формы области при кристаллизации, неприемлем для многовариантных расчетов из-за огромных вычислительных затрат. Поэтому, предлагается компромиссная методика, которая не требует перерасчета задачи электродинамики на каждом этапе процесса кристаллизации.

В рамках разработки методики проведено численное моделирование процесса силового электромагнитного воздействия на объём многофазной электропроводящей среды. В качестве источника силового воздействия служит индуктор бегущего магнитного поля. Получены зависимости интегральной силы от геометрических параметров проводящего объёма, соотношения электрофизических параметров отдельных фаз.

Проведена экспериментальная верификация расчётных данных на полноразмерной установке, состоящей из линейной индукционной машины (ЛИМ) бегущего поля, биметаллической плоской пластины и динамометра. Измерены значения интегральной выталкивающей силы в зависимости от смещения пластины вдоль плоскости ЛИМ. Проведено сравнение расчётных и экспериментальных данных, подтверждающих надёжность численной модели.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации № МК-5936.2021.1.2.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАЗРАБОТКИ МОРОЗОСТОЙКИХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Любимова Н.Ю., Нуруллаев Э.М., Герцен Т.А.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
ninalubimova@yandex.ru

В настоящее время актуальной проблемой повышения эксплуатационного ресурса асфальта автомобильных дорог, а также для применения в качестве прокладок в оборудовании, изготовления автомобильных и авиационных шин, эксплуатируемых в условиях Арктики и Крайнего Севера России, является разработка и создание материалов с определенными деформационно-прочностными характеристиками.

Целью данной работы является анализ теоретических и экспериментальных исследований создания морозостойкого (с температурой стеклования $\sim 170\text{K}$), эластичного (деформация не ниже 70% при $T \sim 223\text{K}$) полимерного композитного материала.

Представлены результаты теоретических исследований пластифицированного трёхмерно сшитого эластомера на основе высокомолекулярного каучука полиизопрендивинила; в качестве наполнителя использован полифракционный диоксид кремния. Теория разработана авторами с использованием упругого потенциала полимерной пространственной сетки в развитие феноменологического уравнения Муни-Ривлина [1], обобщенного в работах Трелоара [2]. Впервые показана зависимость коэффициентов уравнения от объемной доли полимера в связующем и учет концентрации химических поперечных связей. Рассмотрено структурно-механическое поведение эластомера в условиях одноосного растяжения. Предложенное авторами уравнение зависимости механического напряжения от деформации и разработанные авторами компьютерные программы, позволили исследовать влияние ряда структурных параметров на механические характеристики изучаемого композита. Для сравнения механических характеристик композитов приведены огибающие точек разрыва по Т.Л. Смиту [3,4]. Показано, что разрывное напряжение материала покрытия на основе высокомолекулярных каучуков на порядок выше в сравнении с низкомолекулярными каучуками.

По результатам численных экспериментов [5] предложен оптимальный состав полимерного композитного материала, удовлетворяющего поставленной цели. Экспериментальная проверка разработанной теории структурно-механического поведения эластомера наблюдается удовлетворительное соответствие экспериментальных данных и расчётных характеристик (погрешность порядка 5%).

Литература

- [1] Ермилов А. С., Нуруллаев Э. М. Разработка эластомеров, наполненных твердыми дисперсными компонентами с заданными механическими свойствами // Журнал прикладной химии. 2011. – Т. 84. Вып. 9, с. 1558 – 1561
- [2] Treloar I. R. G. The Elasticity and related Properties of Rubbers / Rubber Reviews. 1974. Vol. P. 625-696.
- [3] Smith T. L. Limited Characteristics of crosslink Polymers // J. Appl. Phys. – 1964. – No. 35. – P. 27-32.
- [4] Smith T. L., Chy W. H. Ultimate Tensile Properties of Elastomers // J. Polymer Sce. – 1972. – Part A - 2, – Vol. 10. – No. 1. – P.133-150.
- [5] Любимова Н.Ю., Ермилов А.С., Нуруллаев Э.М. Быкова Е.А. Оптимизация состава трехмерно сшитого эластомера по энергии механического разрушения // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника – 2017. - № 49, с. 129-133.

ВЛИЯНИЕ ВНУТРИСУТОЧНОЙ НЕРАВНОМЕРНОСТИ РАБОТЫ КАМСКОЙ ГЭС НА КАЧЕСТВО ЗАБИРАЕМОЙ ВОДЫ НА ЧУСОВСКОМ ВОДОЗАБОРЕ Г. ПЕРМИ

Любимова Т.П.¹, Лепихин А.П.², Богомолов А.В.², Ляхин Ю.С.², Тиунов А.А.², Паршакова Я.Н.¹

¹Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

²Горный институт УрО РАН, Пермь

lyubimovat@mail.ru, lepin49@mail.ru

Характерной особенностью потребления электроэнергии крупными мегаполисами является их очень существенная внутрисуточная неравномерность. В утренние и вечерние часы наблюдается значительный подъем, а в ночные часы существенное снижение потребления электроэнергии. В то же время тепловые и атомные электростанции ориентированы на равномерную генерацию электроэнергии. На снятие внутрисуточной и недельной неравномерности потребления электроэнергии ориентированы в первую очередь ГЭС, имеющие технологические возможности очень быстро изменять вырабатываемую мощность в зависимости от востребованности электроэнергии. В связи с этим, сбросы воды на ГЭС характеризуются очень существенной не только внутригодовой, межсуточной, но и внутрисуточной изменчивостью.

В связи с этим возникает задача оценки последствий резкого изменения расходов сброса через плотины крупных гидроузлов. Данные изменения расходов сброса через плотины ГЭС должны существенно отражаться на гидродинамическом режиме водного объекта как в нижнем, так и в верхнем бьефе гидроузла. К сожалению, до последнего времени колебания гидродинамических характеристик с характерным временем $T \sim 10^3 \div 10^4$ с практически не рассматривались при оценке влияния энергетического комплекса на водные объекты.

Для г. Перми данная задача особенно актуальна, так как в верхнем бьефе Камской ГЭС в 15 км от плотины располагается основной водозабор г. Перми - ЧОС. Характерной особенностью данного водозабора является то, что он располагается непосредственно в зоне слияния рр. Сылва и Чусовая, с существенно различающимися гидрохимическими режимами. В зимний период более плотные, более минерализованные воды р. Сылвы располагаются в придонном горизонте, а менее плотные, менее минерализованные воды р. Чусовой в приповерхностном горизонте. Данная стратификация играет принципиальную роль в обеспечении устойчивости питьевого водоснабжения г. Перми. Для забора менее минерализованной, характеризующейся существенно меньшей жесткостью, воды р. Чусовой была предложена и реализована схема заборы воды с использованием донных барьеров, позволяющих отсекаать поступление более минерализованных вод р. Сылвы. Как показали выполненные исследования, значительная внутрисуточная неравномерность работы КамГЭС приводит к существенной перестройке гидродинамического режима водохранилища в районе ЧОС, к колебаниям жёсткости забираемой воды. С целью разработки мероприятий для повышения устойчивости питьевого водоснабжения г. Перми был проведен комплекс исследований, включающий в себя гидрометрические наблюдения и сопряженные с ними вычислительные эксперименты на основе гидродинамических моделей в 2D и 3D постановках.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края в рамках научных проектов № 19-41-590013 и № 20-45-596028.

ПРИМЕНЕНИЕ СОПРЯЖЕННЫХ 1D-2D-3D ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ АНАЛИЗА УСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМ ВОДОСНАБЖЕНИЯ ИЗ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

Любимова Т.П.¹, Паршакова Я.Н.¹, Колчанов В.Ю.¹, Лепихин А.П.², Ляхин Ю.С.²,
Богомоллов А.В.², Тиунов А.А.²

¹Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

²Горный институт УрО РАН, Пермь

lyubimovat@mail.ru, lepin49@mail.ru

Устойчивость систем водоснабжения является одним из основных факторов, определяющих надежность функционирования крупных промышленных комплексов. В настоящей работе данная проблема, рассматривается примере филиала «Азот» АО «ОХК «УРАЛХИМ» в городе Березники (далее филиал «Азот»), осуществляющего забор свежей технической воды из водозабора на р. Каме (Камском водохранилище). Характерной особенностью данного водного объекта в районе расположения водозабора является значительная внутригодовая изменчивость его гидрологического режима. В период летней межени при поддержании уровня режима на отметках близких НПГ, наблюдается гидрологический режим, характерный для водохранилищ с низкими скоростями течений. В то же время в зимний период при снижении уровня воды на 6-8 м наблюдается типичный речной режим. Второй характерной особенностью данного водного объекта является то, что он испытывает в пределах Соликамско-Березниковского промузла очень сильное техногенное воздействие. Данная техногенная нагрузка формируется в значительной мере не за счет точечных, декларируемых источников загрязнения, а вследствие разгрузки недеклаируемых рассредоточенных источников, рассматриваемых как диффузные. Данные источники загрязнения характеризуются высокой минерализацией, а соответственно и высокой плотностью формируемых стоков. Процессы разбавления и миграции этих стоков принципиально отличается от поведения стоков с нейтральной плавучестью. Для их описания совершенно не корректно использовать традиционные методы расчета процессов разбавления, ориентированные на сточные воды с нейтральной плавучестью.

В период 5-8 июля 2020 г., на водозаборе рассматриваемого предприятия наблюдалось существенное увеличение содержания лимитирующих показателей качества воды - ионов хлоридов и натрия, обусловившее остановку предприятия. В связи с этим был поставлен вопрос об установлении причин наблюдаемого явления, чтобы предотвратить данные происшествия в будущем.

Исследование рассматриваемого объекта существенно усложняется значительной вертикальной неоднородностью водных масс в летний период наблюдений в районе г. Березники. Из-за значительных стратификационных эффектов минерализация воды в поверхностном горизонте более, чем на порядок меньше, чем в придонном горизонте. Поэтому использование достаточно хорошо отработанных гидродинамических моделей в 2D постановке для решения поставленной задачи некорректно, требуется применение трехмерного подхода. В то же время использование полного 3D подхода для описания всего водного объекта затруднено из-за его значительных размеров, поэтому рассматриваемая задача решалась на основе сопряжения гидродинамических моделей в 1D - 2D - 3D постановках.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края в рамках научных проектов № 19-41-590013 и № 20-45-596028.

КОНВЕКЦИЯ БИНАРНОЙ СМЕСИ С КОЭФФИЦИЕНТОМ ТЕРМОДИФФУЗИИ, ЗАВИСЯЩИМ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

Любимова Т.П.¹, Рушинская К.С.¹, Зубова Н.А.¹

¹Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

lyubimovat@mail.ru, ksr7777777@yandex.ru, zubova.n@icmm.ru

Представлены результаты численного моделирования нелинейных режимов водного раствора поваренной соли в квадратной полости. Границы полости считаются твердыми, непроницаемыми для вещества. Вертикальные границы теплоизолированы, на горизонтальных поддерживаются постоянные разные температуры, соответствующие нагреву снизу или сверху. Средняя температура принята равной 288 К. Вычисления проводятся в рамках нестационарного подхода, с использованием приближения Буссинеска и учетом полиномиальной зависимости коэффициента термодиффузии от температуры. Согласно экспериментальным данным, коэффициент термодиффузии исследуемой смеси при температуре 285,4 К меняет знак. В настоящей работе рассмотрен такой диапазон температур, что смена знака коэффициента термодиффузии происходит внутри моделируемой области. Другие коэффициенты переноса считаются постоянными. Расчеты проведены для случаев земной и пониженной силы тяжести. Проведено сравнение со случаем постоянного значения коэффициента термодиффузии, который при рассматриваемой средней температуре отрицателен.

При постоянном отрицательном коэффициенте термодиффузии тяжелая компонента смеси накапливается в более нагретой части полости, а легкая диффундирует в более холодную область. Это означает, что при нагреве снизу в этой части полости термодиффузия приводит к формированию устойчивой стратификации по плотности. В противоположность этому зависимость плотности от температуры при подогреве снизу приводит к формированию неустойчивой плотностной стратификации. В этом случае при определенном значении числа Релея механическое равновесие смеси становится неустойчивым. При нагреве сверху благодаря термодиффузии возникает неустойчивая по плотности стратификация, что приводит к возникновению конвекции.

При зависящем от температуры коэффициенте термодиффузии из-за смены его знака внутри полости образуются две области. При нагреве снизу доминирующим механизмом возникновения конвекции в обеих областях является тепловой. При нагреве сверху в верхней части полости коэффициент термодиффузии отрицателен, что приводит к возникновению конвекции за счет термодиффузии. В нижней части полости коэффициент термодиффузии положителен, что при нагреве сверху дает устойчивую стратификацию по плотности. Однако течение из верхней части полости проникает и в эту область.

Прослежены локальные и интегральные характеристики нелинейных режимов, возникающих в полости при нагреве сверху и снизу в условиях земной и пониженной тяжести, найдены структура возникающего течения и распределение концентрации примеси.

Работа выполнена при финансовой поддержке правительства Пермского края (Программа поддержки Научных школ Пермского края, Соглашение № С-26/788).

О КРИТЕРИЯХ МАРТЕНСИТНЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ В ПРЯМОЙ ФИЗИЧЕСКИ-ОРИЕНТИРОВАННОЙ МОДЕЛИ

Макаревич Е.С., Подседерцев А.Н., Кондратьев Н.С., Трусов П.В.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
makareviches@inbox.ru, stevenmoore@yandex.ru, kondratevns@inbox.ru, tpv@matmod.pstu.ru

Наличие мартенситной фазы в структуре сталей при изготовлении изделий из них во многом определяет высокую прочность последних, в связи с чем актуальной задачей является разработка конститутивных моделей, позволяющих описывать особенности формирования мартенситных структур в материалах в зависимости от температурно-механических воздействий в процессах изготовления различных деталей из них.

Для описания особенностей формирования мартенситных субструктур в объеме материала на мезоуровне под действием термомеханической нагрузки предлагается использовать прямую упруговязкопластическую физическую модель [1, 2]; реализация модели осуществляется методом конечных элементов. Рассматривается представительный мезообъем материала – исходно однофазный монокристалл с гранецентрированной кубической решеткой (аустенит), для которого применяется процедура конечно-элементной дискретизации. Под кристаллитом в рамках прямой модели понимается точка интегрирования, которой приписываются свойства материала в конкретной фазе (аустенит/мартенсит), с определенным типом решетки материала, известными механическими и теплофизическими свойствами. В рамках описанной структуры модели в качестве определяющего соотношения в каждой точке интегрирования используется обобщенный закон Гука в скоростной релаксационной форме. Все свойства материала в точке интегрирования рассматриваются в подвижной системе координат, связанной с решеткой в текущей фазе. В качестве меры скорости напряжений предлагается использовать коротационную производную тензора напряжений Кирхгофа. Скорости сдвигов по системам скольжения в кристаллите определяются с использованием вязкопластического степенного закона. В рамках единого алгоритма для описания отклика материала на термомеханические воздействия решаются задача расчета напряженного-деформированного состояния и задача теплопроводности для рассматриваемого объема. При этом мощность внутренних тепловых источников в каждой точке интегрирования в рамках рассматриваемой структуры модели определяется как неупругими сдвигами по системам скольжения в кристаллите, так и реализовавшимися в текущий момент процесса в кристаллите фазовыми превращениями.

Для решения поставленной проблемы одной из ключевых задач является выбор критерия фазового превращения для элемента структуры на основе детального анализа физических механизмов, термодинамики рассматриваемого процесса, обзора существующих критериев фазовых превращений различных типов, оценки их применимости к описанию мартенситного перехода в рамках вышеизложенной структуры прямой модели материала, решению которой в основном посвящается предлагаемая работа.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края в рамках научного проекта № 20-41-596002.

Литература

- [1] Трусов П.В., Швейкин А.И. Многоуровневые физические модели моно- и поликристаллов. Прямые модели // Физическая мезомеханика. – 2011. – №14 (5). – С.5-30.
- [2] Трусов П. В., Швейкин А. И. Многоуровневые модели моно- и поликристаллических материалов: теория, алгоритмы, примеры применения. – Новосибирск: Издательство СО РАН, 2019. – 605 с. DOI: 10.15372/MULTILEVEL2019TPV

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СВЯЗАННОЙ МОДЕЛИ МДТТ И МЖГ ДЛЯ РАСЧЕТА ДЕМПФИРОВАНИЯ МАЯТНИКОВОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА

Максимов П.В., Конотоп Д.А.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
konotopda@gmail.com

В работе описывается подход построения двухсторонней связанной модели механики деформируемого твердого тела и механики жидкости и газа для расчета коэффициента газодинамического демпфирования маятникового акселерометра. Задача решалась в трёхмерной постановке с применением метода конечных элементов для механической части и метода конечных объемов для описания поведения газа. Для реализации использовалось ПО Ansys Mechanical и Fluent соответственно.

Расчетная схема подразумевала подачу ступенчатого воздействия в виде ускорения по оси чувствительности маятникового подвеса, а искомым результатом выступала постоянная времени переходного процесса τ , через которую искался коэффициент демпфирования $K_{\dot{\theta}}$ по формуле:

$$K_{\dot{\theta}} = \frac{J + k_{\theta}\tau^2}{\tau},$$

где J – момент инерции чувствительного элемента относительно оси колебаний; k_{θ} – коэффициент жесткости упругих элементов.

Для проверки результатов численного моделирования был проведен натурный эксперимент. Метод заключался в том чтобы перемещать маятник в зазоре с постоянной угловой скоростью $\dot{\theta}$ и измерять при этом величину затраченного усилия M_{κ} [1], тогда

$$K_{\dot{\theta}} = \frac{M_{\kappa}}{\dot{\theta}}.$$

Сравнение результатов показало адекватность применимого подхода.

Актуальность работы обосновывается необходимостью получения численного значения коэффициента демпфирования как физического параметра полной модели устройства, включающую в себя как механическую часть так электрический контур обратной связи [2], а также для прогнозирования вносимых изменений в конструкцию подвеса.

Литература

- [1] Коновалов С.Ф. Теория виброустойчивости акселерометров. – М.: Машиностроение. 1991. – 272 с.
- [2] Конотоп Д.А., Максимов П. В. Моделирование работы компенсационного акселерометра с помощью пакета SIMULINK. Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации, конференция, всероссийский уровень, 2018

ТЕМПЕРАТУРНЫЕ КОРРЕЛЯЦИИ КАК МЕТОД ОЦЕНКИ СКОРОСТИ ПОТОКОВ ЖИДКИХ МЕТАЛЛОВ РАЗЛИЧНОЙ ПРИРОДЫ

Мамыкин А.Д., Теймуразов А.С., Колесниченко И.В.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

mad@icmm.ru, tas@icmm.ru, kiv@icmm.ru

Численно и экспериментально исследованы возможности метода температурных корреляций для определения средней скорости течения жидкого металла с температурными неоднородностями различной природы. Измерение скорости в жидких металлах, представляют собой сложную задачу из-за непрозрачности и агрессивности таких сред. Различные методы, обычно используемые для измерения скорости потока, не применимы вообще или требуют значительной модификации для использования в жидких металлах. Метод температурных корреляций является интуитивным и возникает естественным образом в задачах с множеством точек измерения температуры жидкой среды. Серьезное развитие было связано с исследованиями, посвященными атомной отрасли в 1970-х [1]. Данный метод является абсолютным, а также, что немаловажно, не чувствителен к магнитным полям [2].

Метод начинает работать, когда в жидкой среде существуют температурные неоднородности, которые перемещаются вместе с потоком. Проходя последовательно через два датчика температуры, они вызывают всплески температуры на этих датчиках с некоторой задержкой по времени. Используя кросскорреляционный анализ можно узнать величину этой задержки и определить скорость потока в пространстве между датчиками.

В случае турбулентной конвекции температурные неоднородности возникают естественным образом и переносятся возникающей крупномасштабной циркуляцией. В работе были рассмотрены конвективные ячейки цилиндрической геометрии с различными отношениями длины к диаметру равными 1, 5 и 20. Количество внедренных в жидкий металл температурных датчиков и их взаимное расположение варьировалось от установки к установке. Численно задача решалась для аспектных отношений 1 и 5. Получено хорошее согласие с экспериментами, сделаны выводы об устойчивости метода к интенсивности турбулентности и стабильности крупномасштабной циркуляции.

Метод температурных корреляций также может быть применён для определения расхода жидкого металла при его транзитном течении в трубе круглого сечения. Необходимые температурные пульсации здесь могут быть созданы, например, с помощью магнитного препятствия. Таким препятствием в эксперименте были сильные постоянные магниты, создающие магнитное поле в том числе для кондукционного датчика скорости. Как было показано в численном счёте, проходя через такое магнитное препятствие часть потока отжимается к нетеплоизолированным стенкам и охлаждается, часть не претерпевает изменений. Таким образом образуется область смешения разнотемпературных потоков с температурными пульсациями небольшой амплитуды, двигающимися со скоростью потока. Такие пульсации и улавливаются термопарами, помещенными в эту область.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Правительства Пермского края в рамках научного проекта «Разработка систем измерения расхода жидкого металла в каналах металлургических и ядерных энергетических установок».

Литература

- [1] J. Benkert, C. Mika, K.H. Raes, D. Stegemann, Determination of thermocouple transfer-functions and fluid-flow velocities by temperature-noise measurements in liquid sodium, Progress of Nuclear Energy 1 (2) (1977) 553–563.
- [2] I.A. Belyaev, N.G. Razuvanov, V.G. Sviridov, V.S. Zagorsky Temperature correlation velocimetry technique in liquid metals, Flow Measurement and Instrumentation, Volume 55, 2017, Pages 37-43.

ВЛИЯНИЕ СТЕРЖНЯ-КАТОДА НА ЭЛЕКТРОВИХРЕВОЕ ТЕЧЕНИЕ: РАСЧЕТ И ЭКСПЕРИМЕНТ

Мандрыкин С.Д., Ельтищев В.А., Колесниченко И.В.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

msd@icmm.ru

Во многих промышленных технологических устройствах реализуются электровихревые течения (ЭВТ), возникающие при протекании электрического тока через жидкую электропроводную среду (жидкий металл) [1]. Одним из способов воздействия на структуру таких течений является конфигурация токоподвода [2]. Кроме того, существенное влияние на структуру ЭВТ может оказывать внешнее магнитное поле [3].

В работе численно и экспериментально исследуется ЭВТ жидкого металла в цилиндрическом объеме диаметром 201.4 мм и высотой 100 мм, помещенном во внешнее постоянное однородное магнитное поле, в случае осевого токоподвода. Катод представляет собой медный стержень диаметром 30 мм, полностью пронизывающий ячейку по ее вертикальной оси симметрии. В качестве анода выступает вся боковая стенка цилиндра. Численное моделирование задачи осуществляется в пакете программ ANSYS. Электромагнитная задача решается в ANSYS Emag, а гидродинамическая — в ANSYS Fluent. Задача решается в безындукционном приближении, так что поле электромагнитных сил требуется найти лишь единожды. Материальные параметры модели выбираются в соответствии с лабораторным исследованием.

Экспериментальная установка представляет собой цилиндрическую емкость из нержавеющей стали, заполненную галлиевым сплавом. Верхний и нижний торцы емкости выполнены из оргстекла, поскольку оно позволяет использовать для анализа течения ультразвуковой доплеровский анемометр, фиксирующий пространственное распределение вертикальной компоненты скорости жидкого металла. Для регистрации азимутального течения в боковую стенку установки вмонтированы кондукционные датчики скорости. Через жидкий металл проходит постоянный электрический ток силой от 100 до 1200 А. Внешнее магнитное поле создается двумя катушками Гельмгольца, расположенными на оси симметрии цилиндра.

Результаты численных и экспериментальных исследований ЭВТ в цилиндре показали, что в отсутствие внешнего магнитного поля в ячейке создается полоидальное течение в виде симметричного тора. Наблюдается линейный рост интенсивности течения при увеличении силы тока. Слабое магнитное поле практически не оказывает влияния на течение, в то время как магнитное поле выше порогового значения примерно в ~ 0.20 мТл вызывает подавление полоидального и развитие азимутального течений. Структуры течений, возникающих как при осевом, так и при локализованном токоподводе, качественно не отличаются.

Литература

- [1] Боярев В.В., Фрейберг Я.Ж., Шилов Э.В., Щербинин Э.В. Электровихревые течения – Рига: Зинатне, 1985. – 315 с.
- [2] Mandrykin S., Kolesnichenko I. The influence of electric current application configuration on the electro-vortex flow structure of conductive medium in cylindrical cell // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. – 2018. – № 950. – P. 012031.
- [3] Kolesnichenko I., Frick P., Eltishchev V., Mandrykin S., Stefani F. Evolution of a strong electrovortex flow in a cylindrical cell // Phys. Rev. Fluids – 2020. – V. 5, № 12. – P. 123703.

РАСЧЁТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СТАТИЧЕСКОГО ИНДЕНТИРОВАНИЯ НА СКОРОСТЬ И ИЗМЕНЕНИЕ ТРАЕКТОРИИ УСТАЛОСТНОГО РОСТА ТРЕЩИНЫ

Матвиенко Ю. Г., Разумовский И. А., Федоров А. А.

Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН, Москва

sanyafedorov37@yandex.ru , murza45@gmail.com

Представлены результаты разработки методики и алгоритма в среде ANSYS для численного моделирования усталостного роста трещины и изменения ее траектории в результате индентирования сферическим индентором области у вершины трещины, приводящего к созданию дополнительного поля остаточных напряжений. Точка (или точки) индентирования смещены относительно линии первоначального развития трещины, вследствие чего дополнительное поле остаточных напряжений является несимметричным.

Для реализации указанного подхода разработан специальный алгоритм в программном комплексе ANSYS. С учётом перспектив развития разработанной методики применительно к использованию динамического индентирования в макросе используется решатель ANSYS Explicit STR, полностью интегрированный в унифицированный расчетный модуль Workbench Mechanical. На первом этапе расчёта определяются поля остаточных напряжений, возникающих при индентировании исследуемого объекта; на втором этапе производится численное моделирование процесса усталостного роста трещины. При «соединении» указанных двух расчётов они объединяются в один, в котором существуют общие разделы: *Mesh* (КЭ-сетка), *Fracture* (трещины) и др.

Для численного моделирования процесса развития трещины при циклическом нагружении использовалось уравнение Пэриса. Угол поворота усталостной трещины определялся по критерию максимальных тангенциальных напряжений у вершины трещины. Так как в этом случае в зоне вершины трещины имеет место комбинированное нагружение, характеризующееся КИН K_I и K_{II} (а также, возможно и K_{III}), расчёт приращения длины трещины выполняется путём подсчёта длин разделившихся «открытых» конечных элементов (КЭ), описывающих берега (или поверхности) трещины в зоне её вершины. Для плоской задачи изменение длины трещины представляет собой сумму длин открытых КЭ, принадлежащих берегам трещины, а для пространственных - изменением положения каждого узла фронта трещины и, таким образом, является суммой изменения длин конечных элементов, расположенных в направлении роста трещины. Величины коэффициентов интенсивности напряжений K_I и K_{II} определялись через интеграл взаимодействия.

С использованием разработанного макроса решена серия задач о несимметричном индентировании зоны вершины усталостной трещины. Как показывают результаты проведенных расчётов компактного образца с трещиной из алюминиевого сплава AL 7075-T6, при одной и той же локализации точки индентирования с ростом величины усилия индентирования P имеет место увеличение отклонения траектории трещины от начального направления, причём при дальнейшем увеличении числа циклов нагружения траектория трещины выходит на линию параллельную начальной ориентации трещины. При достижении усилия P некоторой величины P^* траектория может развиваться таким образом, что одна из компонент вектора, определяющая её траекторию, может быть ориентирована в направлении, противоположном исходной ориентации трещины. Это обстоятельство может быть использовано для управления траекторией роста усталостной трещины.

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

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАМАГНИЧИВАНИЯ ОБРАЗЦОВ ФЕРРОГЕЛЯ С РАЗНОЙ СТРУКТУРОЙ СВЯЗУЮЩЕГО

Меленев П.В.¹, Рыжков А.В.¹

¹Институт механики сплошных сред ПФИЦ УрО РАН, Пермь
melenev@icmm.ru, ryzhkovalexandr@gmail.com

Феррогели представляют собой пример мягких магнитоактивных композиционных материалов с ярко выраженной связью магнитных и механических характеристик. Это объясняется тем, что в феррогелях в качестве матрицы используются ультрамягкие гидрогели (с модулем упругости ниже 10 кПа), наполненные, как правило, наночастицами ферромагнетиков. Такое сочетание допускает заметную магнито-индуцируемую перестройку структуры наполнителя в полях даже сравнительно невысокой интенсивности (в пределах 0.1 Т). Это может быть полезно, учитывая возможное применение феррогелей в биомедицинских задачах [1]. Несмотря на растущее число экспериментальных работ, посвящённых феррогелям, прямое наблюдение эволюции внутренней структуры материалов по ходу магнито-механических процессов связано с большими сложностями. В этой связи численные эксперименты, моделирующие материал на мезоуровне, могут оказаться весьма полезны для понимания механизмов, лежащих в основе уникального поведения феррогелей.

В нашей работе теоретическое исследование поведения малых образцов феррогеля ведётся на базе модели, основанной на подходе крупнозернистой молекулярной динамики (coarse grained molecular dynamics) [2]. В модели рассматриваются монодисперсные однодоменные магнитные частицы с одноосной магнитной анизотропией заданной энергии. Полимерные макромолекулы матрицы феррогелей имитируются цепочками недеформируемых сфер, жёстко связанных между собой в решётку с заданной топологией, частью узлов которой служат магнитные частицы. Действие температуры в системе имитируется на основе термостата Ланжевена. Ранее, мы рассматривали вариант модели с квази-кубической структурой матрицы [3]. Моделирование не выявило ожидаемых гистерезисных явлений в магнито-деформационном отклике образцов, что может объясняться слишком высокой жёсткостью выбранного варианта топологии матрицы. Для «ослабления» материала было решено рассмотреть матрицу со структурой типа «алмаз», в которой на один узел приходится по 4 сшивки (вместо 6 у кубической решётки).

В работе исследуются зависимости состояния образца феррогеля от внешнего поля, а также характеристик магнитного наполнения: концентрации частиц, величин их магнитных моментов и энергии анизотропии. В частности, проводится моделирование циклов квази-равновесного намагничивания образцов, необходимое для выявления гистерезисных явлений в магнито-механическом поведении материала. Для описания последнего помимо макрохарактеристик используются данные анализа структуры включения, отражающие эволюцию кластеров магнитных частиц. Проводится сравнение результатов моделей с квази-кубической и «алмазной» полимерной сеткой, направленные на выявление роли топологии матрицы в формировании магнито-механического отклика композита.

Литература

- [1] Datta P. Magnetic gels // Polymeric Gels (eds. K.Pal and I. Banerjee) – Springer, 2018 – pp 442-465
- [2] Arnold A., Lenz O. et al ESPResSo 3.1: Molecular Dynamics Software for Coarse-Grained Models // Meshfree Methods for Partial Differential Equations VI (eds. Griebel M. and Schweitzer M.A.) – Springer, 2013 – pp 1-23
- [3] Ryzhkov A., Melenev P. et al, Structure organization and magnetic properties of microscale ferrogels: The effect of particle magnetic anisotropy // J. Chem. Phys. – 2016 – Vol. 145 – P 074905

СБОР И АНАЛИЗ ОБРАЗЦОВ ЛЕГОЧНОГО АЭРОЗОЛЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ЛЕГКИХ

А.И. Мизёв¹, А.В. Шмыров¹, И.А. Мизева¹, А.И. Шмырова¹,

И.М. Пшеничникова²

¹ *Институт механики сплошных сред УрО РАН*

² *Пермский государственный медицинский университет им. Е.А. Вагнера*

alex_mizev@icmm.ru, shmyrov@icmm.ru, mizeva@icmm.ru, lutsik@icmm.ru, im_p@rambler.ru

Для построения диагностики воспалительных пневмопатий легких актуальна разработка эффективных методов неинвазивного сбора образцов лёгочного аэрозоля и изучения поверхностной активности полученного нативного материала [1, 2]. В данной работе разработан и аппаратно реализован метод, основанный на улавливании капель легочной жидкости, содержащихся в виде аэрозоля в выдыхаемом человеком воздухе [3]. Поток выдыхаемого воздуха пропускается через область коронного разряда, где капли аэрозоля получают электрический заряд и затем переносятся на поверхность воды электростатическими силами. Содержащийся в захваченных каплях легочный сурфактант формирует адсорбированный слой, поверхностные свойства которого можно исследовать тензиометрическими методами. Апробация метода и оптимизация конструкции установки проведены на модельном аэрозоле слабого раствора электролита, что позволило измерять эффективность захвата через проведение кондуктометрических измерений. Для исследования поверхностных свойств легочного сурфактанта использован модифицированный метод капиллярных волн [4]. Методика сбора выдыхаемых частиц и исследования поверхностных свойств легочного сурфактанта протестирована на группе здоровых добровольцев. Проведено сравнительное исследование поверхностных свойств нативного материала, собранного электростатическим методом из выдыхаемого воздуха и полученного в процессе бронхоальвеолярного смыва в группах здоровых добровольцев и больных туберкулёзом лёгких.

Литература

- [1] Schwarz, K., Biller, H., Windt, H., Koch, W., Hohlfeld, J.M. Characterization of exhaled particles from the healthy human lung a systematic analysis in relation to pulmonary function variables. // Journal of Aerosol medicine and pulmonary drug delivery. 2010. Vol. 23. p. 371-379.
- [2] Шмырова А.И., Пшеничникова-Пеленёва И.М., Кононова Л.И., Коробов В.П. Совершенствование методических подходов к неинвазивному сбору биопроб лёгочного сурфактанта // Пермский медицинский журнал. 2019. Т.39. №1. С. 35-44.
- [3] Shmyrov, A., Mizev, A., Mizeva, I., & Shmyrova, A. Electrostatic precipitation of exhaled particles for tensiometric examination of pulmonary surfactant // Journal of Aerosol Science. Vol. 151. 2021. p. 105622.
- [4] Shmyrov, A., Mizev, A., Shmyrova, A., & Mizeva, I. Capillary wave method: An alternative approach to wave excitation and to wave profile reconstruction // Physics of Fluids. Vol. 31(1). 2019. p. 012101-8.

ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗ ВРЕМЕННОЙ ДИНАМИКИ СПЕКЛ-КОНТРАСТНОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ МИКРОЦИРКУЛЯЦИИ КРОВИ

Мизева И.А.^{1,2}, Дремин В.², Потапова Е.В.², Козлов И.²

¹Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

²Орловский государственный университет имени Тургенева, Орел
mizeva@icmm.ru,

Спектральный анализ временных рядов, полученных методом лазерной доплеровской флоуметрии (ЛДФ), широко используется для выявления регуляций физиологических механизмов сосудистого тонуса и его нарушений. Метод ЛДФ имеет существенное ограничение, связанное с пространственным и временным разрешением. Альтернативой ЛДФ является метод лазерной спекл-контрастной визуализации (ЛСКВ), основанный на том же физическом принципе [1], но лишенный упомянутых выше недостатков. Наряду с этим существует большое количество публикаций [2], где была отмечена актуальность временной динамики анализа ЛСКВ. В представленной работе нами было проведено экспериментальное исследование кожной микроциркуляции методом ЛДФ и ЛСКВ у 14 здоровых добровольцев. Показана высокая корреляция колебательных компонент данных сигналов, таким образом показано, что метод ЛСКВ применим для оценки функционального состояния системы микроциркуляции человека [3]. Более того, нами обнаружена пространственная неоднородность колебательных компонент периферического кровотока связанная с дыхательной активностью. Этот результат лег в основу пилотной работы по подбору набора дыхательных тестов для изучения гетерогенности пульсаций кровотока [4].

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ (грант 18-15-00201).

Литература:

- [1] I.Fredriksson, I. and M Larsson. "On the equivalence and differences between laser Doppler flowmetry and laser speckle contrast analysis." *Journal of biomedical optics* 21.12 (2016): 126018.
- [2] M. Ansari and A Nirala Monitoring capillary blood flow using laser speckle contrast analysis with spatial and temporal statistics. *Optik*, (2015) 126(24), 5224-5229.
- [3] Mizeva, I., Dremmin, V., Potapova, E., Zhrebtsov, E., Kozlov, I., & Dunaev, A. (2019). Wavelet analysis of the temporal dynamics of the laser speckle contrast in human skin. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 67(7), 1882-1889.
- [4] Mizeva, Irina, et al. "Heterogeneity of cutaneous blood flow respiratory-related oscillations quantified via LSCI wavelet decomposition." *2020 11th Conference of the European Study Group on Cardiovascular Oscillations (ESGCO)*. IEEE, 2020.

АЛГОРИТМ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ В МОДИФИЦИРОВАННОМ МЕТОДЕ КАПИЛЛЯРНЫХ ВОЛН

Мизева И.А.¹, Шмыров А.В.¹

¹*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*
mizeva@icmm.ru, shmyrov@icmm.ru

В различных задачах межфазной гидродинамики, встает вопрос об измерении межфазного натяжения жидкостей [1]. Актуальной представляется задача исследования изменения поверхностных свойств жидкостей в силовых полях, например в случае магнитной жидкости во внешнем магнитном поле. Экспериментальная реализация модифицированного метода капиллярных волн, отличающаяся как способов возбуждения капиллярной волны, так и методом регистрации поверхности представлена в работе [2]. Для генерации волны амплитудой в несколько десятков нанометров использован акустический бесконтактный метод, а для записи полного трехмерного профиля поверхности – интерферометр. В данной реализации не приложено значительных усилий для виброизоляции экспериментальной установки.

Полученные изображения поверхности имеют ряд особенностей, а именно, присутствуют крупномасштабные помехи, вызванные менисковыми эффектами и внешними вибрационными полями, а часть изображения закрыта конструкцией установки, также положение центра цилиндрической волны задается с некоторой погрешностью. Такие особенности накладывают дополнительные ограничения на алгоритм обработки данных. В данной работе предложен оригинальный алгоритм обработки, в котором полученная интерферограмма исследуется при помощи бегущей уединенную цилиндрической волны. Такой метод позволяет проводить обработку изображений профиля поверхности жидкости в автоматическом режиме.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 20-01-00648).

Литература

- [1] Khokhryakova C.A., Mizeva I.A., Shmyrova A.I., and Shmyrov A.V. Measurment of magnetic fluid surface tension under the action of magnetic field // Interfacial Phenomena and Heat Transfer. – 2020. – V.8. – №4.
- [2] Shmyrov A. et al. Capillary wave method: An alternative approach to wave excitation and to wave profile reconstruction //Physics of Fluids. – 2019. – V. 31. – №1. – С. 012101.

**КОЭФФИЦИЕНТЫ МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ РЯДА
УИЛЬЯМСА ДЛЯ ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ПЛАСТИНЫ С ДВУМЯ БОКОВЫМИ
ГОРИЗОНТАЛЬНЫМИ НАДРЕЗАМИ**

Миронов А.В.¹

¹*Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С.П.Королева, Самара*
mironov.sanyok2015@yandex.ru

В данной работе были получены коэффициенты многопараметрического разложения ряда Уильямса для поля напряжений в окрестности трещин прямоугольной пластины с двумя горизонтальными боковыми надрезами с использованием метода конечно-элементного анализа. Показано сравнение результатов коэффициентов интенсивности напряжений и Т-напряжений в программном комплексе Simulia Abaqus с результатами проведенного эксперимента, показано построение 2D модели для получения коэффициентов интенсивности напряжений и Т-напряжений. Коэффициенты разложения ряда Уильямса имеют хорошую точность [1].

Литература

[1] Bachareva Y.N., Mironov A.V., Petrova D.M. Extraction of fracture mechanics parameters from fem analysis: algorithms and procedures – Вестник Самарского университета. Естественная серия, 2020, Т. 26, № 1 – С. 69–77. DOI: <http://doi.org/10.18287/2541-7525-2020-26-1-69-77>.

ПРЯМАЯ ДВУХУРОВНЕВАЯ УПРУГОВЯЗКОПЛАСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ: ПРИЛОЖЕНИЕ К ОПИСАНИЮ ПРОЦЕССОВ СЛОЖНОГО НАГРУЖЕНИЯ

Митрополит И.Ю., Янц А.Ю.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
vanya.mitr@gmail.com, maximus5.59@gmail.com

На данный момент существует значительное число математических моделей, описывающих эволюционирующую структуру материалов на различных масштабных уровнях. Однако, среди всех выделяются модели физических теорий пластичности, которые позволяют описывать процессы интенсивных пластических деформаций (ИПД), реализующихся в реальных технологических процессах. Ранее была показана удовлетворительная предсказательная способность статистической упруговязкопластической модели поликристаллического материала [1] в процессах произвольного сложного нагружения [2]. В данной работе предполагается получение физического обоснования и объяснения эффектов сложного нагружения, таких как нырок интенсивности напряжений, запаздывание векторных и скалярных свойств, которые были неоднократно подтверждены экспериментальными данными. В последние десятилетия для описания процессов неупругого деформирования, в том числе и сложного, используются часто прямые двухуровневые модели, основанные на физических теориях пластичности [1]. Элементом макроуровня является представительный макрообъем – образец, элементом мезоуровня — кристаллит, которые в свою очередь объединяются в зерна (кристаллиты зерна имеют одну ориентацию в исходном состоянии). На уровне кристаллита вводятся внутренние переменные (ВП), описывающие состояние внутренней структуры, для которых строятся эволюционные уравнения, связывающие изменение ВП с другими ВП и физико-механическими свойствами.

Приведена постановка задачи нагружения поликристаллического образца. Для описания эволюции структуры поликристалла использована упруговязкопластическая модель. Составлен алгоритм и его численная реализация, проведена проверка возможности применения данной модели для описания процессов сложного деформирования и связанных с ним эффектов.

В дальнейшем планируется проведение численных расчетов по сложному нагружению поликристаллических образцов с целью объяснения возникающих эффектов (нырок интенсивности напряжений, запаздывание векторных свойств). Для анализа состояния материала в численном эксперименте производится нагружение по траекториям деформаций со сложной геометрией, например, растяжением, сжатием, кручением (сдвигом), но с изменением направления деформирования во время процесса деформации.

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

Литература

[1] Трусов П. В., Швейкин А. И. Многоуровневые модели моно- и поликристаллических материалов: теория, алгоритмы, примеры применения. — Новосибирск: Издательство СО РАН, 2019. — 605 с. DOI: 10.15372/MULTILEVEL2019TRV

[2] Янц А.Ю. Двухуровневая модель для описания неупругого деформирования поликристаллов: приложение к анализу сложного нагружения в случае больших градиентов перемещений: диссертация кандидата физико-математических наук: 01.02.04; Место защиты: Ин-т механики сплошн. сред УрО РАН, Пермь, 2016.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОРИЕНТАЦИИ СТРУКТУРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МНОГОФАЗНЫХ СИСТЕМ В ПАРАМЕТРАХ ОСЬ-УГОЛ

Мисюра Н.Е.¹, Митюшов Е.А.¹

¹Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина,
Екатеринбург

n_misura@mail.ru, mityushov-e@mail.ru

С целью численного моделирования распределения структурных элементов многофазных систем по ориентации и оценке их разориентации предлагается математическая модель эффективного структурного элемента и метод задания его положения в лабораторных осях с использованием параметров ось-угол. Наряду с углами Эйлера, самолетными углами и направляющими косинусами параметры ось-угол находят все более широкое применение в описании поворотов и вращений твердого тела. Как следует из теоремы Эйлера-Даламбера о конечном повороте, произвольное положение тела по отношению к его базовой ориентации наглядно определяется заданием единичного вектора оси поворота и углом поворота вокруг этой оси. Четыре скалярных параметра – координаты единичного вектора оси поворота и угол поворота, определяют соответствующий единичный кватернион ориентации. При этом алгебра кватернионов становится мощным инструментом исследования пространственных распределений фазовых составляющих. В частности, для описания взаимного расположения двух структурных элементов достаточно ввести единственный параметр – угол разориентации, определяемый скалярным произведением соответствующих кватернионов. Геометрически этот параметр показывает значение угла, на который надо повернуть главные оси первого эффективного структурного элемента до совмещения с главными осями второго эффективного структурного элемента вокруг некоторой фиксированной оси. Другим примером использования данной параметризации может служить решение задачи о генерации равномерных детерминированных выборок на группе вращений $SO(3)$, которая имеет фундаментальное значение для многих областей. Такие выборки могут служить эталонными ориентациями, равномерно заполняющими все ориентационное пространство с возможностями оценивания близости к этим эталонным ориентациям любой другой из исследуемого конфигурационного многообразия вращений. В работе дается метод генерации равномерных детерминированных выборок на группе вращений $SO(3)$ и их визуализации средствами компьютерного моделирования в трехмерном евклидовом пространстве. Метод основан на известном факте того, что единичные кватернионы образуют группу $Sp(1)$, являющуюся двулистным накрытием группы вращений $SO(3)$. Это дает возможность отождествлять элементы равномерных дискретных подгрупп группы $Sp(1)$ с вершинами правильных четырехмерных многогранников, вписанных в единичную гиперболу, и визуализировать соответствующую дискретную подгруппу группы $SO(3)$. Приводится пример моделирования многофазной среды, представленной шестьюдесятью идеальными ориентациями, равномерно заполняющими все ориентационное пространство. Придание соответствующего веса каждой ориентации позволяет получить достаточно строгую математическую модель анизотропной многофазной среды для исследования ее поведения в условиях статического и динамического термомеханического воздействия.

АТОМНО-СИЛОВАЯ МИКРОСКОПИЯ ПОДПОВЕРХНОСТНЫХ СВОЙСТВ НЕОДНОРОДНОГО ПОЛИМЕРА

Морозов И.А.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

ilya.morozov@gmail.com

Современные методы атомно-силовой микроскопии (АСМ) позволяют получать структурные и физико-механические свойства поверхностей материалов с высоким разрешением. Речь в первую очередь идет о быстрой наноиндентации, когда благодаря высокой скорости взаимодействия зонда с поверхностью, каждой точке исследуемой области соответствует своя силовая кривая вдавливания зонда в материал.

Рельеф поверхности, наблюдаемый исследователем в экспериментах, в общем случае не является постоянным. Топография зависит от приложенной нагрузки и локальных свойств материала. Исследование рельефа на различных этапах нагружения совместно с другими физико-механическими свойствами (жесткость, адгезия, бесконтактные взаимодействия) поверхности, а также с учетом особенностей кинетики нагружения (скорость движения зонда в неоднородном материале непостоянна) вносит существенный вклад в представление о свойствах материала на микро- и наноуровне.

Объектом исследования являлся мягкий полиуретан – широко распространенный синтетический полимер, состоящий из жестких блоков, определенным образом распределенных в более мягкой матрице. Анализ взаимодействия зонда с поверхностью показал мягкий поверхностный нанослой (рис. а) толщиной до 10 нм, скрывающий внутреннюю жесткую фибриллярную структуру полимера (рис. б); измерены модули упругости мягких и жестких блоков.

Обсуждаемые методы могут применяться при исследовании широкого класса мягких неоднородных материалов, полимерных композитов, а также пленок и покрытий.

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

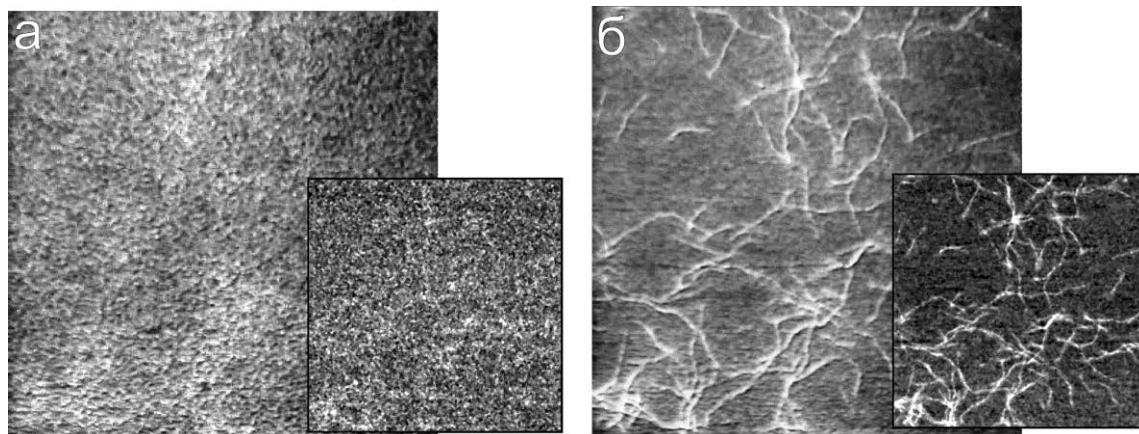


Рисунок. АСМ-изображения 3x3 мкм поверхности (а) и подповерхности (б) полиуретана. На вставках даны карты соответствующие жесткости.

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ КАПИТАЛЬНЫХ ВЫРАБОТОК В МАССИВАХ ПОРОД С РЕЗКО ОТЛИЧАЮЩИМИСЯ ПРОЧНОСТНЫМИ И ДЕФОРМАЦИОННЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Морозов И.А., Паньков И.Л., Токсаров В.Н.,

Горный институт УрО РАН, Пермь

imorozov.work@yandex.ru, ivpan@mi-perm.ru, toksarov@mi-perm.ru

Исследование выполнено на примере Гремячинского месторождения калийных солей, основными особенностями которого являются: глубина залегания промышленного сильвинитового пласта от 1100 до 1300 м; близкое расположение к почве выработок, пройденных в промышленном пласте, слабых карналлитовых пород; близкое расположение к кровле выработок ангидритовых, ангидрит-доломитовых пород, обладающих существенно отличающимися прочностными и деформационными характеристиками по сравнению с соляными.

Проведен комплекс лабораторных исследований по определению прочностных и деформационных характеристик пород месторождения. Эксперименты выполнялись как в режиме условно-мгновенного, так и длительного нагружения [1, 2]. Установлено, что прочность на одноосное сжатие и растяжение карналлитовых пород, залегающих вблизи почвы выработок, меньше тех же показателей сильвинитовых пород в 2,5 раза, а каменной соли – в 3,0 раза. Установлено, что для ангидрит-доломитовых, доломитовых пород коэффициент пластичности по результатам одноосного сжатия составляет 1,5, в то время как для соляных 2,3–2,6, что количественно подтверждает существенно большую склонность соляных пород к проявлению пластических деформаций в аналогичных условиях нагружения.

Выполнен комплекс инструментальных наблюдений за характером деформирования контура выработок в условиях месторождения [3]. Установлены основные особенности деформирования горных выработок, пройденных в соляных породах вблизи пород с резко отличающимися прочностными и деформационными характеристиками.

В программном комплексе «ANSYS» реализована упруго-вязко-пластическая модель среды, позволяющая исследовать напряженно-деформированное состояние горных выработок, пройденных в соляных породах Гремячинского месторождения. По результатам моделирования, на примере типового разреза месторождения, исследовано влияния положения поперечного сечения горных выработок относительно карналлитовых пород в почве, ангидритовых и ангидрит-доломитовых в кровле на устойчивость породного контура.

Литература

- [1] Паньков И.Л., Морозов И.А. Деформирование соляных пород при объемном многоступенчатом нагружении // Записки Горного института. – 2019. – т. 239. – с. 510–519.
- [2] Морозов И.А., Ударцев А.А., Паньков И.Л. Анализ деформирования соляных пород Гремячинского и Верхнекамского месторождений в лабораторных условиях // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2020. – № 10. – С. 16–28.
- [3] Токсаров В.Н., Морозов И.А., Бельтюков Н.Л., Ударцев А.А. Исследование деформирования подземных горных выработок в условиях Гремячинского месторождения калийных солей // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2020. – № 7. – с. 113–124.

ФОРМИРОВАНИЕ АНИЗОТРОПНЫХ СВОЙСТВ В ЭЛАСТОМЕРНЫХ НАНОКОМПОЗИТАХ

Мохирева К.А.¹, Свистков А.Л.¹, Шадрин В.В.^{1,2}

¹Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

²Пермский государственный университет, Пермь
lyadovaka@icmm.ru, svistkov@icmm.ru, shadrin@icmm.ru

Известно, что механические свойства эластомерных композитов вдоль разных направлений нагружения зависят от технологии их производства (начальная анизотропия) и от истории нагружения (наведенная анизотропия). На данный момент активно ведутся исследования по изучению наведенной анизотропии, и мало говорится о начальной анизотропии в виду того, что данный эффект является нежелательным и не учитывается (за редким исключением) в математических моделях [1, 2]. Основной причиной начальной анизотропии является ориентирование наполнителя в эластомерах в результате каландрирования или вальцевания – процессов, когда происходит размешивание компонент в матрице. Также очевидно, что появление начальной анизотропии в композите должно зависеть от геометрии наполнителя, хотя может проявиться и в случае наполнения частицами сферической формы [1, 2].

В ходе работ было исследовано поведение полимерных композитов в зависимости от типа частиц наполнителя (зернистые – технический углерод, наноалмазы; волокнистые – одностенные и многостенные углеродные нанотрубки). Кроме того, варьировалась доля наполнения, а также изучались системы с комбинациями из нескольких наполнителей. Смешивание и последующая вулканизация во всех случаях проходила по единой технологии.

Согласно полученным данным использованная при производстве технология обеспечивает однородность механических свойств для всех композитов, наполненных зернистыми частицами. Но в случаях наполнения эластомера нанотрубками получились интересные результаты. Отметим, что еще до введения наполнителя в матрицу нанотрубки сгруппировались между собой и уже не являются отдельно взятыми частицами, а представляют собой спутанные клубки [3]. У композитов с одностенными нанотрубками клубки частиц удалось разбить при изготовлении и ориентировать нанотрубки в матрице. А с добавлением в композит еще и зернистых частиц технического углерода разница в характере поведения у образцов, взятых вдоль оси ориентирования и оси перпендикулярной к ней, проявилась ярче. При рассмотрении композитов с многослойными нанотрубками начальной анизотропии не наблюдалось, а имеющиеся незначительные различия в поведении лежат в рамках погрешности эксперимента. Следовательно, необходимо брать во внимание и другие факторы, которые могут привести к формированию анизотропии материала; в нашем случае этим фактором оказалась гибкость (особенность строения) нанотрубок. И поэтому, работая с полимерными композитами, особенно при изучении наведенной анизотропии, прежде всего, нужно исследовать материал на наличие возможной начальной анизотропии.

Работа выполнена в рамках госбюджетной темы (рег. номер АААА-А20-120022590044-7) и при финансовой поддержке РФФИ (грант №19-08-00725).

Литература

- [1] Diani J., Brieu M., Vacherand J. M., Rezgui A. Directional model isotropic and anisotropic hyperelastic rubber-like materials// Mechanics of Materials. – 2004. – V.36, N.4. – P. 313–321.
- [2] Marckmann G., Chagnon G., Le Saux M., Charrier P. Experimental investigation and theoretical modelling of induced anisotropy during stress-softening of rubber// International Journal of Solids and Structures. – 2016. – V. 97-98. – P. 554–565.
- [3] Bokobza L. Multiwall carbon nanotube elastomeric composites: A review// Polymer. – 2007. – V. 48. – P. 4907–4920.

ВЛИЯНИЕ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ДВОЙНОЙ ДИФФУЗИИ НА ПРОЦЕСС СМЕШЕНИЯ ЖИДКОСТЕЙ В ПРОТОЧНОМ КАНАЛЕ

Мошева Е.А., Мизёв А.И., Шмыров А.В.

*Институт механики сплошных сред ПФИЦ УрО РАН, Пермь
mosheva@icmm.ru*

Работа посвящена изучению процесса смешения двух жидкостей в проточном канале Y-типа в условиях развития неустойчивости двойной диффузии [1]. Исследование выполнено в тонком горизонтальном канале (Рис. 1) длиной $L = 7.0$ см, высотой $d = 0.25$ см и толщиной $h = 0.02$ см. Визуализация течения выполнена с помощью сдвигового интерферометра. В качестве рабочих жидкостей использованы водные растворы неорганических солей, которые обладают разными скоростями диффузии, что обеспечивает формирование неустойчивости. Эксперименты выполнены для различных скоростей течения v , отношений коэффициентов диффузии δ и перепадов плотностей $\Delta\rho$.

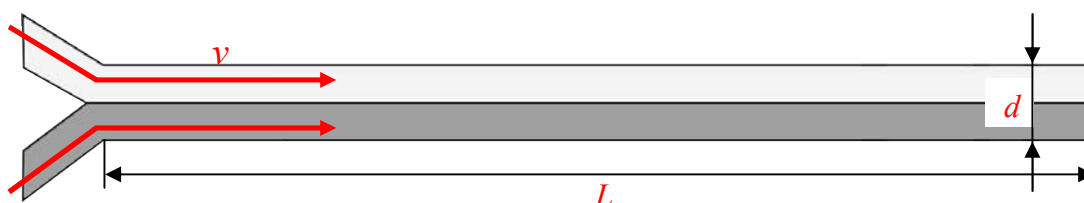


Рис. 1. Схематическое изображение проточного Y-канала. Стрелками указано направление движения потоков.

В закрытой и неподвижной системе (вертикальная двухслойная система) неустойчивость двойной диффузии представляет собой пальчиковую структуру, симметрично распространяющуюся вверх и вниз от начальной границы контакта слоев. В канале проточного типа на фоне непрерывного течения пальчиковая структура вытягивается вдоль канала и приобретает более сложную форму. Интерферограмма, визуализирующая структуру течения представлена на рисунке 2.



Рис. 2. Интерферограмма, демонстрирующая распределение вещества вдоль канала при $v = 0.35$ мм/с, $\delta = 1.25$, $\Delta\rho = 0.015$ г/см³.

Формирование конвективной структуры интенсифицирует процесс смешения изначально разделенных потоков. В работе исследуется влияние управляющих параметров (v , δ , $\Delta\rho$) на длину смешения. Показано, что при определенных условиях длина смешения может быть уменьшена на порядок по сравнению с чисто диффузионным перемешиванием, что указывает на эффективность использования механизма двойной диффузии в качестве инструмента перемешивания жидкостей в канале проточного типа.

Исследование выполнено при финансовой поддержке стипендии президента РФ для аспирантов и молодых ученых (СП-2408.2021.1)

Литература

[1] Turner J. S. Buoyancy effects in fluids. Cambridge – UK: Cambridge university press, 1979. – 412 p.

ОСОБЕННОСТИ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ УСТАЛОСТНОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

Мубассарова В.А.¹, Вшивков А.Н.¹, Изюмова А.Ю.¹, Пантелеев И.А.¹, Плехов О.А.¹

¹ «Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук» – филиал Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук («ИМСС УрО РАН»)
mubassarova.v@icmm.ru, vshivkov.a@icmm.ru, fedorova@icmm.ru, pia@icmm.ru, poa@icmm.ru

Использование в областях ядерной энергетики и аэрокосмической промышленности новых перспективных конструкционных материалов предполагает разработку эффективных методик расчета и прогнозирования их прочности и долговечности. Это подразумевает всестороннее исследование физики и механики процессов усталостного разрушения. Одним из направлений исследований является изучение процессов, происходящих на микроскопических масштабах в вершине распространяющейся трещины. Для описания локальных быстропротекающих процессов в вершине трещины широко используются методы инфракрасной термографии и акустическая эмиссия (АЭ), которые в совокупности позволяют оценить эволюцию диссипированной и накопленной энергии в материале в процессе испытаний.

В данной работе представлены результаты испытаний титановых сплавов (ПТ-3В, ВТ1-0, ОТ4-0) с концентратором напряжений, проведенных в режиме циклического нагружения на электромеханической испытательной машине Instron8802 с коэффициентом асимметрии цикла $R=0.1$. Измерение теплового потока в области вершины трещины проводилось при помощи оригинального датчика, работающего на основе эффекта Зеебека. Для непрерывной регистрации акустической эмиссии (АЭ) использовался аппаратный комплекс Amsy-6 (Vallen, Германия), укомплектованный двумя широкополосными преобразователями M-31 (FujiSera, Япония) с плоской амплитудно-частотной характеристикой в интервале 250–850 кГц и предусилителями АЕР4Н (Vallen, Германия) с коэффициентом усиления 34 дБ. Датчики крепились на поверхности образца при помощи цианоакрилатного клея для улучшения акустического контакта с образцом. Регистрация акустической эмиссии осуществлялась в непрерывном режиме с частотой дискретизации 5 МГц и заданным пороговым уровнем 51.3 дБ (для отсекаания возможных шумов различной природы). Выбор набора параметров сигналов АЭ, используемых в кластерном анализе, осуществлялся с учетом полученных результатов оценки вклада каждого из параметров сигналов (амплитуда, время нарастания сигнала, количество превышений порога, нормированного на амплитуду, длительность, энергия, частота максимума спектра и медианная частота) в общую дисперсию данных при помощи метода главных компонент. Кластерный анализ импульсов АЭ проводился методом к-средних, качество кластеризации оценивалось при помощи коэффициента силуэта. Проведенные исследования АЭ показали, что для всех испытанных материалов (ПТ3-В, ВТ1-0 и ОТ4-0) выявлены две обособленные группы импульсов АЭ (кластеры). Первый кластер включает сигналы АЭ, частота максимума спектра которых не превышает 500 кГц, а второй – расположенные в более высокочастотной области сигналы АЭ. Обнаружено, что сигналы АЭ, принадлежащие более высокочастотному кластеру, генерируются преимущественно на заключительной стадии деформирования, характеризующейся интенсивным ростом диссипации тепла в материале. Показано, что для титановых сплавов зависимости суммарного счета сигналов АЭ и кумулятивной энергии АЭ каждого кластера от диссипации тепла имеют нелинейный характер.

МНОЖЕСТВЕННЫЕ МЕТАСТАБИЛЬНЫЕ СОСТОЯНИЯ, ИНДУЦИРОВАННЫЕ ДЕФЕКТАМИ, И МЕХАНИЗМЫ ПЕРЕНОСА ИМПУЛЬСА В КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕДАХ

Наймарк О.Б.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

naimark@icmm.ru

Представлены экспериментальные исследования аномальных механизмов переноса импульса в конденсированных средах, обнаруживающих множественные метастабильные состояния, индуцированные дефектами (defect induced gaped momentum states). Показана связь метастабильных состояний, специального типа критических явлений в средах с дефектами - структурно-скейлинговыми переходами с аномалиями вязкости в твердых телах и жидкостях при интенсивных (динамических и ударно-волновых) воздействиях. Возможность реализации данных механизмов, в том числе в процессах турбулентности, была обоснована в [1,2,3] Установленные закономерности критичности в поведении конденсированных сред с мезоскопическими дефектами позволили исследовать термодинамику и кинетику распада множественных переходных «жидкость-твердое тело» метастабильных состояний, предложить объяснение аномальных механизмов переноса импульса в системах с «сильным взаимодействием». Аномальные механизмы переноса импульса связаны с подчинением динамики конденсированных сред установленным типам коллективных мод в ансамблях дефектов (бризеров, автосолитонов, диссипативных структур обострения), имеющих природу автомодельных решений. Подчинение динамики коллективным модам сопровождается резким увеличением эффективных времен релаксации и аномалиями поглощения. Теоретические результаты подтверждены экспериментальными данными по наблюдению автомодельных (квази-пластических) фронтов в жидкостях и достижением асимптотики вязкости при инициированию волн разрушения при ударно-волновом нагружении плавленого кварца [4,5].

Литература

- [1] Naimark O.B., Defect-Induced Instabilities in Condensed Media // *JETP Lett.*, 1998, vol. 67, no. 9, pp. 751–757.
- [2] Naimark, O.B., Nonequilibrium Structure Transitions as a Mechanism of Turbulence // *Pisma Zh. Tekh. Fiz.*, 1997, vol. 23, no. 13, pp. 81–87.
- [3] 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 and P. Mariano, Birkhäuser, Boston.-2004.-P. 75-114.
- [4] Naimark, O.B., Collective Properties of Defect Ensembles and Some Nonlinear Problems of Plasticity, Fracture and Turbulence // *Phys. Mesomech.*, 2003, vol. 6, no. 4, pp. 39–63.
- [5] Naimark, O.B., Structural-Scale Transitions in Solids with Defects and Symmetry Aspects of Field Theory//*Phys. Mesomech.*, 2010, vol. 13pp., no. 5–6, pp. 306–317.

АНАЛИЗ РЕЛЬЕФА КЛЕТОК MCF-7 ПРИ АПОПТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЯХ НА ОСНОВЕ ФАЗОВО-КОНТРАСТНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОЙ МИКРОСКОПИИ

Игнатова А.М.¹, Никитюк А.С.¹, Баяндин Ю.В.¹, Гришко В.В.², Наймарк О.Б.¹

¹Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

²Институт технической химии УрО РАН, Пермь

iampstu@gmail.com, naimark@icmm.ru

Индикация состояния клетки по морфометрическим параметрам и состоянию рельефа поверхности, в частности регистрация апоптических изменений является перспективным методом для выявления механизма развития патологических процессов и для оценки терапевтического действия средств инициирующих апоптоз патологических (раковых) клеток.

Цель настоящей работы – анализ рельефа опухолевых клеток при апоптических изменениях на основе фазово-контрастных (фазовых) изображений клеток рака молочной железы линии MCF-7 методом лазерной интерференционной микроскопии (ЛИМ). В исследовании рассматривалось нативное состояние клеток и состояние апоптоза индуцированного гидрохлоридом доксорубина (Tocris Bioscience, США). Полученные препараты клеток исследовали при помощи лазерного интерференционного микроскопа МИМ-340 (Швабе, Россия). Анализ поверхности клеток основывался на интерпретации данных об оптической толщине клеток и их морфологии в совокупности через построение изолиний.

На рис. 1 представлена диаграмма фазового состояния всех клеток MCF-7, рассмотренных в эксперименте, полученная на основе анализа изолинейных изображений.

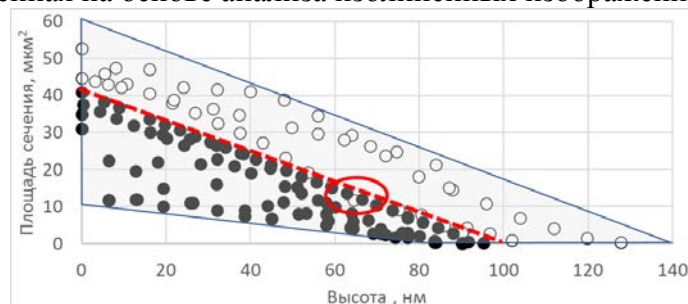


Рис. 1. Диаграмма фазового состояния клеток MCF-7: белые точки – нативное состояние, черные точки – состояние апоптоза

Фазовая диаграмма состояния поверхности указывает на то, что площадь сечений апоптозных клеток значительно меньше, чем площадь сечения нативных клеток на тех же уровнях высоты. Характеристика клеток в рамках предложенной фазовой диаграммы согласуются с морфологическими признаками процесса апоптоза клеток, которые регистрируются с помощью классических методов микроскопии, и в предшествующих работах авторов [1]. Предложенная фазовая диаграмма позволяет по морфологическим особенностям рельефа отличать нативные клетки от апоптически измененных, что является перспективным для оценки клеточного поведения, его прогнозирования, а также для оценки эффекта действия препаратов.

Литература

[1] Баяндин Ю.В., Никитюк А.С., Воронина А.О., Белоглазова Ю.А., Гагарских О.Н., Гришко В.В., Наймарк О.Б. Анализ морфометрических и фрактальных свойств фазово-контрастных изображений нативных и апоптотически измененных клеток MCF-7//Российский журнал биомеханики. 2020. Т. 24, № 3: 312–322.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОБЪЕМНОЙ ДОЛИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ НА ЭКВИВАЛЕНТНЫЕ СВОЙСТВА ПОРИСТЫХ ПЬЕЗОКОМПОЗИТОВ С МЕТАЛЛИЗИРОВАННЫМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ ПОР

Наседкин А.В.¹, Нассар М.Э.^{1,2*}

¹ Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

² Университет Менуфия, Эль-Менуфия, Египет

avnasedkin@sfedu.ru, * mohammed.alsayed75@el-eng.menofia.edu.eg

В работе численно по методу конечных элементов исследуется пористый пьезоэлектрический композит с металлическими слоями на поверхностях пор, разработанный ранее [1]. Эти металлические слои были добавлены на этапе спекания композита для улучшения его электромеханических свойств. В качестве частных случаев рассматривались также обычные пористые пьезокомпози́ты, содержащие только вакуумные поры и пьезокомпози́ты с металлическими включениями. Для всех типов исследуемых компози́тов были построены конечно-элементные модели и определены их эффективные свойства с использованием теории эффективных модулей в соответствии с принципом Хилла [2]. Для того, чтобы наиболее отчетливо продемонстрировать эффекты металлизации и пористости, был рассмотрен простой кубический объем [3], состоящий из пьезокерамической матрицы со сферической порой в центре и с интерфейсным металлическим слоем на границе поры.

Проведенные вычислительные эксперименты позволили сделать следующие выводы. Поперечные эффективные пьезомодули $|e_{31}^{\text{eff}}|$, пьезомодули $|d_{ij}^{\text{eff}}|$ и коэффициенты трансдукции TC_{ij}^{eff} ($TC_{ij} = d_{ij}^2 / \varepsilon_{ii}^T$) уменьшаются с увеличением доли металла на границе поры. Эффективные пьезомодули e_{33}^{eff} и e_{15}^{eff} , наоборот, увеличиваются с ростом доли металлической фракции. Естественно, что увеличение доли металла повышает также эффективные модули жесткости и диэлектрические проницаемости пьезокомпози́та, причем последние возрастают наиболее существенно. Кроме исследования влияния металлизации, в работе были также установлены зависимости эффективных модулей от пористости. Проведенный анализ в итоге показал, что при подходящих долях металлической фракции и пористости для рассматриваемых пьезокомпози́тов могут быть достигнуты недостижимые для обычных пьезокерамических материалов значения коэффициентов пьезоэлектрической деформации d_{ij}^{eff} , поперечного пьезомодуля e_{31}^{eff} и поперечной трансдукции TC_{31}^{eff} . Следовательно, пьезоэлектрические преобразователи, изготовленные из таких пьезокомпози́тов, по прогнозам, могут достаточно эффективно работать с использованием явления поперечного пьезоэффекта в системах сбора энергии и в пьезоэлектрических двигателях.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ по проекту № 20–31–90102.

Литература

- [1] Rybyanets A.N., Shvetsov I.A., Lugovaya M.A., Petrova E.I., Shvetsova N.A. Nanoparticles transport using polymeric nano- and microgranules: novel approach for advanced material design and medical application // J. Nano-Electron. Phys. – 2018. – V.10. – 02005.
- [2] Наседкин А.В., Наседкина А.А., Нассар М.Э. Гомогенизация пористых пьезокомпози́тов с экстремальными свойствами на границах пор методом эффективных модулей // Известия РАН. МТТ. – 2020. – № 6. – С. 82–92.
- [3] Nasedkin A.V., Nassar M.E. Effective properties of a porous inhomogeneously polarized by direction piezoceramic material with full metalized pore boundaries: finite element analysis // J. Adv. Dielectr. – 2020. – V. 10, No. 5. 2050018.

КОМПЬЮТЕРНЫЙ ДИЗАЙН ПОРИСТЫХ ПЬЕЗОКЕРАМИК РАЗЛИЧНОЙ СЕГНЕТОЖЕСТКОСТИ ПРИ СЛУЧАЙНОЙ СТРУКТУРЕ ПОРИСТОСТИ И НЕОДНОРОДНОСТИ ПОЛЯ ПОЛЯРИЗАЦИИ

Наседкин А.В., Толмачева Я.В.

*Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону
nasedkin@math.sfedu.ru, ymolchanova@sfedu.ru*

В работе рассматриваются проблемы конечно-элементного моделирования пористых пьезокерамических композитов с учетом неоднородности поля поляризации на микроуровне. Предполагается, что композитный материал состоит из двух фаз. Первой фазой считается пьезоэлектрический материал, а второй фазой является совокупность случайно распределенных пор. Для определения эффективных свойств композита в его представительном объеме решался набор краевых задач с линейными граничными условиями для перемещений и электрического потенциала. Как моделирование представительного объема, так и решение задач электроупругости осуществлялось по методу конечных элементов. После решения краевых задач находились средние по объему компоненты полей напряжений и электрической индукции, по которым и определялись эффективные модули композита.

Микроструктурное моделирование включало генерирование представительных объемов со случайным распределением пор и учет неоднородности поля поляризации пьезокерамической фазы вблизи пор. Для учета неоднородной поляризации предварительно решалась задача электростатики, моделирующая процесс поляризации пьезокерамики в неоднородном представительном объеме. По найденному из решения этой задачи полю вектора электрической индукции определялся вектор поляризации. Для каждого отдельного конечного элемента этот вектор определял свою элементную систему координат. Далее при решении задач электроупругости на геометрически той же конечно-элементной сетке модули материала пьезокерамической фазы пересчитывались для каждого конечного элемента. Именно, матрицы материальных модулей вычислялись по законам преобразования тензоров соответствующих рангов при переходе от исходной системы координат к элементным системам координат [1]. Кроме того, учитывалась величина вектора поляризации, по которой дополнительно масштабировались материальные модули [2].

В докладе обсуждаются вопросы влияния размеров конечно-элементных сеток, моделей неоднородности поля поляризации и типов сегнетожесткости пьезокерамики на эффективные модули пористых пьезокомпозитов в зависимости от величины пористости. Анализ показал важность учета неоднородности поля поляризации и однотипность зависимостей эффективных модулей от пористости для пьезокерамик различной сегнетожесткости.

Работа выполнена при поддержке гранта Правительства РФ № 075-15-2019-1928.

Литература

- [1] Наседкин А.В., Шевцова М.С. Моделирование эффективных модулей для различных типов пористых пьезокерамических материалов // Вестник ДГТУ. – 2013. – № 3-4 (72-73). – С. 16-26.
- [2] Gerasimenko T.E., Kurbatova N.V., Nadolin D.K., Nasedkin A.V., Nasedkina A.A., Oganessian P.A., Skaliukh A.S., Soloviev A.N. Homogenization of piezoelectric composites with internal structure and inhomogeneous polarization in ACELAN-COMPOS finite element package / Wave Dynamics, Mechanics and Physics of Microstructured Metamaterials. Advanced Structured Materials. – Vol. 109. – M.A. Sumbatyan (Ed.) Springer, Singapore, 2019. – Ch. 8. – P. 113-131.

БИОМЕХАНИЧЕСКИЕ ГИПОТЕЗЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ УСИЛИЙ МЫШЦ ЗУБОЧЕЛЮСТНОЙ СИСТЕМЫ ЧЕЛОВЕКА ПРИ ГИПЕРТОНУСЕ

Никитин В.Н.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
nikitinvladislav86@gmail.com

Эпидемиологические исследования показали, что примерно 5% населения планеты испытывают достаточно сильную боль в жевательных мышцах [1]. Диагностика и выявление причин болей в жевательных мышцах затруднены многообразием клинических симптомов [1]. Заболевания жевательных мышц связаны с несколькими факторами: изменение состояния мышечного аппарата, окклюзионные нарушения, патология позвоночника (чаще – шейно-грудного отдела), асимметрия плеч, лопаток, укорочение одной ноги и др. [1].

В работе ставится задача о равновесии тела нижней челюсти под действием силы сжатия челюстей, максимальное значение которой в норме составляет 600 Н, усилий жевательных мышц и реакций височно-нижнечелюстных суставов [2, 3]. Задача является статически неопределимой. Записывается целевая функция и выбирается критерий оптимизации. Поставленная задача решалась с помощью пакета программ *Maxima*. Для моделирования гипертонуса жевательных мышц предлагается рассмотреть две гипотезы.

В рамках первой гипотезы при увеличении силы сжатия челюстей от 600 до 1200 Н усилия в жевательных мышцах возрастали, а также возрастали реакции в височно-нижнечелюстных суставах. В рамках второй гипотезы конкретные величины усилий в жевательных мышцах зависят имеют два варианта распределения: 1) при условии, что ни одна из мышц не имеет минимального возможного усилия, превосходящего половины максимального возможного, распределение усилий мышц соответствует случаю, когда величины усилий мышц принадлежат отрезку от 0 до максимального значения соответствующей мышцы; 2) при условии, что хотя бы одна из мышц имеет минимальное возможное усилие, превосходящее половину максимального возможного, распределение усилий мышц зависит от мышц, которые перенапряжены.

Таким образом, предложены две гипотезы (подхода к моделированию) перераспределения усилий жевательных мышц зубочелюстной системы человека при гипертонусе. Данные подходы дают данные о величинах усилий мышц, которые представляется возможным качественно сравнить с результатами электромиографии для подтверждения или опровержения, а самое главное для выбора дальнейшего направления по развитию моделирования процесса изменения усилия мышцы под управлением центральной нервной системы.

Работа выполнена при финансовой поддержке правительства Пермского края (грант на развитие научной школы Пермского края «Компьютерная биомеханика и цифровые технологии в биомедицине»).

Литература

- [1] Орлова О., Сойхер М.И., Сойхер М.Г., Мингазова Л. Гипертонус жевательных мышц и ботулинический токсин типа А (Лантокс) в стоматологической практике // Врач. – 2009. – № 9. – С. 13–17.
- [2] Тверье В.М., Няшин Ю.И., Никитин В.Н. Биомеханическая модель определения усилий мышц и связок в зубочелюстной системе человека // Российский журнал биомеханики. – 2013. – Т. 17, № 2. – С. 8–20.
- [3] Никитин В.Н., Тверье В.М., Няшин Ю.И., Оборин Л.Ф. Реакция височно-нижнечелюстного сустава и усилия жевательных мышц // Российский журнал биомеханики. – 2014. – Т. 18, № 2. – С. 194–207.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ ПРИ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ КОЛЕБАНИЯХ ПО СХЕМЕ 'ТРЕХТОЧЕЧНЫЙ ИЗГИБ'

Никитин И.С.¹, Бурого Н.Г.^{1,2}, Никитин А.Д.¹, Стратула Б.А.¹

¹Институт автоматизации проектирования РАН, Москва

²Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва

i_nikitin@list.ru, buragong@yandex.ru, nikitin_alex@bk.ru, stratula@matway.net

Для определения коэффициентов кинетического уравнения повреждаемости в ранее разработанной мультирежимной модели усталостного разрушения [1] использованы известные критерии многоосного усталостного разрушения: Smith-Watson-Topper (SWT), в котором заложен механизм, связанный с развитием микротрещин нормального отрыва, и Carpinteri-Spagnoli-Vantadori (CSV), в котором заложен механизм, связанный с развитием сдвиговых микротрещин [2].

На этой основе предложена процедура вычисления коэффициентов кинетического уравнения для различных режимов усталостного разрушения от мало- и многоциклового (МЦУ-МНЦУ) до сверхмногоциклового усталости (СВМУ) [2].

Приведены примеры расчета усталостного разрушения образцов при длительном циклическом нагружении по схеме трехточечного изгиба с развитием трещиноподобных зон разрушения в режимах от МЦУ-МНЦУ до СВМУ.

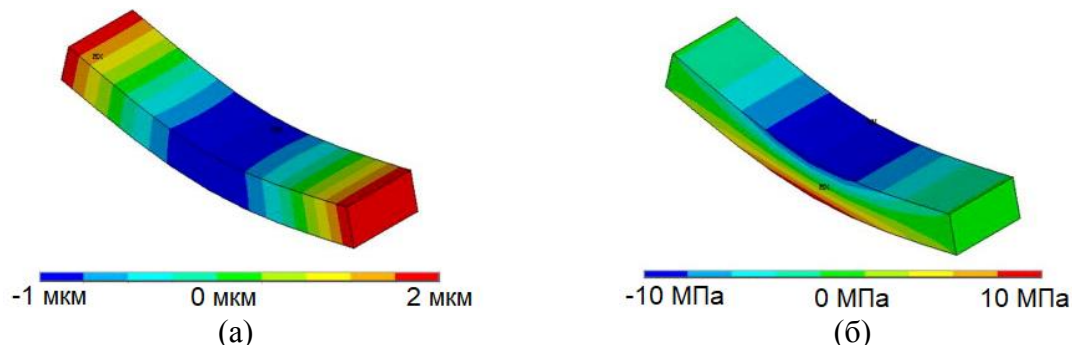


Рис.1. Моделирование полей вертикальных перемещений (а) и напряжений (б) в образцах для СВМУ испытаний на трехточечный изгиб [3].

Проведено сравнение численных и экспериментальных результатов для образцов из титанового сплавов Ti-6Al-4V. Испытания в области СВМУ проведены по методике [3].

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-19-00705).

Литература

- [1] Никитин И.С., Бурого Н.Г., Журавлев А.Б., Никитин А.Д. Мультирежимная модель развития усталостных повреждений // Прикладная математика и механика. – 2020. – №84(5). – С. 687–698.
- [2] Nikitin I.S., Burago N.G., Nikitin A.D., Stratula B.A. Complex model for fatigue damage development // AIP Conference Proceedings. – 2020. – 2312. – 050015.
- [3] Xue H.Q., Tao H., Montembault F., Wang Q.Y., Bathias C. Development of a three-point bending fatigue testing methodology at 20kHz frequency // International Journal of Fatigue – 2007. – Vol. 29, – Iss. 9 – 11. – pp. 2085–2093.

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗОНАНСНЫХ КРУТИЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ КОРСЕТНЫХ ОБРАЗЦОВ В РЕЖИМЕ СВМУ

Никитин И.С., Никитин А.Д., Стратула Б.А.

Институт автоматизации проектирования РАН, Москва

i_nikitin@list.ru, nikitin_alex@bk.ru, stratula@matway.net

Разработан единообразный численный метод, который позволяет проводить сквозной счет развития локализованных зон повреждаемости и трещиноподобных зон усталостного разрушения материала без явного выделения трещин в их классическом понимании, а также оценивать долговечность образцов от появления первых очагов до макроразрушения [1].

Приведены примеры численных расчетов усталостного разрушения образцов при длительном циклическом нагружении для высокочастотных крутильных колебаний в режиме СВМУ [1].

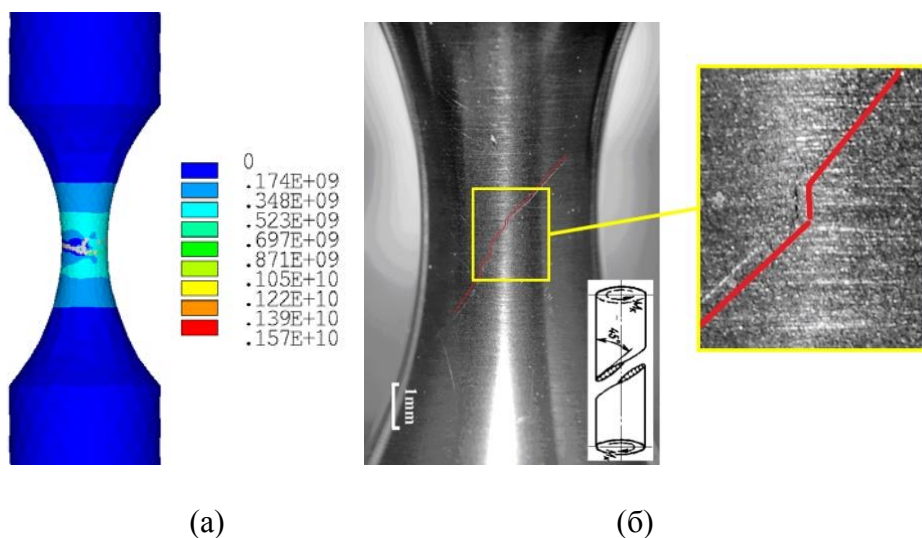


Рис.1. Расчет зоны разрушения в образцах при крутильном нагружении (а) и результат экспериментального исследования (б)

Даны аналитические оценки резонансных частот и начального упругого напряженно-деформированного состояния образцов.

Проведено сравнение результатов расчетов геометрии зон разрушения и времени их развития до внешних границ образцов (макроразрушение) с данными СВМУ испытаний для авиационных титановых сплавов [2].

Исследование выполнено в рамках государственного задания ИАП РАН.

Литература

- [1] Nikitin I.S., Burago N.G, Nikitin A.D., Stratula B.A. Complex model for fatigue damage development // AIP Conference Proceedings – 2020. – 2312. – 050015
- [2] Nikitin A., Palin-Luc T., Shanyavskiy A., Bathias C. Comparison of crack paths in a forged and extruded aeronautical titanium alloy loaded in torsion in the gigacycle fatigue regime //Engineering Fracture Mechanics – 2016. – V.167. – pp. 259–272.

РЕЗОНАНСНЫЕ КОЛЕБАНИЯ И УСТАЛОСТНОЕ РАЗРУШЕНИЕ КРУГЛОЙ ОПЁРТОЙ ПЛАСТИНКИ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ НА ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ УСТАНОВКЕ

Никитин И.С., Никитин А.Д., Стратула Б.А.

Институт автоматизации проектирования РАН, Москва

i_nikitin@list.ru, nikitin_alex@bk.ru, stratula@matway.net

Предложена мультирежимная кинетическая модель повреждаемости при циклическом нагружении для описания развития процесса усталостного разрушения [1].

Разработана процедура вычисления коэффициентов кинетического уравнения для различных режимов усталостного разрушения от мало- и многоциклового (МЦУ-МНЦУ) до сверхмногоциклового усталости (СВМУ), ассоциированная с выбранными критериями усталостного разрушения для однородного напряженного состояния [1,2].

Ранее были аналитически исследованы напряженно-деформированное состояние при резонансных высокочастотных колебаниях, соответствующих первой изгибной моде для круглой опёртой пластинки в упругой постановке [3].



Рис.1. Распределение полей деформации в опёртой пластине при СВМУ испытания на изгиб.

В данной работе на основе численного решения с учетом дополнительного уравнения для циклической повреждаемости были проведены расчеты усталостного разрушения образца в виде круглой опёртой пластинки при длительном циклическом нагружении. Эта схема нагружения является перспективной для исследований СВМУ разрушения образцов при сложном напряженном состоянии.

Исследование выполнено в рамках государственного задания ИАП РАН

Литература

- [1] Nikitin I.S., Burago N.G., Zhuravlev A.B., Nikitin A.D. Multiregime model for fatigue damage development // Mechanics of Solid. – 2020. – Vol. 55. – No. 8. – pp. 298–306
- [2] Nikitin I.S., Burago N.G., Nikitin A.D., Stratula B.A. Complex model for fatigue damage development // AIP Conference Proceedings. – 2020. – 2312. – 050015.
- [3] Nikitin A., Stratula B., Volkov B. Modern and future schemes of very-high cycle fatigue tests // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Vol. 1479. – 012074

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИКИ МОЛЕКУЛЫ ДНК

Никитюк А.С.¹, Баяндин Ю.В.¹, Наймарк О.Б.¹

¹Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
nas@icmm.ru, buv@icmm.ru, naimark@icmm.ru

Одной из основных проблем исследований устойчивых и наследуемых изменений в паттернах экспрессии генов молекулы ДНК является идентификация и описание физических механизмов, которые инициируют и поддерживают процесс фенотипизации клетки. В качестве одного из таких механизмов может выступать образование и взаимодействие открытых состояний в структуре цепи ДНК [1]. В работе предложена статистико-термодинамическая модель молекулы ДНК, позволяющая описать её термодинамические и кинетические свойства с учетом коллективного поведения ансамбля открытых комплексов. Вводятся понятие микроскопического открытого комплекса в цепи ДНК и ассоциированный с ним параметр – вектор смещения азотистых оснований молекулы ДНК, обусловленный разрывом водородных связей. Путем осреднения векторов смещений оснований по ансамблю состояний открытых состояний определяется термодинамическая переменная, характеризующая ансамбль открытых состояний. Согласно статистической модели ДНК в приближении самосогласованного поля выводится структурный параметр термализации неравновесной системы. Данный параметр характеризует «эффективную температуру» рассматриваемой неравновесной системы и отражает статистическую автомодельность в поведении ансамбля открытых состояний. Устанавливаются закономерности «критичности» для различных диапазонов структурного параметра и предлагаются феноменологические представления неравновесной свободной энергии в рамках подхода Гинзбурга-Ландау. Выполнено численное моделирование кинетики молекулы ДНК для различных диапазонов структурного параметра, позволившее установить типы автомодельных решений и соответствующие им коллективные моды открытых комплексов. Показано, что последние имеют природу конечно-амплитудных флуктуаций в виде мод бризерного и автосолиitonного типа, диссипативных структур обострения.

Литература

[1] Наймарк, О.Б. Структурно-скейлинговые переходы и локализованные моды дисторсии в двойной спирали ДНК / Наймарк О.Б. // Физическая мезомеханика. – 2006. – Т. 9. – № 4. – С. 15-29.

ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРНЫХ И ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НАНОСТЕРЖНЕЙ ОКСИДА ЦИНКА, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ КАРБОТЕРМИЧЕСКОГО СИНТЕЗА ПРИ РАЗНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ.

Николаев А. Л.^{1*}, Голушко И. Ю.¹, Митрин Б. И.¹, Васильев А. С.¹

¹Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону
andreynicolaev@eurosites.ru, * vaniagolushko@yandex.ru, boris.mitrin@gmail.com,
andre.vasiliev@gmail.com

Наностержни оксида цинка часто используются в качестве активных элементов газовых сенсоров, фотоприемников, ультрафиолетовых диодов, нанолазеров, солнечных элементов и других нанoeлектронных устройств. В отличие от фоточувствительности, газовая чувствительность наностержней ZnO увеличивается с увеличением концентрации кислородных вакансий на поверхности стержня. Таким образом, получение наностержней ZnO с максимальной и минимальной концентрацией кислородных вакансий является важной задачей. Количество кислородных вакансий можно контролировать, изменяя параметры карботермического синтеза и используя тонкопленочный подслои.

Спектр фотолюминесценции чистого оксида цинка с идеальной кристаллической структурой представляет собой один узкий пик на длине волны 375 нм. Но в спектрах реальных образцов часто появляется так называемая «зеленая люминесценция». Природа зеленого свечения остается спорной на протяжении десятилетий. В ранних исследованиях это объяснялось примесями меди, но позже были представлены убедительные доказательства в пользу точечных дефектов, таких как изолированные кислородные вакансии (~ 510 нм) или комплексы кислородных вакансий (~ 525 нм), которые вносят основной вклад в газочувствительные свойства наностержней ZnO.

Основная цель данной работы - исследование спектров люминесценции и морфологии наностержней оксида цинка, полученных карботермическим синтезом при различных температурах (900-1100 °C) с тонкопленочным подслоем ZnO и без него на Si (001) подложках.

Показано, что рост интенсивности зеленой люминесценции прямо пропорционален росту температуры синтеза до 1050 °C на образцах без тонкопленочного подслоя. При температурах выше 1050 °C горизонтальный рост начинает преобладать над вертикальным. Наностержни с максимальной концентрацией кислородных вакансий были синтезированы при 1100 °C с использованием подслоя ZnO. Такие наностержни больше подходят для использования в газовых сенсорах, чем стержни, полученные при других условиях. Наностержни с минимальной концентрацией кислородных вакансий были синтезированы при 925 °C без подслоя ZnO. Такие наностержни больше подходят для использования в УФ-фотоприемниках и фотодиодах. Полученные результаты позволили сделать вывод, что повышение температуры синтеза влечет за собой увеличение количества кислородных вакансий в наностержнях оксида цинка, а тонкопленочный подслои помогает получить более кристаллически совершенные структуры при высоких температурах синтеза и увеличить максимально возможную температуру синтеза наностержней ZnO.

Благодарности.

Николаев А. Л. благодарит за финансовую поддержку РФФИ (грант № 20-07- 00637-а). Митрин Б. И. благодарит за финансовую поддержку РФФИ (грант № 19-07- 01259-а). Остальные члены коллектива благодарят за финансовую поддержку РФФИ (грант № 20-58-53045-Gfen_a).

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В МЕТАЛЛИЧЕСКОМ РАСПЛАВЕ И ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПЛЁНКЕ ПРИ ИНДУКЦИОННОЙ ПЛАВКЕ

Никулин И.Л.¹, Демин.^{1,2}

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь

²Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь

nil@pstu.ru, demin@psu.ru

Рассматривается покрытый тонкой диэлектрической плёнкой металлический расплав в цилиндрическом тигле, помещённом в неоднородное переменное магнитное поле в техническом вакууме. Это поле возбуждает в объёме расплава силы Лоренца и индукционные токи, которые нагревают расплав. Таким образом, конвекция расплава обусловлена двумя механизмами – электромагнитным перемешиванием и тепловой конвекцией. Движение расплава описывается в осесимметричной постановке, в уравнение Навье-Стокса учитываются вклады силы Лоренца и тепловой конвекции в приближении Буссинеска. В уравнении переноса тепловой энергии учитываются джоулевы источники теплоты, которые разогревают металл до 1500 °С. На дне и стенках тигля для расплава ставятся условие полного прилипания для скорости и теплоизоляции для переноса энергии. На поверхности расплава, где присутствует плёнка, имеет место радиационный теплообмен, интенсивность которого определяется в том числе локальной излучательной способностью поверхности, которые у расплава и плёнки различны. Для скорости в покрытой плёнкой области ставится условие полного прилипания, на открытой поверхности задаётся вертикальный градиент скорости, учитывающий вклад в движение термокапиллярного эффекта. Диэлектрическая плёнка принята достаточно тонкой (в экспериментах около 0,5 мкм), чтобы считать температуру и механические напряжения по толщине плёнки одинаковыми, при этом она уже может рассматриваться как сплошная среда, для которой справедлив закон Гука. Единственным механизмом создания механических напряжений в плёнке и её деформации являются вязкие силы, действующие со стороны движущегося под плёнкой расплава. Таким образом, уравнение состояния плёнки представляет собой закон Гука, записанный в терминах смещения плёнки от положения равновесия с учётом объёмной силы в плёнке, пропорциональной вязким напряжениям в расплаве. Для решения уравнения смещений используются следующие граничные условия: на оси симметрии и стенке тигля смещение равно нулю, если край плёнки не касается стенки, то справедливо условие баланса упругих и вязких напряжений.

Численно исследованы стационарные течения, возникающие в расплаве под плёнкой во время индукционной плавки, в интервале параметра диффузии магнитного поля $D_H \in [1...1000]$, а также влияние течений на упругие напряжения и деформации, возникающие при этом движении в плёнке. Рассмотрены различные варианты покрытия плёнкой поверхности расплава: полное покрытие, плёнка – диск в центре или кольцо, касающееся тигля. Выявлены зависимости смещений и деформаций от параметра D_H , и числа Гартмана характеризующих частоту и напряжённость магнитного поля соответственно. Показаны наиболее устойчивые конфигурации плёнки, вредные с технологической точки зрения: так технологические режимы с $D_H \in [20...50]$, где постепенно происходит перестройка двухтороидального течения к четырёхтороидальному, наиболее склонны к образованию плёнок, чему способствует область на поверхности, в которой направленные к центру течения поддерживают плёнку.

Приведены результаты верификации модели.

ВЛИЯНИЕ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ВИБРАЦИЙ НА КОНВЕКТИВНЫЕ РЕЖИМЫ В КВАДРАТНОЙ ПОЛОСТИ

Никулина С.А.¹, Перминов А.В.¹, Любимова Т.П.²

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь

²Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

nikulina.svetlana@mail.ru, perminov1973@mail.ru

В работе рассмотрена полость квадратного сечения с твердыми границами, заполненная жидкостью, в поле тяжести. Задача решалась в плоской постановке. Начало координат располагалось в центре нижней границы полости, ось y направлена вертикально вверх. Вдоль горизонтальной оси z полость считалась бесконечной. На вертикальных границах полости $x = \pm h$ заданы постоянные разные температуры $\mp\theta$. На горизонтальных границах полости температура меняется по линейному закону $T = \theta x/h$. Полость совершает линейно-поляризованные высокочастотные вибрации в направлении оси y . Высокочастотные вибрации полости с жидкостью в неоднородном поле температуры вызывают вибрационно-конвективные течения, для описания которых все физические поля удобно разделить на пульсационную и осредненную компоненты. Когда период колебаний много меньше всех гидродинамических и тепловых времен, а амплитуда смещения в некотором смысле мала, на основе метода осреднения можно получить замкнутую систему уравнений для осредненных и пульсационных полей [1].

Интенсивность вибраций определялась безразмерным вибрационным параметром V пропорциональным отношению вибрационного ускорения к ускорению свободного падения и не зависящим от перепада температуры, значения которого варьировались в пределах от 0 до 10. Оценки показывают, что в земных условиях $V \leq 1$. Превышение V значения 1 возможно в случае высоковязких жидкостей, малых размеров полости ($h \leq 1$ см) или очень высоких частот вибраций. В условиях микрогравитации вибрационный параметр может существенно превышать 1 даже при относительно небольших частотах вибраций. В рассмотренном диапазоне значений V вибрации оказывают существенное влияние на структуру и устойчивость течения. Все расчеты проводились для числа Прандтля $Pr = 100$, характерного, например, для высоковязких нефтей и нефтепродуктов. Интенсивность гравитационной конвекции характеризовалась числом Грасгофа Gr . На плоскости управляющих параметров $Gr - V$ была построена карта конвективных режимов и определена граница устойчивости стационарной осредненной конвекции.

При $V \leq 0.1$ в полости реализуется одновихревое стационарное течение, а для $V > 0.1$ на плоскости $Gr - V$ между областями существования стационарного одновихревого осредненного течения и осредненного колебательного течения появляется область, в которой реализуется трехвихревое вибрационно-конвективное стационарное осредненное течение. В зависимости от значения вибрационного параметра возможны два механизма потери устойчивости стационарным осредненным течением: гидродинамический и тепловой. Для $V \leq 0.0075$ неустойчивость стационарного осредненного конвективного течения определяется гидродинамическими возмущениями. При $0.0075 < V$ за неустойчивость течения отвечают тепловые волны, распространяющиеся вдоль вертикальных пограничных слоев. Расчеты показали, что в полости возможна реализация тепловых возмущений двух типов: симметричных относительно поворота полости на 180° и несимметричных.

Литература

[1] Gershuni G. Z., Lyubimov D. V. Thermal Vibrational Convection. N.Y. et al.: Wiley, 1998. – 358 p.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НАКОПЛЕНИЯ УСТАЛОСТНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ В ЛАМИНИРОВАННЫХ УГЛЕПЛАСТИКАХ

Нихамкин М.Ш., Соломонов Д.Г., Балакирев А.А., Воронков А.А., Головкин А.Ю.

*Пермский государственный технический университет, Пермь
solomonov1198@yandex.ru*

Полимерные композиционные материалы (ПКМ), в частности, ламинированные углепластики, широко используются в аэрокосмической технике, самолетостроении, двигателестроении. Для их применения в ответственных деталях, работающих под действием переменных нагрузок, необходимо обеспечить сопротивление разрушению от многоциклового усталости. Многочисленные исследования усталостного разрушения показали, что постепенное накопление усталостных повреждений проявляется в изменении собственных частот колебаний и жесткости конструкций из ПКМ [1]. Цель настоящей работы состоит в получении экспериментальных данных об изменении характеристик упругости слоистых углепластиков по мере накопления усталостных повреждений.

Объектом экспериментального исследования являются стандартные плоские образцы из слоистого углепластика, рекомендованные стандартами ГОСТ Р 57143-2016 и ASTM D 3479, с размерами 250*25*1,2 мм с разными схемами укладки слоев. Образцы подвергали усталостным испытаниям при циклическом растяжении с постоянной амплитудой и средним напряжением цикла на резонансной испытательной машине Testronic 50. В процессе испытаний регистрировали параметры акустической эмиссии с помощью системы AMSY-6 и поле температур с помощью прецизионной инфракрасной камеры NEC TH9100 WR. На различных этапах нагружения несколько раз проводили неразрушающий контроль и определяли спектр собственных частот и собственные формы колебаний образцов. Неразрушающий контроль проводили ультразвуковым методом. Собственные частоты и формы колебаний образцов определяли экспериментально бесконтактным методом лазерной виброметрии с помощью трехкомпонентного сканирующего лазерного виброметра PSV-400-3D.

Получены значения собственных частот образцов в диапазоне до 3000Гц при различных значениях числа циклов нагружения N . Эти значения использовались для решения обратной задачи идентификации параметров упругости монослоя ламината: модулей Юнга E_1 и E_2 , модуля сдвига G_{12} и коэффициента Пуассона [2]. В результате получены зависимости указанных параметров от относительной усталостной наработки N/N_f (N_f - число циклов до разрушения). Эти зависимости в сочетании с результатами неразрушающего контроля и акустической эмиссии могут быть использованы для описания процесса накопления усталостных повреждений и для последующей разработки методов прогнозирования циклического ресурса изделий из ПКМ.

Литература

- [1] Kulkarni P.V., Sawant P.J., Kulkarni V.V. Fatigue life prediction and modal analysis of carbon fiber reinforced composites. *Advances in Materials and Processing Technologies*. V.4. (2018). Issue 4. Pp. 651-659.
- [2] Нихамкин М.Ш., Соломонов Д.Г., Зильбершмидт В.В. Идентификация характеристик упругости композита по экспериментальным данным о модальных характеристиках образцов // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика*. – 2019. – № 1. – С. 108-120.

ОРИЕНТАЦИОННЫЕ ПЕРЕХОДЫ МЯГКОГО ФЕРРОХОЛЕСТЕРИКА ВО ВРАЩАЮЩЕМСЯ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Новиков А.А., Макаров Д.В.

Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь
novikov21s@yandex.ru, dmakarov@psu.ru

При помещении во вращающееся магнитное поле жидкого кристалла он начинает закручиваться вслед за полем [1]. В зависимости от скорости вращения выделяют два режима поведения ориентационной структуры жидкого кристалла: синхронный и асинхронный. В синхронном режиме директор вращается с угловой скоростью поля, отставая от него на некоторый постоянный угол, а в асинхронном режиме вращение за магнитным полем происходит с фазовой задержкой, которая сложным образом зависит от времени. Поскольку жидкие кристаллы являются диамагнитными средами, то для увеличения магнитной восприимчивости их можно функционализировать при помощи магнитных частиц [2], сохраняя при этом основные свойства, характерные для жидкокристаллической фазы. Подобные магнитные суспензии на основе холестерических жидких кристаллов получили название феррохолестериков (ФХ). Динамические свойства ориентационной структуры феррохолестерика во вращающемся магнитном поле при жестком сцеплении между жидкокристаллической матрицей и магнитной примесью были теоретически изучены ранее в [3].

В данной работе в рамках континуальной теории изучено влияние конечного (мягкого) планарного сцепления между магнитными частицами и жидкокристаллической матрицей в феррохолестерике при ориентационном переходе в раскрученное состояние, вызванное вращающимся магнитным полем. Проанализирован стационарный режим вращения спиральной ориентационной структуры феррохолестерика в магнитном поле. Показано, что вращающееся магнитное поле может раскручивать спиральную феррохолестерическую структуру в режиме слабого сцепления и индуцировать переход феррохолестерик-ферронематик. Получена система интегрально-дифференциальных уравнений, определяющая ориентацию жидкокристаллической и магнитной подсистемы, а также критические параметры в точке перехода феррохолестерик-ферронематик в случае мягкого сцепления. Построена ориентационная фазовая диаграмма перехода феррохолестерик-ферронематик для различных значений напряженности и угловой скорости вращения магнитного поля, величины энергии сцепления и параметра влияния магнитного поля. Показано, что рост энергии сцепления понижает магнитное поле ориентационного перехода феррохолестерик-ферронематик.

Литература

- [1] Stewart I.W. The Static and Dynamic Continuum Theory of Liquid Crystals. Taylor & Francis, London and New York, 2004. – 360 P.
- [2] Brochard F., de Gennes P. G. Theory of magnetic suspensions in liquid crystals // Journal de Physique (France). – 1970. – V. 31. – P. 691–708.
- [3] Makarov D. V., Mandrykin S. D., Novikov A. A., Zakhlevnykh A. N. Effect of rotating magnetic field on orientational dynamics of ferrocholesteric liquid crystals // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2018. – V. 468. – P. 287–293.

ДОЛГОВЕЧНОСТЬ СПЛАВОВ АМГ6 И ВТ6 ПРИ КОМБИНИРОВАННОМ УДАРНО-ВОЛНОВОМ И ПОСЛЕДУЮЩЕМ СВЕРХМНОГОЦИКЛОВОМ НАГРУЖЕНИИ

Оборин В.А.¹, Баяндин Ю.В.¹, Савиных А.С.², Гаркушин Г.В.², Разоренов С.В.²,

Наймарк О.Б.¹

¹Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

²Институт проблем химической физики РАН, Черноголовка

oborin@icmm.ru

В работе разработана экспериментальная методология испытаний по сверхмногоцикловому нагружению (количество циклов 10^8 - 10^9) образцов, изготовленных из массивных плоских мишеней из алюминиевого (АМг6) и титанового (ВТ6) сплавов подвергнутых плоско-волновому нагружению (метод взрывного генератора). Режимы ударно-волнового нагружения обеспечивали создание контролируемой поврежденности для имитации структурных изменений в материалах лопаток вентиляторов в условиях высокоскоростного соударения с твердыми частицами. Сверхмногоцикловое нагружение осуществлялось на ультразвуковой испытательной машине Shimadzu USF-2000, позволяющей испытывать образцы на базе 10^8 - 10^{10} циклов с амплитудой до нескольких десятков микрометров и частотой испытаний 20 кГц при обильном воздушном охлаждении сжатым воздухом и солевым туманом (3%NaCl) с последующим изучением фрактографии изломов. Отмечается, что в этой области числа циклов нагружения (10^8 - 10^{10}) существенно возрастает роль внешней среды, морской соляной туман представляет собой один из наиболее агрессивных для летательных аппаратов внешних факторов.

Результаты испытаний показали снижение на 24% предельного напряжения разрушения предварительно нагруженного ударной волной сплава АМг6 с уровня напряжения 140 МПа в исходном (недеформированном) состоянии до уровня напряжения 107 МПа, соответствующего критическому количеству 10^9 циклов при воздушном охлаждении. Показано существенное снижение на 42% предельного напряжения разрушения на базе 10^9 циклов для предварительно нагруженного ударной волной сплава ВТ6 с уровня напряжения 190 МПа в исходном (недеформированном) состоянии до уровня напряжения 110 МПа при воздушном охлаждении.

Установлены количественные корреляции между механическими свойствами и масштабнo-инвариантными (скейлинговыми) характеристиками рельефа поверхностей разрушения, формирующихся в процессах динамического и гигациклового нагружения по данным профилометрии (интерферометр-профилометр New-View 5010 с разрешением от 0,1 нм). Для образцов из сплава АМг6, подвергнутых предварительному ударно-волновому деформированию, установлено уменьшение показателя Хёрста по сравнению с недеформированными образцами. Последнее связывается с интенсивной фрагментацией при формировании дислокационных ансамблей в ходе ударно-волнового нагружения, что затрудняет формирование упорядоченной системы дефектов при последующем усталостном нагружении.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края в рамках научного проекта №19-48-590009.

ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАЗРУШЕНИЯ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ КОМПОЗИЦИЙ TiB_2 -C

Огорельцева Н.В.¹, Федорова Е.Н.^{1,2}, Нагибин Г.Е.¹, Пузанов И.И.³, Завадяк А.В.³

¹ Сибирский федеральный университет, Красноярск

² Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий,
Красноярский филиал, Красноярск

³ Объединенная компания РУСАЛ Инженерно-технологический центр, Красноярск
nogoreltseva-a19@stud.sfu-kras.ru, efedorova@sfu-kras.ru, nagibin1@gmail.com,
Iliya.Puzanov@rusal.com, Andrey.Zavadyak@rusal.com

Эксплуатация в условиях агрессивной среды и высоких температур (950 °С) приводит к нарушению структурной целостности, быстрому химическому и механическому износу конструктивных элементов алюминиевых электролизеров. К таким элементам относятся углеродные катодные блоки, используемые в современных высокоамперных электролизерах с обожженными анодами.

Для защиты катодных блоков используются смачиваемые алюминием покрытия на основе диборида титана (TiB_2), который характеризуется высокими электропроводными свойствами и высокой стойкостью к расплавам электролита и алюминия [1]. Однако, несмотря на требуемый уровень физико-механических свойств и смачиваемость алюминием, при толщине покрытия более 5 мм материал характеризуется слабой адгезией к поверхности катодных блоков и склонностью к трещинообразованию, что приводит к сокращению срока службы и значительно ограничивает промышленное внедрение. Существенным фактором, ограничивающим внедрение покрытий, также является высокая стоимость TiB_2 .

Введение в состав композиции покрытия углеродных наполнителей позволяет решить обозначенные проблемы. Ранее авторами был предложен способ защиты катодных блоков алюминиевых электролизеров, включающий определение участков максимального износа с построением профиля износа, а также предложены составы композиций на основе диборида титана и экологически безопасного связующего для получения защитного покрытия TiB_2 -C [2].

В данной работе продолжены исследования по разработке составов, представлены результаты исследования закономерностей разрушения защитных покрытий на основе композиций из порошка диборида титана и углеродных наполнителей (промышленных углеродных материалов МХНУ и графитового порошка). Показано влияние различного содержания углеродных наполнителей (10-50% масс.) на микроструктуру и физико-механические свойства покрытий, в том числе, на прочность адгезии к материалу катодного блока и стойкость к трещинообразованию.

Литература

[1] M. Sørli, H.A. Øye, Cathodes in Aluminum Electrolysis, Aluminum Verlag, 3rd edition, 2010.–P.662.

[2] N. Ogoreltseva, E. Fedorova, I. Puzanov, A. Zavadyak, G. Nagibin, I. Kirillova, Method of protection of cathode blocks of aluminium electrolysis cells// Procedia Structural Integrity. – 2020. – V.28. – pp. 1340–1346.

ДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СИЛЫ НА ВЫТЯНУТОЕ ВКЛЮЧЕНИЕ В ЭЛЕКТРОПРОВОДНОЙ ЖИДКОСТИ

Озерных В.С., Колесниченко И.В.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

ozernykh.v@icmm.ru

Воздействие на расплавленный металл электромагнитными силами позволяет создать специфические течения в металле, которые, в свою очередь, способны сконцентрировать частицы включений в заданной области, откуда их возможно удалить механическим путем [1, 2]. При этом важно определить форму включений, которая обеспечит наилучшую эффективность воздействия на них электромагнитными силами. Применение такого воздействия возможно в процессе кристаллизации (перенос частично кристаллизованных малых областей металла), а также при отделении примесей из жидких металлов с помощью электромагнитных сил.

Работа посвящена численному исследованию особенностей воздействия электромагнитных сил на включения, находящихся в электропроводной среде. В работе рассматривается ячейка жидкого металла, внутри которой находится включение с иной электропроводностью. К системе подводится электрический ток, накладывается внешнее магнитное поле.

В результате математического моделирования исследованы включения различной формы: сферические [3], цилиндрические, а также эллипсообразные. Наибольший интерес в изучении представляют вытянутые включения. Так, если ориентация главной оси включения совпадает с направлением растекания электрического тока, то наблюдается слабое воздействие электромагнитных сил на включение.

В работе изучены различные способы расположения включений в ячейке, их ориентации в пространстве, исследовано влияние аспектного отношения включения на величину электромагнитной силы. Электромагнитная сила, действующая на включение, оказывается наибольшей в случае, если угол между направлением растекания тока и главной осью цилиндра (включения) составляет 45 градусов. Кроме этого, увеличение диаметра включения приводит к более значительному изменению электромагнитной силы, действующей на него, чем увеличение высоты включения.

Таким образом, в работе построена математическая модель течения электропроводной жидкости вблизи включений различной формы. Изучены различные конфигурации расположения включений. Из предложенных результатов можно сделать вывод о форме включений, которые подвержены наибольшему воздействию электромагнитных сил, а также «предпочтительной» ориентации включений. Полученные результаты позволят в дальнейшем перейти к изучению представительного объема ячейки с набором включений с электропроводностью, отличной от окружающей среды.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 20-48-596015_p_НОЦ_Пермский край.

Литература

- [1] Kolesnichenko, I. Investigation of electromagnetic force action on two-phase electrically conducting media in a flat layer // *Magnetohydrodynamics*, 2013, 49, 217-222.
- [2] Мамыкин А. Д., Лосев Г. Л., Колесниченко И. В. Воздействие электромагнитных сил на двухфазную среду // *Вестник Пермского университета. Физика*. 2018. № 1 (39). С. 46–53. doi: 10.17072/1994-3598-2018-146-53
- [3] Vladimir S. Ozernykh, Gennady L. Losev, Ilya V. Kolesnichenko Electromagnetic separation of impurities in a conductive medium // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 950. Pp. 012008. doi:10.1088/1757-899x/950/1/012008

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ СИЛЫ, ДЕЙСТВУЮЩИЕ НА СРЕДУ С НЕОДНОРОДНОЙ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬЮ

Окательев Р.С., Лосев Г.Л., Озерных В.С., Колесниченко И.В.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
okatev.r@icmm.ru, losev.g@icmm.ru, ozernykh.v@icmm.ru, kiv@icmm.ru

Работа посвящена изучению влияния неоднородностей в электрически проводящей среде на генерируемую в этой среде электромагнитную силу и на электрические параметры системы, которые эту силу создают. Этот эффект лежит в основе разрабатываемой методики бесконтактной регистрации неоднородностей. Также он важен для верификации математической модели, описывающей воздействие электромагнитных сил на среду с неоднородной электропроводностью. Рассматривается конфигурация, состоящая из одной плоской обмотки, которая питается переменным током заданной силы и частоты. В центре обмотки размещается объем с исследуемой электропроводной средой, который представляет собой цилиндр. В данном случае, на объем действует переменное магнитное поле (в случае постоянного тока имеющего дипольную конфигурацию), которое генерирует в объеме вихревой электрический ток. Для случая однородной среды силовые линии тока будут представлять собой концентрические окружности. Взаимодействие тока и внешнего магнитного поля порождает генерацию электромагнитной силы. В данном случае она будет направлена от периферии к центру объема, как в случае линейного пинча; результирующая сила будет нулевой. Если электропроводность среды будет неоднородна, то баланс сил изменится, что приведет к несбалансированной силе, действующей на объем. В работе используются два способа задания неоднородности. В первом способе неоднородности задаются искусственно, посредством внедрения в среду полости. В эксперименте измеряется результирующая сила, действующая на такой объем, и зависимость тока от напряжения в питающей обмотке. Одной из задач является определение наименьшего размера и такого положения неоднородности, при которых уровень сигнала измерительной системы будет существенно превышать уровень шума, а также будет возможно измерить величину электромагнитных сил. Эти данные позволяют выполнить оценку возможности применения измерительной системы для выбранных сред с неоднородной электропроводностью. Другой способ создания неоднородности силы заключается в создании неоднородности магнитного поля путем добавления ферромагнитных С-образных сердечников. Эти сердечники из магнито-мягкого материала надвигаются на обмотку. Магнитное поле тока генерирует в них намагниченность, что существенно искажает поле магнитной индукции, пронизывающей исследуемый объем электропроводной среды. При изменении количества сердечников и степени их надвигания на обмотку, меняется баланс электромагнитной силы. Это измеряется в эксперименте, и определяется путем математического моделирования. Этот способ также исследован для случая среды с неоднородной электропроводностью.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 20-48-596015_p_НОЦ_Пермский край.

Литература

- [1] Kolesnichenko, I. Investigation of electromagnetic force action on two-phase electrically conducting media in a flat layer // Magnetohydrodynamics, 2013, 49, 217-222.
- [2] Мамыкин А. Д., Лосев Г. Л., Колесниченко И. В. Воздействие электромагнитных сил на двухфазную среду // Вестник Пермского университета. Физика. 2018. № 1 (39). С. 46–53. doi: 10.17072/1994-3598-2018-146-53
- [3] Vladimir S. Ozernykh, Gennady L. Losev, Ilya V. Kolesnichenko Electromagnetic separation of impurities in a conductive medium // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 950. Pp. 012008. doi:10.1088/1757-899x/950/1/012008

НЕСТАЦИОНАРНЫЙ КОНТАКТ ЖЕСТКОГО ШТАМПА С МЕМБРАНОЙ ПРИ УЧЕТЕ ВЛИЯНИЯ СИЛ АДГЕЗИОННОГО ПРИТЯЖЕНИЯ

Оконечников А.С.¹, Федотенков Г.В.^{1,2}, Феоктистова Е.С.¹

¹Московский авиационный институт, Москва

²НИИ Механики МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва

oas.mai@mail.ru, greghome@mail.ru, feoktistovaes@mai.ru

В данной работе исследуется второй этап нестационарного воздействия жёсткого штампа на мембрану. В рамках постановки задачи рассматривается момент механического контакта жёсткого штампа и мембраны. Ранее в работах [1], [2], [3] был рассмотрен предыдущий этап взаимодействия мембраны и жёсткого штампа с учетом влияния сил адгезионного притяжения – до момента механического контакта тел.

Для описания сил адгезионного притяжения, возникающего между исследуемыми телами, была выбрана модель Можи. Согласно представлению данной модели, адгезионное притяжение между исследуемыми телами возникает до момента механического контакта – когда зазор между объектами преодолевает некоторое критическое значение $h_{\max}$; в момент механического контакта жёсткого штампа и мембраны, мембрана подвержена деформации не только в зоне контакта со штампом, но и в некоторой области вне зоны контакта, называемой областью адгезионного притяжения.

В рамках данной задачи перемещения границ мембраны рассматривается как свертка функции Грина и поверхностного давления, возникающего вследствие контакта штампа и мембраны, а также влияния адгезии. С целью определения контактных напряжений были составлены и проанализированы интегральные уравнения относительно контактных напряжений. Данные интегральные уравнения возможно были приведены к системе линейных алгебраических уравнений относительно контактных напряжений. На данный момент ведется разработка алгоритмов определения контактных напряжений и их реализация на ЭВМ.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 18-01-00127а, 20-58-04012 Бел_мол_a)

Литература

- [1] A. S. Okonechnikov, D. V. Tarlakovsky, and G. V. Fedotenkov Transient Interaction of Rigid Indenter with Elastic Half-plane with Adhesive Force //ISSN 1995-0802, Lobachevskii Journal of Mathematics, 2019, Vol. 40, No. 4, pp. 489–498. <https://doi.org/10.1134/S1995080219040115>
- [2] Оконечников А.С., Пашков Я.В., Федотенков Г.В. Нестационарное взаимодействие мембраны и штампа под действием адгезионных сил // Материалы XXVI международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова– Вятчи, 16 – 20 марта 2020г., Т.2.– С.101-
- [3] Оконечников А.С., Козел А.Г. Нестационарная контактная задача для штампа и упругой полуплоскости при учете силы адгезионного взаимодействия //XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики. Аннотации докладов, 19-24 августа 2019г. Уфа, – С.253

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛО- И МАССОПЕРЕНОСА В ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ СТВОЛАХ ГЛУБОКИХ РУДНИКОВ В УСЛОВИЯХ РЕВЕРСИРОВАНИЯ ВОЗДУШНОЙ СТРУИ

Ольховский Д.В.¹, Кузьминых Е.Г.¹, Семин М.А.¹, Зайцев А.В.¹

¹Горный институт уральского отделения РАН, Пермь
demexez@gmail.com, kuzminykh.evgeniy@gmail.com, seminma@inbox.ru,
aerolog.artem@gmail.com

На подземных рудниках для обеспечения спуска и подъема грузов, а также проветривания используются стволы, которые представляют из себя вертикальные выработки круглого сечения диаметром 6 – 9 м. Существует два типа стволов: воздухоподающие, по которым воздух подается вниз и вентиляционные, по которым воздух удаляется из рудника. В зимнее время года воздух, подаваемый в рудник по воздухоподающим стволам, должен подогреваться в калориферных установках до температуры не ниже + 2 °С [1].

В случае, если на руднике происходит аварийная ситуация, возможно переключение главных вентиляторных установок в режим реверса, то есть воздух начинает подаваться в рудник по вентиляционным стволам, на которых калориферные установки отсутствуют. В условиях климата г. Норильск в зимний период времени возможны температуры наружного воздуха до –47 °С [2], и при подаче его в ствол это может привести к обмерзанию крепи ствола, замерзанию воды в трубопроводах, выводу из строя оборудования на горизонтах, такого как градирни системы кондиционирования воздуха. Поэтому, для оценки максимально возможного безопасного для оборудования и людей времени реверсирования воздуха была построена модель теплообмена воздуха,двигающегося по стволу.

По мере движения воздуха по стволу происходит его теплообмен с окружающей бетонной крепью, а также нагрев от гидростатического сжатия, которое дает увеличение температуры воздуха на 1 °С при движении его вниз на каждые 130 м глубины. Помимо этого, нагрев на несколько градусов дает главная вентиляторная установка в зависимости от её мощности. По результатам проведенного моделирования температура воздуха ствола ВС-9 на глубине 850 м при температуре наружного воздуха -23 °С, должна составить около – 2 °С.

На следующем этапе работы после проведения моделирования было решено провести экспериментальное исследование, для чего на стволе ВС-9 были проведены замеры температуры воздуха при проведении плановых испытаний реверсивного режима. В результате проведенного исследования было определено, что воздух в реверсивном режиме доходя до глубины 850 м имеет существенно более высокую температуру (12.7 °С), чем предсказывает модель. Таким образом экспериментальные данные существенно противоречат результатам моделирования, что свидетельствует о неких неучтенных при моделировании факторов, сильно влияющих на температуру воздуха. В настоящем докладе представлены некоторые варианты теоретической интерпретации рассогласований модельной температуры воздуха и замеренной.

Литература

- [1] Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых»: утв. приказом Ростехнадзора от 08.12.2020 № 505, 2020. — 302 с.
- [2] СП 131.13330.2018 Строительная климатология. Актуализированная редакция СНиП 23-01-99*: утв. приказом Министерства регионального развития от 28.11.2018 № 275, 2013. — 124 с.

НОВЫЙ ТИП НАГРУЗКИ, В ТОМ ЧИСЛЕ КОНТАКТНОЙ, В ТЕОРИИ ИЗГИБА БАЛОК

Осипенко М.А.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
osipenko.michael@yandex.ru

Как известно, в механике сплошных сред заданная или подлежащая определению (например, контактная) нагрузка описывается функцией плотности [1]. Плотность нагрузки может быть достаточно гладкой функцией точки области [2]. Известно, однако, что в ряде задач теории упругости такого узкого класса функций оказывается недостаточно [3]. Простейшее расширение этого класса состоит в рассмотрении кусочно-гладких функций [4]. Уже здесь возникают некоторые трудности, связанные с определением плотности в точках разрыва [4]. Но во многих, причем весьма “стандартных”, задачах и этого расширения оказывается недостаточно, причем приходится даже отказаться от “обычного” понятия функции и перейти к обобщенным функциям – дельта-функции Дирака и ее производной [1, 5]. В контактных задачах для “тонких” объектов (струн и балок) типичной является ситуация, когда при сколь угодно гладкой заданной внешней нагрузке, контактная нагрузка содержит дельта-функции [6–8]. И наконец, в некоторых уже “нестандартных” задачах встречаются нагрузки, содержащие обобщенные функции, даже не выражающиеся через дельта-функцию и ее производные. Пример такой нагрузки (двойная сила) приведен в [1]. Можно заметить, что если “искусственно” не вводить такую нагрузку как заданную, то при решении не контактной задачи теории упругости она и не появится. В связи с этим, особый интерес представляет обнаружение в контактных задачах для балок нового, ранее не известного типа контактной нагрузки, не выражающейся через дельта-функцию, но появляющейся при сколь угодно гладкой заданной внешней нагрузке [9]. Эта контактная нагрузка получается из сосредоточенного момента отбрасыванием отрицательной части плотности, и условно может быть названа “полумоментом”. Такая нагрузка возникает в конструкции, состоящей из двух балок с различными длинами и различными переменными толщинами. Один конец короткой балки зашпелен; совпадающий с ним конец длинной балки закреплен шарнирно. Второй конец каждой балки свободен. К длинной балке приложена заданная (гладкая) нагрузка. “Полумомент” может возникнуть как часть контактной нагрузки только в точке закрепления балок. Неотрицательность контактной нагрузки, как необходимое условие одностороннего контакта, при этом не нарушается, так как “отрицательная часть полного момента” расположена за пределами балок, не входя в контактную нагрузку.

Литература

- [1] Работнов Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела – М: Наука, 1988. – 712 с.
- [2] Тарг С.М. Краткий курс теоретической механики – М: Высшая школа, 1998. – 416 с.
- [3] Беляев Н.М. Сопротивление материалов – М: Наука, 1976. – 608 с.
- [4] Osipenko M.A., Nyashin Yu.I., Rudakov R.N. A contact problem in the theory of leaf spring bending / Int. J. Solids Struct. 2003. № 40. P. 3129–3136.
- [5] Осипенко М.А., Няшин Ю.И. Об одном подходе к решению некоторых одномерных контактных задач / Известия Саратовского университета, Новая серия, 2011, т. 11, сер. Математика. Механика. Информатика, вып. 1, С. 77–84.
- [6] Феодосьев В.И. Избранные задачи и вопросы по сопротивлению материалов – М: Наука, 1973. – 400 с.
- [7] Осипенко М.А. Контактная задача для двух струн с переменными натяжениями / Вестник ЮУрГУ. Серия Математика. Механика. Физика, 2014, т. 6, № 3, С. 66–71.
- [8] Осипенко М.А. Контактная задача об изгибе двухлистовой рессоры с листами переменной толщины / Вестник Томского государственного университета, Математика и механика, 2014, № 1 (27), С. 90–94.
- [9] Осипенко М.А. Моментная контактная нагрузка при одностороннем контакте балок / Известия Саратовского университета, Новая серия, 2019, т. 19, сер. Математика. Механика. Информатика, вып. 1, С. 69–81.

МНОГОУРОВНЕВАЯ УПРУГОВЯЗКОПЛАСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ: ПРИЛОЖЕНИЕ К СОЗДАНИЮ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ С РАЦИОНАЛЬНОЙ ТЕКСТУРОЙ МЕТОДАМИ ИНТЕНСИВНОЙ НЕУПРУГОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Остапович К.В., Трусов П.В.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
ostkirvad@gmail.com

Поликристаллические металлы и сплавы, подвергнутые интенсивному неупругому деформированию, испытывают изменение своей внутренней структуры на различных масштабных уровнях. При этом, в частности, может наблюдаться переориентация решеток составляющих их кристаллитов (зерен или субзерен), являющихся носителями анизотропных физико-механических характеристик на мезоуровне. Неоднородность в распределении ориентаций, т.е. кристаллографическая текстура, в значительной мере влияет на эффективные макроскопические свойства таких материалов, обуславливая, помимо прочего, их анизотропию. Возможность управления кристаллографической текстурой в ходе различных технологических операций представляет существенный практический интерес, поскольку позволяет создавать детали и конструкции с рабочими характеристиками, адаптированными под конкретные условия функционирования. Следует заметить, что физически обоснованное проектирование изделий указанного класса требует применения моделей материалов, учитывающих и описывающих эволюцию мезоструктуры. Для этой цели представляется перспективным привлечение многоуровневого моделирования [1] с введением внутренних переменных на базе физических теорий упруговязкопластичности.

Настоящая работа посвящена формулировке (с использованием обозначенных моделей) подхода к установлению для поликристаллической заготовки режимов деформирования, формирующих рациональную с точки зрения эксплуатации готового продукта текстуру. В рамках принятой концепции проектирования указанная задача предполагает решение двух связанных подзадач: 1) определение полей текстурных характеристик, обеспечивающих наилучшее функционирование создаваемого изделия; 2) поиск параметров процесса обработки заготовки, в наибольшей степени приближающего поля текстурных характеристик к требуемым, определенным из решения первой подзадачи.

Для численного описания деформирования заготовки во второй подзадаче ставится квазистатическая геометрически нелинейная начально-краевая задача [2] с определяющими соотношениями двухуровневой статистической упруговязкопластической модели [1]. Отличительной особенностью используемой постановки является явное рассмотрение конфигураций материала обрабатываемой заготовки (деформируемая сплошная среда) и инструмента (абсолютно жесткое тело) с априори неизвестными областями контакта, переопределяемыми в каждый момент процесса. Целевое отображение для указанной подзадачи формулируется с учетом вклада текстурных параметров различных представительных объемов в величину критерия, определяющего качество функционирования изделия в рамках первой подзадачи.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (базовая часть государственного задания ПНИПУ, проект № FSNM-2020-0027) и РФФИ (проект № 20-41-596002).

Литература

- [1] Трусов П.В., Швейкин А.И. Многоуровневые модели моно- и поликристаллических материалов: теория, алгоритмы, примеры применения. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2019.
- [2] Остапович К.В., Трусов П.В., Янц А.Ю. Прогнозирование образования кристаллографических текстур при интенсивном неупругом деформировании поликристаллических образцов на основе двухуровневой статистической упруговязкопластической модели // Физическая мезомеханика. – Т. 23, № 5. – 2020. – С. 20-33.

УПРАВЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИМ ОТКЛИКОМ ЭЛЕКТРОВЯЗКОУПРУГИХ КОНСТРУКЦИЙ В РЕЖИМЕ ВЫНУЖДЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ ПУТЕМ ПОДАЧИ НА ПЬЕЗОЭЛЕМЕНТ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СИГНАЛА

Ошмарин Д.А., Юрлова Н.А., Севодина Н.В., Юрлов М.А.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
yurlova@icmm.ru, natsev@icmm.ru, oshmarin@icmm.ru, yurlov@icmm.ru

Первые работы, ориентированные на изучение возможностей использования пьезоэлектрических элементов для активного управления вибрационными процессами и снижения уровня шума, датируются серединой восьмидесятых годов прошлого века. Основной целью этих исследований была попытка создания адаптивных конструкций со встроенной системой распределенных пьезоэлектрических сенсоров и актуаторов, позволяющей управлять динамическими характеристиками конструкций при колебаниях.

В связи с возрастающим применением пьезоэлектрических актуаторов в задачах управления динамическим поведением на сегодняшний день особое место занимают исследования, посвященные определению законов управления, обеспечивающих работу актуаторов, направленную на управление формой, и активный контроль за вибрациями конструкций. Для этого необходимо понимание того, какой механический отклик конструкции последует на то или иное механическое или электрическое воздействие как по отдельности, так и при их комбинациях.

В рамках данной работы исследуется влияние активного электрического воздействия, подаваемого на пьезоэлемент, на механический отклик конструкции, к поверхности которой он прикреплен. Электрическое воздействие реализуется путем подачи на пьезоэлемент электрического сигнала с заданными характеристиками. Под механическим откликом понимается амплитуда перемещений при вынужденных установившихся колебаниях. Исследование проводится численно, на основе решения задачи о вынужденных установившихся колебаниях кусочно-однородных электро-вязкоупругих тел. Вязкоупругие свойства материалов учитываются посредством комплексных динамических модулей.

В ходе проведенных исследований было рассмотрено совместное действие на конструкцию в виде консольно-защемленной пластины приложенного механического воздействия (перемещения консольной заделки или приложение сосредоточенной силы к свободному концу пластины) и электрического воздействия в виде электрического сигнала, подаваемого на пьезоэлемент. При этом величина механического воздействия была фиксированной. Попытка управления механическим откликом конструкции осуществлялась путем изменения характеристик подаваемого на пьезоэлемент электрического сигнала.

В результате численного решения задачи о вынужденных установившихся колебаниях были получены кривые зависимости амплитуды перемещений свободного конца балки в зависимости от различных параметров, характеризующих воздействие на конструкцию. Анализ кривых позволил установить, что при совместном действии электрического сигнала, подаваемого на пьезоэлемент, и реализованного тем или иным образом кинематического или силового воздействия, возможно управлять величиной механического отклика, т.е. амплитудой перемещений при вынужденных установившихся колебаниях.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-41-590007 p_a.

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ КОЭФФИЦИЕНТ ТРЕНИЯ

Палкин Д.Д.¹

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
13denis01@mail.ru

В настоящее время ведутся исследования в области композиционных материалов и их применения в конструкциях в различных областях машиностроения. Одной из такой области является триботехнического назначения в узлах трения. Изучение трибологических свойств композиционных материалов позволит заменить традиционные материалы и улучшить ресурс и долговечность узлов трения

Одним из трибологических характеристик является коэффициент трения. Классически коэффициент определяется законом Амонтона-Кулона [1]:

$$F_{mp} = kN \quad (1)$$

где N – сила нормальной реакции, k – коэффициент трения, F_{mp} – сила трения.

Закон (1) сформулирован для однородных материалов и не учитывает влияние структуры двухкомпонентных и более. Предполагая, что на уровне компонентов структуры композиционного материала закон трения применим, то методы механики композиционных материалов [2] позволят прогнозировать коэффициент трения композита.

В работе рассматривается моделирование контактного взаимодействия волокнистых полимерных композиционных материалов со сталью. В качестве объекта моделирования рассматриваются углепластик и стеклопластик с эпоксидной матрицей. Композиционные материалы считаются двухкомпонентной средой с изотропными элементами тетрагональной структуры и гексагональной структурой. Целью работы является на основе метода локального приближения [2], одного из методов механики композиционных материалов, получение эффективного коэффициента трения в условиях сухого трения. Реализация задачи выполнена методом конечных элементов в прикладном пакете ANSYS Mechanical [3].

В результате численного моделирования получены поля нормальных и контактных напряжений и определены эффективные коэффициенты трения стеклопластика и углепластика при различных случаях износа и различных структур. Проведена оценка влияния компонентов волокнистых композиционных материалов. На основе метода механики композиционных материалов предложена и реализована методика исследования коэффициента трения в паре трения композит-сталь.

Литература

- [1] Крагельский И.В. Основы расчетов на трение и износ / И.В. Крагельский, М.Н. Добычин., В.С. Комбалов. – М.: Машиностроение., – 1997. – 526 с.
- [2] Соколкин Ю.В., Ташкинов А.А. Механика деформирования и разрушения структурно неоднородных тел М.: Наука, 1984. - 115 с.
- [3] Каплун А.Б., Морозов Е.М., Олферьева М.А. ANSYS в руках инженера: Практическое руководство – М: Едиториал, УРСС, 2003. - 272 с.
- [4] Чигарев А.В. Ansys для инженеров: справ. пособие / А.В. Чигарев, А.С. Кравчук, А.Ф. Смалюк. – М.: Машиностроение –1, 2004. – 512 с.

ВЛИЯНИЕ ЖИДКОСТИ НА ПОВЕДЕНИЕ ПОРИСТЫХ НЕОРГАНИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ СЖАТИИ

Панфилов Г.П.¹, Зайцев Д.В.^{1,2}, Панфилов П.Е.¹, Кисеев В.М.¹

¹Институт естественных наук и математики, УрФУ, 620000 Россия, Екатеринбург

²Институт высокотемпературной электрохимии УрО РАН, Екатеринбург
glebbbbb96@mail.ru

В пористых материалах возможны два механизма влияния среды на прочностные свойства: (1) взаимодействие атомов/молекул среды с поверхностью образца; (2) проникновение среды в объем материала по несплошностям/дефектам структуры. В докладе обсуждается деформационное поведение лабораторных образцов пористых металлических материалов при одноосном сжатии в инертных жидких средах. В качестве модельных материалов выбраны капиллярно-пористые (КП) металлы (Ni и Ti, пористость до 60%), а в качестве материала для сравнения - искусственный песчаник (пористость до 10%) при диаметральной сжатии, а в качестве жидких сред: вода и этанол. Заготовки для образцов КП Ti и КП Ni были приготовлены методом изостатического прессования с последующим спеканием в вакууме. Образцы в форме дисков (диаметр 5 мм, толщина 3 мм) высверливали полым алмазным сверлом. Испытания на одноосное сжатие в трех средах (воздух, вода, этанол) проводили на машине Shimadzu AG-50K XD со скоростью перемещения траверсы 0.1 мм/мин.

Для каждого образца была построена деформационная кривая и определены основные механические характеристики. Ход кривых и механические свойства указывают на то, что КП металлам присуще вязкое деформационное поведение. Под влиянием жидкости меняется их предел прочности и деформация до разрушения. На воздухе эти параметры имеют минимальные значения, тогда как в спирте - максимальные, а в воде - промежуточные. Хрупкий тип деформационного поведения песчаника не зависит от среды испытания, тогда как под влиянием воды наблюдается некоторое снижение предела прочности. В случае КП Ni предел прочности практически не зависит от среды испытания, тогда как деформация до разрушения существенно увеличивается только в спирте. Для КП Ti предел прочности в жидкостях возрастает по сравнению с испытаниями на воздухе, при этом в спирте он выше, чем в воде примерно в два раза. Деформация до разрушения при испытаниях в воде не изменяется по сравнению с испытаниями на воздухе, а при испытаниях в спирте она возрастает примерно в два раза. Особенности поведения КП металлов в воде и спирте можно связать с разной (более чем в три раза) величиной коэффициента поверхностного натяжения этих жидкостей. Тип поведения пористого неметаллического материала не зависит от среды испытания, несмотря на то, что в воде снижается его предел прочности. Показано, что вода практически не влияет на механические свойства КП металлов, тогда как при испытаниях в спирте наблюдается рост деформации до разрушения, а для КП титана и предела прочности. При этом характер деформационного поведения этих материалов не меняется - остается вязким.

На основании полученных результатов можно заключить, что в случае отсутствия химического взаимодействия воды/спирта с КП металлом, качественного изменения его деформационного поведения не происходит, как это имеет место в случае некоторых пористых неметаллических материалов. Причиной выхода из строя за счет механических повреждений деталей для тепловых труб из КП Ni и КП Ti скорее всего будут производственные дефекты, а не особенности поведения этих материалов в среде жидкости-теплоносителя.

Работа выполняется при поддержке РФФИ-СО (грант 20-48-660017).

О ВОЗМОЖНОСТИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ РЕНИЙ ПРИ КОМНАТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ

Панфилов П.Е.¹, Миленина И.В.^{1,2}, Ермаков А.В.²

¹*Институт естественных наук и математики, УрФУ, 620000 Россия, Екатеринбург*

²*ООО «УралИнТех», Екатеринбург*

peter.panfilov@urfu.ru

Металлы с ГПУ решеткой при комнатной температуре пластичны и, следовательно, хорошо поддаются механической обработке. Тугоплавкий ГПУ-металл рений ($T_{пл}=3186^{\circ}\text{C}$) при комнатной температуре не обрабатывается, а потому, считается исключением из этого правила. В докладе рассматриваются причины такого поведения и обсуждается возможность создания промышленной технологии термомеханической обработки (ТМО) рения. В качестве заготовок для промышленной ТМО тугоплавких металлов используют либо металл электронно-лучевого переплава (ЭЛП), либо металл, полученный по технологии порошковой металлургии (ПМ). В случае рения, вся проволока и прокат производят из ПМ металла, что существенно повышает себестоимость продукции. Использование ЭЛП металла позволит повысить качество изделий и снизить их себестоимость. Был выполнен значительный объем исследований механического поведения ПМ и ЭЛП рения при комнатной температуре, позволивших определить причину низкой пластичности поликристаллического ЭЛП рения и определить оптимальные режимы его механической обработки.

Ранее было установлено, что в монокристаллическом состоянии рений демонстрирует высокую пластичность при комнатной температуре за счет базисного и призматического скольжения. Электронно-микроскопическое (на просвет) исследование подтвердило, что эти механизмы деформации должны быть активными и в поликристаллическом рении. Поэтому было не понятно, почему он демонстрирует низкую пластичность? Для исследования выбрали схемы нагружения, в которых доля растягивающих напряжений снижается практически до нуля: 3-х точечный изгиб, срез/сдвиг и сдвиг под давлением (НРТ). Исследования проводили на высокочистом (свободном от неметаллических примесей) крупнозернистом ЭЛП рении и коммерческом ПМ металле. При изгибе ЭЛП рений демонстрирует хрупкое поведение, а мелкозернистый ПМ рений – вязкое. При срезе их поведение было оценено как вязкое, сравнимое с поведением меди. При НРТ в ЭЛП рении формируется стабильная наноструктура после мегапластической деформации, тогда как ПМ металл ведет себя как хрупкий материал. Причиной низкой пластичности ЭЛП рения при растяжении и прокатке оказалось обычное для крупнозернистого ГПУ-металла зернограницное проскальзывание. Снижение доли растягивающих напряжений в схеме деформирования приводит к подавлению этого эффекта. Применение плоских (практически 2D) заготовок ЭЛП рения для прокатки позволяет достигать при комнатной температуре обжатий порядка 20% без разрушения материала. В сочетании с вакуумными отпускными отжигами (1400°C , 30 минут), это позволяет получить до 80% обжатия заготовки. Следовательно, при правильном подборе режимов прокатки и отпускных отжигов, возможно создание промышленной технологии ТМО ЭЛП рения при комнатной температуре.

Работа выполнена при поддержке РНФ (грант № 18-19-00217).

РАЗРАБОТКА КРИТЕРИЕВ ПРОЧНОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ СЛОЖНОМ НАПРЯЖЕННОМ СОСТОЯНИИ

Паньков И.Л.

Горный институт УрО РАН, Пермь

ivpan@mi-perm.ru

При оценке состояния породного массива, находящегося в сложных горно-геологических условиях, методами математического моделирования, одной из основных задач является применение адекватных критериев, отражающих влияние максимального, минимального и промежуточного главных напряжений на прочность пород. Основными факторами, затрудняющими исследования при разработке подобных критериев, является высокая трудоемкость проведения экспериментов по определению прочностных показателей горных пород в условиях сложного напряженного состояния, включая неравнокомпонентное трехосное сжатие, а также высокая стоимость лабораторного оборудования для проведения таких испытаний. В этой связи, разработка критериев прочности горных пород при сложном напряженном состоянии, параметры которых определяются по результатам простых экспериментальных исследований, является крайне актуальной задачей, решение которой позволит значительно повысить надежность рекомендаций по повышению безопасных условий ведения горных работ в сложных горно-геологических условиях.

В рамках решения данной задачи разработаны новые критерии прочности горных пород, учитывающие все три компонента главных напряжений. Одним из простейших примеров предлагаемых критериев является модель, приведенная в работе [1]. Отличительной особенностью предлагаемых критериев является то, что их параметры, в общем виде, находятся по результатам комплексного определения пределов прочности на одноосное растяжение, одноосное сжатие, двухосное равнокомпонентное сжатие и трехосное сжатие при заданном боковом давлении.

Сопоставительный анализ теоретических данных с результатами, полученными при испытании Карманом и Бекером образцов карраковского мрамора [2], выявил достаточно хорошую сходимость, что позволяет говорить о применимости разработанных критериев прочности при оценке состояния массива горных пород.

Литература

- [1] Паньков И.Л. О результатах разработки критерия прочности для условий истинного трехосного напряженного состояния горных пород // Горное эхо. – Пермь, 2020. – № 1 (78). – С. 46-50. DOI:10.7242/echo.2020.1.10
- [2] Карташов Ю.М., Матвеев Б.В., Михеев Г.В., Фадеев А.Б. Прочность и деформируемость горных пород. – М.: Недра, 1979. – 269 с.

ВЛИЯНИЕ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ НА ПРЕЖДЕВРЕМЕННОЕ РАСТРЕСКИВАНИЕ ЦИРКОНИЕВЫХ ОБОЛОЧЕК ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ В АТОМНЫХ РЕАКТОРАХ

Панькова С.А.¹, Кузнецова Е.В.²

¹Пермский государственный университет, Пермь

²Пермский государственный технический университет, Пермь

Sofi_pankowa@mail.ru, mellen75@mail.ru

Усовершенствование и создание оболочек тепловыделяющих элементов (ТВЭЛов), применяемых в атомных реакторах, адаптированных к аварийным ситуациям с высокой прочностью, коррозионной, термической и трещино-стойкостью является в настоящее время актуальной проблемой. В работе рассмотрено поведение циркониевых оболочек ТВЭЛов с алюминиевыми и хромовыми покрытиями в эксплуатационных условиях при наличии поверхностных несплошностей и дефектов. с целью оценки влияния экстремальных условий на преждевременное растрескивание оболочек ТВЭЛов.

При эксплуатации в циркониевых оболочках ТВЭЛов после достаточно глубокого выгорания топлива и при резком увеличении мощности реакторов (скачках мощности) обычно протекает коррозионное растрескивание под напряжением (КРН). Процесс КРН оболочек ТВЭЛов связан с образованием трещин на поверхностях труб при одновременном воздействии на них механических напряжений, возникающих из-за радиационного роста топлива, и йода, выделяющегося из топлива в качестве одного из продуктов реакции деления. Дефекты развиваются по толщине стенки трубы вплоть до их выхода на поверхность. Образование сквозных трещин приводит к разгерметизации оболочек ТВЭЛов [1].

К расчётам допустимых эксплуатационных нагрузок в тонкостенных оболочках применены классические подходы механики разрушения [2]. Найдены предельно-допустимые размеры дефектов на поверхности оболочек ТВЭЛов с применением методики расчета коэффициентов интенсивности напряжений в цилиндрических оболочках с поверхностными несквозными дефектами. Задача рассматривается для случаев механического нагружения оболочек и теплового воздействия в зависимости от физико-механических свойств для двух сред материала оболочки и покрытия при наличии дискообразных дефектов (питтингов) на границе сред. Определены коэффициенты интенсивности напряжений в зависимости от физико-механических свойств двух сред – материала оболочки и материала покрытия [3]. Найдены температурные напряжения вокруг внешней осесимметричной трещины на границе раздела двух сред с различными свойствами. Результаты показали, что напряженное состояние представляет собой равномерное растяжение в области без дефекта границе и сжатие в области с трещиной с особенностью у вершины трещины, где напряжения стремятся резко возрастают.

Литература

- [1] С.А. Никулин, В.Г. Ханжин, Д.Б. Рожнов, В.А. Белов: Поведение циркониевых оболочеченых труб ТВЭЛов атомных реакторов в экстремальных эксплуатационных условиях//«Металловедение и термическая обработка металлов».№5.2009 г.С. 32-39
- [2] Влияние эксплуатационных режимов и технологических остаточных напряжений на коррозионное растрескивание циркониевых оболочек, используемых в атомной энергетике / Е. В. Кузнецова, А. А. Арташова // Вестник ПНИПУ = PNRPU Mechanics bulletin. Механика. - 2012. - № 1. - С. 51-61., РИНЦ
- [3] Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений: в 2-х томах. Т.2: Перевод с англ./Под ред. Ю. Мураками. – М.:Мир,1990. – 1016с.

МЕТОД ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНЫХ ВРЕМЕННЫХ РАЗНОСТНЫХ СХЕМ ДЛЯ УРАВНЕНИЙ ДЛИННОВОЛНОВОЙ КОНВЕКЦИИ

Пермякова Э.В.^{1,2}, Голдобин Д.С.^{1,2}

¹Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

²Пермский государственный университет, Пермь
evelina.v.permyakova@gmail.com, Denis.Goldobin@gmail.com

Методы экспоненциальных временных разностных схем дают устойчивые явные схемы для систем с быстро затухающими или осциллирующими модами («жестких» систем), снимая ограничение на величину шага по времени. Кроме того, использование этих методов позволяет радикально снижать скорость накопления погрешности при численном интегрировании консервативных систем. Особенно большой выигрыш в скорости счета получается для уравнений в частных производных с высоким порядком пространственных производных. Вместе с тем задача определения коэффициентов разностных схем этих методов становится крайне трудоемкой или аналитически неразрешимой при недиагональном виде принципиальной линейной части системы уравнений. В работе предлагается подход, при котором коэффициенты схем вычисляются путем прямого численного интегрирования некоторых вспомогательных задач на коротком временном интервале – одном шаге схемы [1]. Подход является универсальным, его использование проиллюстрировано на трех примерах: одномерной системе с реакцией-диффузией в нестационарных условиях, двухмерной системе с реакцией-диффузией при стационарных и нестационарных условиях, одномерном уравнении Кана–Хилларда с постоянными коэффициентами. Использование метода экспоненциальных разностей по времени типа Рунге–Кутты второго порядка дает существенный выигрыш в скорости счета для уравнений типа Кана–Хилларда, описывающих формирование и отбор крупномасштабных конвективных структур, и уравнениях с более высоким порядком пространственных производных. Использование метода делает возможными исследования аналога локализации Андерсона в двух- и трехмерных активных средах, а так же позволяет получить приемлемую производительность при прямом численном моделировании задач динамики плотности распределения активных броуновских частиц общего вида.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ № 19-42-04120.

Литература

- [1] Permyakova E.V., Goldobin D.S. Exponential Time Differencing for Stiff Systems with Nondiagonal Linear Part // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. – 2020. – Vol. 61, No. 7. – P. 1227–1237.

ОГРАНИЧЕННЫЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИМ ОТБОЙНИКОМ ИЗГИБНЫЕ КОЛЕБАНИЯ СОСТАВНОГО ТЯЖЕЛОГО ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ВРАЩАЮЩЕГОСЯ ВАЛА

Пестренин В.М.¹, Пестренина И.В.¹, Перельман О.М.², Фадейкин А.С.²

¹Пермский государственный университет, Пермь

²ООО «Новобур», Пермь

pestreninvm@mail.ru, ipestrenina@gmail.com, perelman@novobur.ru, fadeikin.as@novobur.com

При бурении наклонных и горизонтальных скважин забойные двигатели подвергаются интенсивным изгибным колебаниям, сопровождающимся ударным взаимодействием со стенками скважины. Экспериментально обнаружено [1], что в результате ударов двигателя о стенку в его конструктивных элементах распространяются упругие сдвиговые волны, влияющие на стабильную работу компоновки низа бурильной колонны (КНБК). Уровень амплитуд ускорений таких волн может превышать значение 50g. Испытания бурового инструмента на ударную нагрузку обычно проводятся с использованием стендов, в которых горизонтально расположенные вращающиеся элементы бурильного инструмента подвергаются ударному взаимодействию с отбойником [2]. Для испытательного стенда актуальным является знание режимов его функционирования в зависимости от конструктивных параметров.

В настоящей работе на базе балочной модели [3] испытываемого элемента бурильного инструмента изучается влияние на его изгибные колебания скорости вращения, сил тяжести и диссипации. Формулируются критерии перехода вращения составного вала от прямой прецессии к обратной; устанавливаются режимы устойчивого ударного взаимодействия вращающегося вала с цилиндрическим отбойником; определяются амплитуды упругих сдвиговых волн в элементах конструкции.

Показано, что докритическое вращение вала реализуется относительно линии центров тяжести поперечных сечений в статически равновесном состоянии, обусловленном силами тяжести. Диссипация приводит к центрированию вращающегося вала. При возрастании скорости вращения вала существует ее критическое значение, при котором происходит переход от вращения вала с прямой прецессией к вращению с обратной прецессией. Критерий перехода к обратной прецессии предлагается определять по диаграмме Кэмпбелла. Движение вала в режиме обратной прецессии оказывается неустойчивым. Обнаружено, что в окрестности первой собственной частоты вращения составного вала реализуется его устойчивое ударное взаимодействие с отбойником, вследствие чего по валу распространяются скачки ускорения, поперечной силы и моментов. Результаты исследования могут быть использованы при проектировании испытательных стендов бурового оборудования.

Литература

- [1] Заляев М.Ф. Исследование вибрации при бурении скважин на термокарстовом газоконденсатном месторождении // Нефтегазовое дело. Геология. Геофизика. Бурение.–2015.–т. 13.–№ 4.– С. 36–40.
- [2] Заляев М.Ф., Ямалиев В.У. Исследования влияния искривления ствола скважины на колебательные процессы компоновки низа бурильной колонны // Изв. Самарского научного центра Российской академии наук. Машиностроение и машиноведение.– 2017.–т.19.– №1(2).– С.229–234.
- [3] Деркач Н.Д., Перельман О.М., Пестренин В.М., Пестренина И.В., Коротаев А.Ю., Ландик Л.В., Мингараев В.Г., Фадейкин А.С. Балочная модель роторно управляемой системы с электродвигателем // Булатовские чтения /Сборник статей. – Краснодар: Издательский Дом Юг.– 2020.– Т. 6.– С.92–102. <http://id-yug.com/images/id-yug/Bulatov/2020/6/PDF/2020-6.pdf>

ВОЗВРАТНЫЕ ПЕРЕХОДЫ В БИНАРНОЙ СМЕСИ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК И ЖИДКОГО КРИСТАЛЛА

Петров Д.А.¹, Скоков П.К.²

¹Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь

²Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук,
Пермь

petrovda@bk.ru, skokovpk@gmail.com

В рамках континуальной теории исследованы индуцированные внешним магнитным полем возвратные ориентационные переходы в бинарной смеси углеродных нанотрубок (УНТ) и нематического жидкого кристалла (ЖК). Предполагалось, что в отсутствие внешнего магнитного поля ориентации длинных осей молекул ЖК и УНТ совпадают, что отвечает планарному типу сцепления, которое, кроме того, считалось мягким. Рассматривался случай отрицательной анизотропией диамагнитной восприимчивости ЖК-матрицы, в результате чего директор ЖК стремится ориентироваться ортогонально внешнему магнитному полю. Поскольку УНТ обладают положительной анизотропией диамагнитной восприимчивости, то они стремятся ориентироваться параллельно внешнему магнитному полю, что вызывает конкуренцию с упорядочением ЖК-матрицы. Показано, что включение магнитного поля приводит к появлению возвратных ориентационных фаз в ЖК-композите. Сначала при достижении поля некоторого порогового значения происходит переход Фредерикса из начальной однородной планарной фазы в неоднородное состояние, где директор УНТ стремится ориентироваться в направлении внешнего поля, а директор ЖК – ортогонально ему. С дальнейшим ростом магнитного поля происходит возвратный переход из неоднородного состояния в однородную гомеотропную фазу, где ЖК отвечает начальная планарная текстура, а директор УНТ ориентирован вдоль магнитного поля. Найдены выражения для пороговых полей переходов между сосуществующими фазами как функции материальных параметров смеси. Установлено, что в случае сильной сегрегации УНТ обнаруженные переходы меняют свой характер со второго рода на первый. В этом случае поля равновесных переходов первого рода должны определяться из условия равенства свободных энергий однородных и неоднородной фаз. Построены диаграммы ориентационных фаз смеси в терминах магнитного поля и энергии сцепления ЖК и примесной подсистем. Кроме кривых, отвечающих переходам второго рода, на диаграмме удалось построить также кривые, отвечающие переходам первого рода для фиксированных значений сегрегационного параметра. В зависимости от величины энергии сцепления и интенсивности сегрегационных эффектов возможны три различных сценария последовательности переходов. При первом сценарии переход Фредерикса и возвратный переход являются переходами второго рода; при втором сценарии переход Фредерикса происходит по типу фазового перехода второго рода, а возвратный переход – по типу фазового перехода первого рода; при третьем сценарии оба перехода являются переходами первого рода. Для всех представленных случаев в соответствии с фазовыми диаграммами построены зависимости углов ориентации директора ЖК и УНТ от приложенного магнитного поля.

Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-02-00231. П.К. Скоков выполнял работу в рамках государственного задания; номер гос. регистрации темы АААА-А19-119021490136-7.

ИЗВЛЕЧЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКОГО АСИМПТОТИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ УИЛЬЯМСА ДЛЯ ПЛАСТИНЫ С ДВУМЯ КОЛЛИНЕАРНЫМИ ТРЕЩИНАМИ РАЗНОЙ ДЛИНЫ

Петрова Д.М.¹.

¹*Самарский национальный исследовательский университет, Самара*
trebelle@mail.ru

Одним из направлений современных исследований в механике разрушений является определение напряжений, смещений, деформаций у вершин трещин. Поле напряжений входит в критерий разрушения, который определяет прочность и целостность конструкций. Для описания этого поля на практике чаще всего используется асимптотическое представление поля напряжений, где необходимо определять коэффициенты (неизвестные) поля напряжений у вершины трещины. Численные методы, в частности, метод конечных элементов являются надежным инструментом для нахождения коэффициентов многопараметрического асимптотического разложения Уильямса [1]. Были получены коэффициенты ряда Уильямса для поля напряжений в окрестности вершин трещин пластины с двумя горизонтальными коллинеарными трещинами разной длины. Описаны современные методы для определения параметров механики разрушения, основанные на конечно-элементном анализе с использованием переопределенного метода. Показано построение 2D модели в программном комплексе Simulia Abaqus для получения коэффициентов интенсивности напряжений, Т-напряжений и сравнения их значений. Был проведен эксперимент на растяжение пластины данной конфигурации и получено значение коэффициента интенсивности напряжения методом фотоупругости. Результаты вычислений коэффициента интенсивности напряжений разными методами хорошо согласуются со значением, полученным аналитически.

Литература

[1] Bachareva Y.N., Mironov A.V., Petrova D.M. Extraction of fracture mechanics parameters from fem analysis: algorithms and procedures – Вестник Самарского университета. Естественнонаучная серия, 2020, Т. 26, № 1 – С. 69–77. DOI: <http://doi.org/10.18287/2541-7525-2020-26-1-69-77>.

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ УГЛЕ-НИКЕЛЕВЫХ КОМПОЗИТОВ В КОНСТРУКЦИЯХ АЭРОКОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

Петрова О.В.¹,

¹*Институт физики твердого тела РАН, Черноголовка*
petrovaov@issp.ac.ru,

В настоящее время ведутся активные исследования в области разработки композитов с металлической матрицей, так как требуется замена существующих сплавов более эффективными материалами. Это особенно необходимо в изделиях авиационной и ракетно-космической техники, где рабочая температура материалов превышает 500°С, а удельные характеристики прочности, упругости и сопротивления ползучести должны быть очень высокими. В качестве матрицы композита для этих целей наилучшим образом подходят сплавы на основе никеля, хрома, железа, интерметаллидов.

Существует основанная на запатентованной технологической схеме лабораторная технология получения образцов угле-титанового композита, иерархическая структура которого представляет собой такую последовательность: углеволокно – карбидное покрытие – промежуточная матрица – основная матрица. Аналогичным способом получены и испытаны на прочность первые угле-никелевые композиты аналогичной структуры. В настоящем докладе представлено описание процесса получения композитных образцов, приведены результаты механических испытаний, а также их микроструктуры. Рассмотрены перспективы совершенствования структуры и применения угле-никелевых композитов.

ЭВОЛЮЦИОННАЯ МОДЕЛЬ НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЁННОСТИ И ЕЁ ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ ОЦЕНКИ ВРЕМЕНИ ЖИЗНИ ДЕТАЛИ С ПОЛЕМ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

Петухов Д.С., Келлер И.Э.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
petuhovds@mail.ru, kie@icmm.ru

Предлагается континуальная эволюционная модель накопления повреждённости, полученная в результате модификации и исправления недостатков модели Оттосена [1]. Континуальность означает что модель записывается для точки среды. Модель несвязанная: определение времени жизни происходит после расчёта в режиме постпроцессинга. Развитие пластических деформаций не предполагается.

В основе модели лежит понятие поверхности выносливости существующей в пространстве напряжений и задаваемой выражением $\beta(\sigma) = 0$. Пока напряжённое состояние находится внутри неё ($\beta(\sigma) < 0$), прироста повреждённости не происходит. Когда напряжённое состояние находится вовне ($\beta(\sigma) > 0$), то повреждённость прирастает в зависимости от расстояния до поверхности и направления изменения напряжений. Поверхность выносливости может перемещаться, её положение задаётся тензорным параметром α .

$$\begin{aligned}\beta &= \sigma_e^{-1} \left(\sqrt{\frac{3}{2}(\mathbf{s} - \alpha) : (\mathbf{s} - \alpha)} + g(I_1(\sigma)) - \sigma_e \right), \\ \dot{\alpha} &= \frac{\|\dot{\mathbf{s}}\|}{\sigma_e} h(\beta) f_1(\angle(\dot{\mathbf{s}}, \mathbf{s} - \alpha)) H(\beta) \frac{\mathbf{s} - \alpha}{\|\mathbf{s} - \alpha\|}, \quad \mathbf{s} = \sigma - \frac{1}{3} I_1(\sigma) \mathbf{I}, \\ \dot{D} &= \frac{\|\dot{\mathbf{s}}\|}{\sigma_e} p(\beta) f_2(\angle(\dot{\mathbf{s}}, \mathbf{s} - \alpha)) H(\beta), \quad H(\beta) = \begin{cases} 0, & \beta < 0 \\ 1, & \beta \geq 0 \end{cases}\end{aligned} \quad (1)$$

здесь $\|\mathbf{x}\| = \sqrt{\mathbf{x} : \mathbf{x}}$, $\sigma(t)$ - тензор напряжений, D - скалярный параметр поврежденности, σ_e - константа модели, g, h, p, f_1, f_2 - материальные функции. Модель (1) претендует на применимость при произвольной истории нагружения произвольной многоосносности. Для её идентификации предполагается использовать 2 или более кривых Вёлера, диаграмму Хейга и результаты экспериментов на одноосное нерегулярное нагружение и на многоосное регулярное нагружение.

Модель (1) предлагается использовать для оценки времени жизни детали, в которой с помощью поверхностной обработки (например дробеструйная обработка или laser reening) сформирован слой приповерхностных сжимающих остаточных напряжений. При этом предполагается использовать модель (1) для набора точек находящихся на различном расстоянии под поверхностью. Когда в какой-либо из них D достигает единицы фиксируется время жизни.

Так как в этом случае разрушение может начинаться не с поверхности детали, стандартные усталостные испытания непригодны. Для идентификации и доработки данной модели необходимы систематические экспериментальные исследования времени жизни образцов со слоем сжимающих остаточных напряжений. Подобные исследования авторам неизвестны.

Литература

[1] Ottosen N.S., Stenström R., Ristinmaa M., Continuum approach to high-cycle fatigue modeling. Int. J. Fatigue, 2008, 30(6), p. 996-1006.

О ВОЗМОЖНОСТИ ЗАЩИТЫ ЖАРОПРОЧНЫХ ОКСИД-МОЛИБДЕНОВЫХ КОМПОЗИТОВ ОТ ОКИСЛЕНИЯ

Петухов И.Д.¹

¹Институт физики твердого тела РАН, Черноголовка

petukhov@issp.ac.ru

Одним из векторов развития авиационной промышленности является совершенствование характеристик газовых турбин. В связи с этим ведутся исследования по разработке новых материалов для изготовления элементов газовых турбин, способных заменить никелевые суперсплавы. Среди таких материалов можно отметить композиты с металлической матрицей, одним из преимуществ которых является отсутствие так называемого конфликта между прочностью и трещиностойкостью [1,2], характерного для металлических сплавов. Получаемые методом внутренней кристаллизации [3] композиты оксидное волокно – молибденовая матрица рассматривались как модельные материалы, но с появлением возможности понижения скорости окисления вышеупомянутой матрицы [4], оказались перспективными жаропрочными материалами. Способ основан на армировании молибденовой матрицы оксидными волокнами, содержащими иттрий или один из лантаноидов, что обеспечивает образование на поверхности композита соответствующих молибдатов, которые обеспечивают повышенную стойкость матрицы против окисления. Защитное покрытие, которое оставляет за молибдатами роль «лекаря» дефектов покрытия, тем не менее необходимо. Одним из способов нанесения покрытия является так называемая цементация [5]. В докладе приводится технология цементации оксид-молибденовых композитов, структура покрытия и предварительные результаты исследования кинетики окисления образцов с покрытиями.

Литература

- [1] S.T. Mileiko, Metal and Ceramic Based Composites, Elsevier, Amsterdam, 1997
- [2] R.O. Ritchie, The conflicts between strength and toughness, Nat. Materials 10 (2011) 817-822
- [3] С.Т. Милейко, В.И. Казьмин, Получение композитов методом внутренней кристаллизации, Механика композитных материалов, 1991, №5, 898-908.
- [4] С.Т. Милейко и Н.И. Новохатская, Об одной возможности построения жаропрочных жаростойких композитов с тугоплавкой металлической матрицей, Композиты и наноструктуры, 2012, № 4, 5-14
- [5] K. Choi, W. Yang, K.-H. Baik, Y. Kim, S. Lee, S. Lee, J. S. Park, Growth kinetics and isothermal oxidation behavior of a Si pack cementation coated Mo-Si-B alloy, Applied Surface Science 489 (2019) 668–676

БИОМЕХАНИКА КАРПАЛЬНОГО ТУННЕЛЬНОГО СИНДРОМА

Пешин С.Е., Няшин Ю.И.

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
Sapeshin@yandex.ru, nyashin@inbox.ru

Карпальный туннельный синдром (КТС) или кистевой туннельный синдром – это мононевропатия срединного нерва (СН) в результате его сдавливания (Рис.). Ряд работ свидетельствует о том, что каждый год сотни тысяч рабочих и служащих, занятых в сельском хозяйстве, промышленности, а также занимающихся офисной и творческой работой, становятся временно нетрудоспособными вследствие различных производственных травм, связанных с перегруженностью костно-мышечной системы рук, в том числе и КТС [1,2]. Анатомия кисти устроена таким образом, что в кистевом туннеле находятся связки, жидкость и сам нерв. Кистевой туннель находится в окружении различных тканей – мышц и жировой прокладки. Таким образом в задаче будет рассмотрен контакт твёрдых тел друг с другом и с жидкостью.

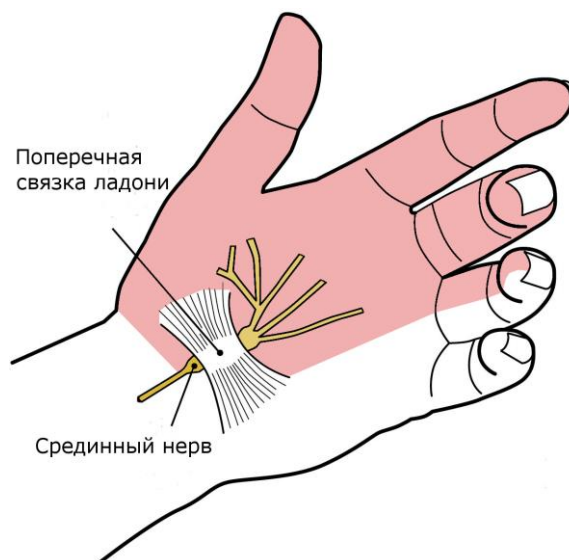


Рис. Местоположение срединного нерва

Цель данной работы заключается в построении биомеханической модели КТС на основе магнитно-резонансной томографии (МРТ) и определении напряжённо-деформированного состояния СН. Модель позволит численно оценить давление на СН у каждого отдельного пациента. Также пользуясь построенной моделью можно будет определить самые неблагоприятные величины и места приложения внешних нагрузок, которые будут вызывать мононевропатию СН. Например, при определённом положении кистей рук при работе за компьютером или оценить нагрузки при различных спортивных движениях. Биомеханический анализ здорового человека поможет определить риск возникновения КТС у конкретного пациента. В докладе продемонстрирована анатомия, связанная с КТС, освещен медицинский подход к проблеме [3], показана биомеханическая задача и сделан обзор современной научной литературы по данной тематике.

Литература

- [1] Кипервас И.П. Туннельные синдромы. – Москва, 2010. – 520 с.
- [2] Aroori S., Spence R.A.J. Carpal tunnel syndrome. – Ulster, 2008. – 11 p.
- [3] Белова Н.В., Юсупова Д.Г. и др. Современные представления о диагностике и лечении карпального туннельного синдрома. – Москва. – 2015 – 4 с.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В СКВАЖИНЕ С ПРИЗАБОЙНЫМ НАГРЕВАТЕЛЕМ

Пинягин Д.С.¹

¹Пермский государственный университет, Пермь

PinyaginDS@gmail.com

В настоящее время в связи с сокращением природных запасов маловязкой нефти широко разрабатываются месторождения с высоковязкой нефтью. Одним из методов добычи нефти является метод с использованием центробежного насоса. Так как электрические центробежные насосы имеют ограничение по величине вязкости перекачиваемой среды, то для работы насоса необходимо снизить вязкость до необходимых значений. Одним из таких способов является прогрев призабойной зоны скважины при помощи электрического нагревателя. Исследованию процессов течения и теплообмена в нефтяных скважинах посвящено ряд работ [1,2], однако остается открытым вопрос о процессах тепломассообмена в нефтяной скважине с учетом призабойного нагревателя.

В работе рассмотрена осесимметричная математическая модель процесса тепломассопереноса[3] в нефтяной скважине с призабойным нагревателем, который используется для скважин с высоковязкой нефтью. Использование локального нагревателя в призабойной области позволяет снизить вязкость нефти, поступающей в насос, обеспечивая тем самым бесперебойную работу скважины. Рассматривалось продольное сечение области нефтяной скважины от забоя до электрического центробежного насоса на глубине 3 км и длиной 105 метров. Скважина состоит из насосно-компрессорной трубы и обсадной колонны и окружена грунтом. Электрический нагреватель цилиндрический и расположен над забоем скважины. Численная реализация разработанной математической модели осуществлялась методом конечных элементов в среде инженерных расчетов Ansys Fluent.

Были разработаны и исследованы математические модели нефтяной скважины с турбулентным и ламинарным течением нефти с учетом призабойного нагревателя. В результате исследования были получены поля скоростей, температур во всем объеме скважины. Построены распределения скоростей и температур по сечению НКТ. Исследовано влияние величины дебита и мощности нагревателя на вязкость нефти перед входом в электрический центробежный насос.

Разработанная модель позволяет успешно справляться с задачей по определению наиболее рационального способа прогрева призабойной зоны скважины, что позволяет снизить вязкость нефти перед входом в электрический центробежный насос. Использование данной модели позволяет принять необходимые меры по снижению вязкости нефти на заранее известном участке, что существенно снизит материальные затраты при разработке месторождений.

Литература

- [1] Каменщиков Ф. А. Тепловая депарафинизация скважин. – М.-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2005. – 253с.
- [2] Tarom N., Hossain M.M.. Using ANSYS to Realize a Semi-Analytical Method for Predicting Temperature Profile in Injection/Production Well // World Academy of Science, Engineering and Technology 72 2012
- [3] Труфанова Н.М., Костарев Н.А. Исследование процесса тепломассопереноса в нефтяной скважине //Научно-технический вестник Поволжья. 2015. № 4. С. 126-129.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ДРЕЙФА РЕЛЬЕФА В ГОРИЗОНТАЛЬНОМ ЛИБРИРУЮЩЕМ ЦИЛИНДРЕ С ЖИДКОСТЬЮ И ТЯЖЕЛОЙ СЫПУЧЕЙ СРЕДОЙ

Полежаев Д.А.

Пермский государственный гуманитарно-педагогический университет, Пермь

polezhaev@pspu.ru

Экспериментально изучается временная динамика рельефа на поверхности кольцевого слоя сыпучей среды в цилиндре с жидкостью, совершающем неравномерное вращение (либрации) вокруг горизонтальной оси.

В быстро вращающемся горизонтальном цилиндре образованный частицами тяжелой сыпучей среды кольцевой слой совершает твердотельное вращение вместе с цилиндром и жидкостью. При включении круговых колебаний в лабораторной системе отсчета сыпучая среда приходит в неравномерное вращение вместе с цилиндром, а жидкость продолжает равномерно вращаться. Относительно сыпучей среды жидкость совершает тангенциальные колебания и может вызывать движение частиц и появление рельефа на межфазной границе.

В [1] показано, что формирование рельефа начинается при достижении критического числа Шильдса θ . Регулярный рельеф представляет собой вытянутые вдоль оси вращения холмы с симметричными или асимметричными склонами. В [2] изучены геометрические размеры холмов и показано, что в азимутальный размер (длина) холмов зависит только от амплитуды колебаний жидкости, а радиальный размер (высота) определяется критерием мобильности (mobility number) ψ .

Наблюдения показывают, что регулярные холмы, как правило, дрейфуют в азимутальном направлении. В экспериментах обнаружено, что варьирование частоты и амплитуды колебаний цилиндра влияет не только на скорость дрейфа, но также на его направление – холмы могут перемещаться в направлении вращения цилиндра или против него.

Полученные экспериментальные данные представлены на плоскости безразмерных параметров ψ , U (в качестве характерной скорости движения используется максимальная скорость колебательного движения цилиндра). Обнаружено, что с увеличением критерия мобильности скорость дрейфа сначала увеличивается и достигает предельного значения, после чего начинает монотонно уменьшаться до нуля и даже менять знак на противоположный. Величина максимальной скорости дрейфа зависит от частоты колебаний жидкости – при одинаковой скорости вращения темп больше при меньшей частоте колебаний.

Работа выполнена при поддержке правительства Пермского края (проект Научных школ С26/119).

Литература

- [1] V. Dyakova, V. Kozlov, D. Polezhaev. Oscillation-induced sand dunes in a liquid-filled rotating cylinder // Phys. Rev. E. 2016. Vol. 94 (6). 063109.
- [2] D. Polezhaev. The geometry of sand ripples in a uniformly rotating and librating horizontal cylinder // Microgravity Sci. Technol. 2020. Vol. 32. P. 807 – 816.

ПРОДОЛЬНОЕ ПЕРЕМАГНИЧИВАНИЕ АНТИФЕРРОМАГНИТНЫХ НАНОЧАСТИЦ СО СПОНТАННЫМ МАГНИТНЫМ МОМЕНТОМ

Поперечный И. С.^{1,2}

¹Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

²Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь
poperechny@icmm.ru

Наноразмерные антиферромагнетики (АФМ) обладают рядом особенных свойств, которые не характерны для массивных образцов. Прежде всего, это наличие спонтанного (декомпенсационного) магнитного момента. Появление спонтанной намагниченности у АФМ наночастиц связано с дефектами кристаллической решётки, неравным количеством элементарных магнитных моментов в соответствующих кристаллических плоскостях, фрустрацией спинов на поверхности частиц и так далее [1, 2, 3]. Другим не менее важным свойством наноразмерных антиферромагнетиков является сильная зависимость их магнитного отклика от температуры, связанная, в первую очередь, с ориентационными тепловыми флуктуациями намагниченностей подрешёток.

Благодаря тщательным измерениям, в последнее десятилетие было получено немало ценных экспериментальных результатов, посвященных магнитодинамике АФМ наночастиц, см. к примеру работу [3]. Прогресс в развитии теории магнитного отклика этих частиц, однако, не столь очевиден. Кинетическое описание перемагничивания механически неподвижных АФМ наночастиц впервые было представлено в работе [4]. Предложенный подход предполагает, что движение спонтанного магнитного момента АФМ наночастиц можно уподобить вращениям вектора намагниченности однодоменных ферромагнитных частиц в присутствии тепловых флуктуаций. Такое допущение позволяет, на первый взгляд, простым образом обогатить теоретическое описание процессов намагничивания АФМ наночастиц путём переноса методов, разработанных для ультрадисперсных ферромагнетиков. Однако вместе с тем, подобный подход имеет существенный недостаток: в ситуации нулевой спонтанной намагниченности он приводит к нефизичному выводу о стремлении времени магнитной релаксации к нулю.

Предложенная в настоящей работе теория включает в себя предельный случай полной компенсации магнитных подрешёток естественным образом, давая тем самым возможность прояснить роль спонтанного магнитного момента в магнитном отклике АФМ наночастиц. В основе теории – кинетическое уравнение для функции распределения ориентаций вектора антиферромагнетизма. В рамках развитого подхода подробно рассмотрен важный частный случай, когда перемагничивающее поле направлено вдоль оси анизотропии частицы. Показано, что в широком интервале частот магнитный отклик АФМ наночастиц определяется исключительно наиболее долгоживущей модой. Получены простые формулы для статической и динамической продольной магнитной восприимчивости антиферромагнетика, включающие явным образом величину спонтанного магнитного момента. Численно рассчитаны кривые намагничивания АФМ наночастиц в сильных полях; полученные результаты качественно согласуются с экспериментальными данными.

Литература

- [1] Neel L. // C. R. Acad. Sci. 1961. Vol. 252, P. 4075–4080.
- [2] Raikher Yu. L., Stepanov V. I. // J. Phys: Condens. Matter. 2008. Vol. 20, Art. no. 2014120.
- [3] Popkov S. et al. // J. Appl. Phys. 2019. Vol. 126. Art. no. 103904.
- [4] Ouari B. et al. // Phys. Rev. B. 2010. Vol. 81. Art. no. 024412.

ОПИСАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ АТОМОВ ПРИМЕСИ С ДИСЛОКАЦИЯМИ ПРИ ВОЗНИКНОВЕНИИ ЭФФЕКТА ПОРТЕВЕНА – ЛЕ ШАТЕЛЬЕ

Попов Ф.С.¹, Чечулина Е.А.¹

¹*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь*
popovfyodor@yandex.ru, zhenya-chechulina@yandex.ru

Деформирование в режиме прерывистой пластичности, особенно на заключительных стадиях технологических процессов обработки металлов давлением, ведет к существенному ухудшению качества поверхности (увеличению шероховатости), что приводит к снижению усталостной прочности, коррозионной стойкости и аэродинамических характеристик изделий. Изучение особенностей пластического деформирования, в частности эффекта Портевена–Ле Шателье (ПЛШ), представляет значительный теоретический и практический интерес, так как значительная часть изделий из конструкционных металлов и сплавов в реальных процессах изготовления обнаруживает склонность к указанному эффекту.

Данная работа посвящена исследованию поведения алюминий-магниевого сплава, проявляющих в определенных условиях (невысоких скоростях деформирования и повышенных температурах) реализацию эффекта ПЛШ. Основоположающим механизмом возникновения рассматриваемого эффекта является статическое и динамическое деформационное старение, а именно – взаимодействие атомов примеси с дислокациями, что подтверждается многочисленными исследованиями [1,2 и др.].

Предлагаемая многоуровневая упруговязкопластическая модель включает описание наиболее важных механизмов, реализуемых при неупругом деформировании поликристаллических металлов и сплавов: движение краевых дислокаций, взаимодействие дислокаций (образование дислокационных субструктур), взаимодействие дислокаций с атомами примеси. Рассматривается взаимодействие дислокаций с «собранными» при движении и находящимися в текущий момент времени в «виртуальной трубке захвата» атомами примеси, которое тормозит движение дислокаций. В зависимости от скоростей движения дислокаций концентрация примесных атомов изменяются в объеме «трубки захвата» и, соответственно, изменяется вклад от действия примесных атомов в критические напряжения сдвига по системам скольжения, которые непосредственно влияют на процесс деформирования, что вызывает описываемую неустойчивость процесса.

Основное внимание в работе уделено физическому объяснению и описанию механизмов деформационного старения и их влияния на возникновение эффекта Портевена – Ле Шателье в процессе пластической деформации. Показано, что результаты численных расчетов качественно согласуются с экспериментальными данными, полученными для простого нагружения.

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

Литература

- [1] Portevin A., Le Chatelier F. Sur unphenomene observe lors de l'essai de traction d'alliages en cours de transformation // Compt. Rend.Acad. Sci. Paris. – 1923.– Vol. 176. – Pp. 507–510.
- [2] Трусков П.В., Чечулина Е.А. Прерывистая текучесть: физические механизмы, экспериментальные данные, макрофеноменологические модели // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2014. – № 3. – С.186–232. DOI: 10.15593/perm.mech/2014.3.10

КОНВЕКЦИЯ ТРЕХКОМПОНЕНТНОЙ СМЕСИ С СУММАРНЫМ ОТНОШЕНИЕМ РАЗДЕЛЕНИЯ, БЛИЗКИМ К НУЛЮ

Прокопьев С.А.¹, Любимова Т.П.¹, Шевцова В.М.², Мьяльдун А.²

¹*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

²*Центр исследования микрогравитации Свободного университета Брюсселя, Бельгия*

prokopev.s@icmm.ru, lyubimovat@mail.ru

Исследуется конвекция трехкомпонентной смеси с эффектом Соре в прямоугольной горизонтальной замкнутой области с отношением сторон 3:1. В качестве примера изучаемой жидкости выбрана углеводородная смесь толуол-метанол-циклогексан в соотношении 0.62/0.31/0.07. Рассматривается случай нагрева сверху с непроницаемыми для вещества границами. Задача решается численно методом конечных разностей, с использованием переменных функция тока - завихренность и явной схемы по времени. Используются уравнения конвекции многокомпонентных смесей с эффектом Соре, представленные в [1]. В качестве параметра, характеризующего эффект термодиффузии смеси, выбирается суммарное отношение деления Ψ .

В работе [2] представлены результаты измерения коэффициентов деления рассматриваемой смеси, выполненные независимо двумя исследовательскими группами. В обоих случаях полученные значения коэффициентов близки к нулю по абсолютной величине, но в одном случае (Ψ_I) суммарное отношение деления положительно, в другом (Ψ_{II}) – отрицательно. В настоящей работе рассматриваются оба случая, а также третий случай (Ψ_{III}), с усредненным коэффициентом деления (суммарное отношение деления при этом положительно). В численных расчетах используются 3 варианта начальных условий для температуры: 1) линейное распределение температуры с высотой, T_L , 2) однородное распределение температуры, со значением температуры T_C , равным среднему между температурами верхней горячей и нижней холодной стенок, 3) однородное распределение температуры, со значением температуры T_X , равным температуре холодной нижней стенки. Профиль концентрации также является однородным, равным пропорциям смеси 0.62/0.31/0.07. В начальный момент времени система находится в состоянии механического равновесия, из этого состояния система выводится путем задания возмущения вихря в одной точке области.

Численные расчеты показали, что возможно существование четырех различных режимов. Режим 1 (Ψ_I при всех вариантах условий для температуры, а также Ψ_{III} при T_L и T_C): состояние покоя с линейными распределениями температуры и концентраций. При этом наблюдается конкуренция диффузионных потоков, так, например, наиболее тяжелая компонента смеси, толуол, на начальном этапе за счет вклада термодиффузии движется вверх, после чего диффузионный и кросс-диффузионный потоки вступают в конкуренцию и в конце толуол накапливается у нижней стенки. Режим 2 (Ψ_{III} при T_X): аналогичен режиму 1, но на начальном этапе наблюдается конфигурация поля концентрации в виде «кошачьих глаз». Режим 3 (Ψ_{II} при T_X): похож на предыдущий случай, но «кошачьи глаза» со временем трансформируются в режим, при котором наблюдается стационарное одновихревое течение. Режим 4 (Ψ_{II} при T_L и T_C): аналогичен режиму 3, но развитие неустойчивости наступает раньше, минуя стадию квазирежима в виде «кошачьих глаз».

Литература

- [1] Рыжков И.И. Термодиффузия в смесях: уравнения, симметрия, решения и их устойчивость. Новосибирск: Издательство СО РАН, 2013. 200 с.
- [2] A. Mialdun, I. Ryzhkov, O. Khlybov, T. Lyubimova, and V. Shevtsova, Measurement of Soret coefficients in a ternary mixture of toluene-methanol-cyclohexane in convection-free environment, J. Chem. Physics 148, 044506

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ МАТЕРИАЛА ПОСЛЕ ЛАЗЕРНОГО УДАРНОГО УПРОЧНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ

Прохоров А.Е.¹, Плехов О.А.¹, Кашаев Н.², Жеребцов С.В.³

¹*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

²*Helmholtz-Zentrum Geesthacht, Institute of Materials Research, Materials Mechanics, Geesthacht, Germany*

³*Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Белгород*
prokhorov.a@icmm.ru, poa@icmm.ru, Nikolai.Kashaev@hzg.de, Zharebtsov@bsu.edu.ru

В настоящее время увеличение усталостного ресурса деталей из металлических материалов возможно двумя различными способами: поиском новых материалов или изменением структурного состояния существующих. Особенно перспективным с точки зрения повышения усталостного ресурса является изменение состояния поверхности и создания сжимающих остаточных напряжений. В настоящее время в отечественной промышленности используются методы, создающие сжимающие остаточные напряжения на глубину до 0.2мм (обдувка дробью), что существенно уступает зарубежным методикам и создает значительные проблемы, связанные с высокой чувствительностью ответственных деталей к механическим повреждениям и, как следствие, необходимости их более частой замены. Методом лазерного ударного упрочнения возможно создание остаточных сжимающих напряжений в приповерхностном слое материала вплоть до глубины в 1мм, что существенно превосходит результаты, получаемые классическими методами.

Настоящая работа посвящена исследованию влияния поверхностных сжимающих напряжений, полученных методом лазерного ударного упрочнения на физико-механические характеристики металлов. В качестве материала для исследования было выбрано армко-железо. Образцы материала были подвержены лазерному ударному упрочнению и испытаны в режиме многоциклового усталости и квазистатического растяжения. На образцах были проведены экспресс-тесты на усталостную долговечность и предел прочности. Для сравнения полученных характеристик испытания были проведены на образцах подверженных ударному упрочнению и образцах исходного материала. По завершении серии испытаний на образцах исходного материала и материала после упрочнения проведены структурные исследования.

Результаты проведенных исследований показали, что на данном материале, подверженному лазерному ударному упрочнению существенно изменяется диссипация энергии при приложении циклической нагрузки, по сравнению с материалом в исходном состоянии. Также существенно изменилось количество циклов до разрушения образцов. Структурные исследования так же показывают существенные различия в показателях плотности дислокаций в приповерхностной зоне, что может объяснить аномальную диссипацию энергии.

Исследование выполнено при финансовой поддержке министерства образования и науки РФ в рамках гранта № 075-15-2020-925

НАМАГНИЧИВАНИЕ ПОЛИМЕРА С ВНЕДРЕННЫМИ МАГНИТНЫМИ НАНОЧАСТИЦАМИ

Д.И. Радужнов¹, А.Ю. Соловьева¹, Е.А. Елфимова¹, А.Ю. Зубарев¹

¹Уральский Федеральный Университет,

Ул. Ленина 51, 620000 Екатеринбург, Россия

radushnovs@mail.ru, Anna.Soloveva@urfu.ru, Ekaterina.Elifimova@urfu.ru, A.J.Zubarev@urfu.ru

Работа посвящена теоретическому изучению намагниченности полимера с внедренными магнитными наночастицами, помещенного в постоянное магнитное поле. Модель исследуемой системы основывается на следующих предположениях. До полимеризации несущей среды феррочастицы свободно перемещались и изменение ориентации магнитного момента происходило только за счет броуновского движения феррочастиц, при этом межчастичные диполь-дипольные взаимодействия оказывали влияние на ориентацию магнитных моментов феррочастиц. Созданная диполь-дипольными взаимодействиями ориентационная структура фиксировалась при полимеризации несущей среды. После этого образец помещался в постоянное магнитное поле. Реакция феррочастиц на внешнее магнитное поле в полимеризованном образце определялась неелевским механизмом релаксации магнитных моментов.

Аналитическое выражение для намагниченности описанной выше модели было получено с помощью вириального разложения с точностью до первого порядка по концентрации феррочастиц и интенсивности диполь-дипольного взаимодействия. Также было проведено компьютерное моделирование исследуемой системы методом Монте Карло (МК).

Результаты представлены на Рисунке 1 для двух систем, с разными значениями восприимчивости Ланжевена: (а) $\chi_L = 0.4$ и (б) $\chi_L = 1.6$. В обоих случаях предполагалось, что феррочастицы имеют внутреннюю магнитную анизотропию, определяемую безразмерным параметром $\sigma = \frac{E_A}{k_B T} = 5$ (E_A – магнитная энергия анизотропии, $k_B T$ – тепловая энергия). Полученные данные приведены в сравнении с намагниченностью Ланжевена и намагниченностью феррожидкости.

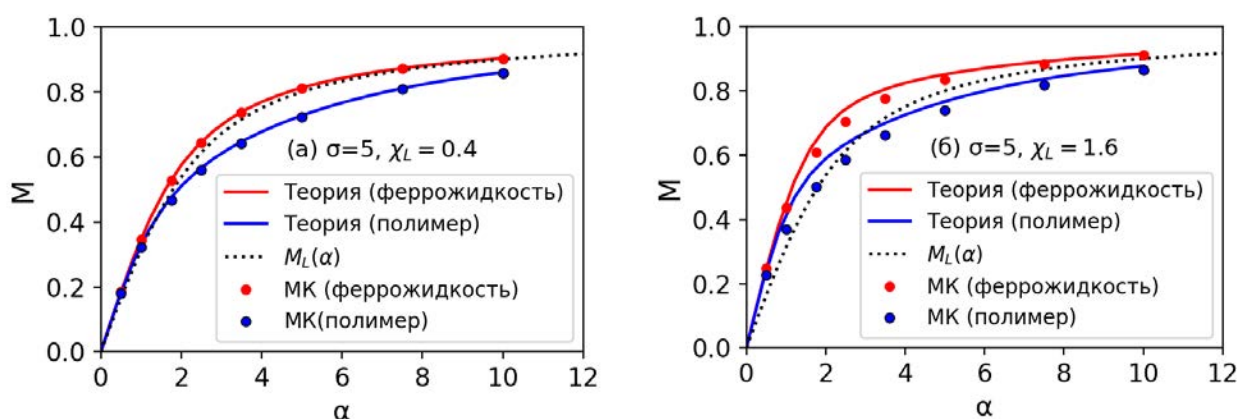


Рисунок 1 – Нормированная намагниченность M в зависимости от напряженности магнитного поля, определяемого параметром Ланжевена α . Линии – теория; точки – компьютерное моделирование.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках проекта развития регионального научно-образовательного математического центра «Уральский математический центр».

МЕТОД РАСЧЁТА ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПОВЕРХНОСТНО УПРОЧНЁННОЙ БАЛКЕ С НАДРЕЗАМИ В УПРУГОЙ И УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОЙ ПОСТАНОВКАХ

Радченко В.П., Шишкин Д.М.

Самарский государственный технический университет, Самара
radchenko.vp@samgtu.ru, shishkin.dim@yandex.ru

Работа посвящена исследованию влияния поперечных надрезов полукруглого, квадратного и V-образного профиля в поверхностно упрочнённой балке на распределение напряжённо-деформированного состояния в области концентрации напряжений.

Рассматривается балка квадратного сечения $100 \times 10 \times 10$ мм из сплава ЭП742, дробеструйное поверхностное упрочнение которой выполнялось по верхней грани. Одиночные надрезы заданного профиля для каждого отдельно рассматриваемого случая балки наносились после процедуры опережающего поверхностного пластического деформирования. Основная цель исследования заключалась в сравнительной оценке полученных результатов решения задач в упругой и упругопластической постановках для остаточных напряжений (ОН) в поверхностном слое вблизи концентраторов напряжений. Разработан алгоритм численного решения. На первом этапе по известной, полученной экспериментальным методом [1], компоненте $\sigma_x = \sigma_x(h)$ (h – глубина упрочнённого слоя, x – продольная координата по длине балки) определяются поля ОН и пластических деформаций (ПД) для гладкого «бездефектного» образца. Далее из условия равенства между пластическими и температурными деформациями в неоднородном температурном поле выполняется моделирование компонент тензора остаточных ПД (по произвольно выбранному закону изменения температуры) и вычисляются коэффициенты температурного расширения. На третьем этапе в упрочнённой гладкой балке моделируется надрез за счёт удаления части материала с наведёнными ОН и ПД, в результате чего происходит перераспределение напряжений. В заключение по полученным данным осуществляется конечно-элементное решение задач фиктивной термоупругости и термоупругопластичности, результаты которых отображают перераспределение ОН в области концентрации напряжений.

При сравнительном анализе результатов было установлено, что в наиболее острых концентраторах напряжений, форма профиля надреза которых близка к трещиноподобному виду, наблюдается большее расхождение между полученными значениями ОН в упругой и упругопластической постановках. С позиции механики разрушения этот факт обоснован наличием сингулярности упругих напряжений вблизи кончика дефекта. Учёт пластического течения в указанном месте даёт более адекватное описание напряжённого состояния, что подтверждается исследованием распределения ОН в поверхностном слое балки. Установлено, что на расстоянии 1 мм и более от кромки концентратора напряжений наблюдается сходимость решений в упругой и упругопластической постановках и по мере удаления от концентратора оба решения асимптотически приближаются к решению для бездефектной балки.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 19-01-00550А).

Литература

[1] Радченко В. П., Шишкин Д. М. Метод реконструкции остаточных напряжений в призматическом образце с надрезом полукруглого профиля после опережающего поверхностного пластического деформирования // Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Математика. Механика. Информатика. 2020. Т. 20, вып. 4. С. 478–492.

ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ЧАСТЕЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА АКСЕЛЕРОМЕТРА НА ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Ременников С.Е.¹, Шадт А.К.²

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь

² ПАО ПНППК, Пермь

s.remennikov@mail.ru, shadtak@pnppk.ru

Акселерометры нашли широкое применение в разных сферах жизни человека - мобильной и автомобильной индустрии, измерительных приборах, сейсмологии, строительстве, а также в спутниковых и навигационных системах, определяющих положение тела в пространстве и координат разнообразного рода летательных, надводных, подводных аппаратов, наземных транспортных средств и т.д. Для достижения точных и адекватных показаний, инженер может вносить изменения в какие-либо узлы акселерометра, а за счет малых габаритов прибора это может отражаться на его поведении в целом, также и на динамических характеристиках. Это влечет за собой получение неточных или неверных данных об изменяющихся ускорениях, что может привести к опасным ситуациям.

Данная работа направлена на определение изменения динамических характеристик системы после внесения изменений в конструктив чувствительного элемента, таких как: нанесение золотого напыления поверх упругой перемычки чувствительного элемента и смещения центра тяжести инерционной массы.

В работе выводится система дифференциальных уравнений [1]. Аналитическим и численным методами, решается динамическая задача о движении инерционной массы с двумя степенями свободы с последующим получением собственных форм и частот колебаний, инерционной массы [2]. Проводится исследование влияния золотого напыления, нанесенного поверх упругой перемычки чувствительного элемента, и исследование влияния смещения центра тяжести инерционной массы, на динамические характеристики системы.

В результате исследования инерционной массы в резонансных режимах было выявлено, что при изменении геометрии перемычек чувствительного элемента, в следствии нанесения золотого напыления, произошел рост собственных частот. Первая частота выросла на 3,2%, а вторая - на 2,1%. Также было получено критическое значение, при котором возможен выход из строя акселерометра, в следствии разрушения упругих перемычек, при отклонении точки центра тяжести вдоль оси x на расстояние $3.2 \cdot 10^{-4}$ м. Если же центр тяжести отклоняется в обратную сторону амплитуда уменьшается, а значит упругие перемычки не будут подвергаться опасным изгибам, но при этом возможно падение чувствительности акселерометра к изменяющимся ускорениям. Тогда получаемые данные с прибора могут быть неточными, а это в свою очередь отражается на работе внешних систем, что может вызвать опасные режимы.

Литература

- [1] Распопов В.Я. Микромеханические приборы: учебное пособие. – М.: Машиностроение, 2007. – 400 с.: ил.
- [2] Бидерман В.Л. Теория механических колебаний: Учебник для вузов. — М.: Высш. школа, 1980.— 408 с, ил.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭВОЛЮЦИИ МИКРОСТРУКТУРЫ НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА В ПРОЦЕССЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИИ ПРИ ГОРЯЧЕЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Роговой А.А., Салихова Н.К.

Институт механики сплошных сред УрО РАН – филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук, Пермь
rogovoy@icmm.ru, salikhova@icmm.ru

В работе рассмотрен конкретный технологический процесс получения заготовки заданных размеров, состоящий из двух этапов: охлаждения заготовки на воздухе при переносе ее от печи до деформирующего оборудования, и осадки до среднего диаметра ~ 1060 мм. Материал заготовки – жаропрочный никелевый сплав Waspaloy, который активно применяется в аэрокосмической промышленности для изготовления некоторых элементов авиационных газотурбинных двигателей, способных работать при высоких температурах. Исследовано влияние начального распределения температуры, полученного в ходе переноса заготовки от печи до оборудования, на изменения, которые происходят в микроструктуре сплава Waspaloy при деформировании. Время транспортировки – 45 сек., в результате поверхность слитка, однородно нагретого в печи до 1000°C , охлаждается на $\sim 50^{\circ}\text{C}$. Температура окружающей среды равнялась 20°C . Далее слиток осаживался между плоскопараллельными плитами: подвижной верхней плитой и вырезной неподвижной нижней. Скорость перемещения верхней плиты составляла 100 мм/с. Учитывался теплообмен заготовки с плитами и окружающей средой. Температура деформирующих плит принималась 400°C . Начальный размер зерна составлял 25 мкм. Силы трения, возникающие между рабочими плитами и торцевыми поверхностями слитка, описывались законом Зибеля с коэффициентом 0,3, что соответствует горячему деформированию с применением смазки. При таком значении коэффициента трения необходимый средний диаметр слитка достигается при средней осевой деформации 32,5%. В процессе осадки развивается динамическая рекристаллизация [1] и для описания кинетики этого процесса использовалась модель Джонсона-Мела-Аврами-Колмогорова. Моделирование проводилось в программном комплексе DEFORM–2D/3D.

В результате расчетов показано, что заготовка принимает в конце процесса осадки форму выпуклой одинарной бочки. Выявлены три зоны, отличающиеся микроструктурой и деформированным состоянием. Оказалось, что только небольшая часть материала вовлечена в процесс динамической рекристаллизации при осадке заготовки. В центральной ее части находится область интенсивной деформации, где происходит наибольшее изменение структуры материала, в отличие от периферии, где микроструктура практически не меняется. Учет охлаждения слитка на воздухе при транспортировке приводит к возрастанию усилия пресса, необходимого для осуществления процесса осадки, увеличению доли нерекристаллизованной части материала и среднего размера зерна в зонах затрудненной деформации, в центре образца происходит уменьшение среднего размера зерен. Также получены результаты моделирования, рассматриваемого технологического процесса, при начальной температуре заготовки, равной 1100°C .

Литература

[1] Горелик С.С., Добаткин С.В., Капуткина Л.М. Рекристаллизация металлов и сплавов. 3-е изд. – Москва, 2005. – 432 с.

МИКРОСТРУКТУРНАЯ МОДЕЛЬ ОПИСАНИЯ ПРОЦЕССА НАМАГНИЧИВАНИЯ ФЕРРОМАГНИТНОГО СПЛАВА

Роговой А.А., Столбов О.В., Столбова О.С.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

rogovoy@icmm.ru, sov@icmm.ru, sos@icmm.ru

Ферромагнитные сплавы, проявляющие эффект памяти формы (сплавы Гейслера), относятся к классу функциональных (умных) материалов. В мартенситном состоянии эти сплавы образуют множество магнитных доменов с разнонаправленными векторами намагниченности. Энергетически этим доменам выгодно расположиться так, что общая намагниченность материала в отсутствие внешних воздействий близка к нулю. Под действием приложенного внешнего магнитного поля стенки магнитных доменов начинают двигаться, векторы намагниченности вращаются, кроме этого происходит переориентация мартенситных вариантов [1].

В отличие от широко распространенных феноменологических моделей, микроструктурные модели позволяют явно учитывать физические процессы, происходящие в структурных элементах материала, не прибегая к многочисленным предположениям, необходимым для построения феноменологических моделей. Такая микроструктурная модель поведения ферромагнитного материала строится в настоящей работе. Она основывается на общей теории микромагнетизма, восходящей к работе Брауна [2], в которой вводится вектор спонтанной намагниченности, а равновесие рассматриваемой системы определяется минимумом полной магнитной энергии. В настоящей работе, описывающей поведение ферромагнитного материала в магнитном поле, полагалось, что полная энергия является суммой энергии Зеемана, энергии размагничивания, обменной энергии и энергии магнитокристаллической анизотропии. Минимум этой энергии (этого функционала) ищется с учетом ограничений, накладываемых на вектор спонтанной намагниченности и скалярный магнитный потенциал. Эта задача условного экстремума сведена к задаче безусловного экстремума с помощью метода множителей Лагранжа. Построены вариационные уравнения (слабая формулировка) и проведена их линеаризация, позволяющая отслеживать историю процесса и находить единственное решение в нелинейной задаче, функционал которой имеет несколько относительных минимумов. На основе полученных соотношений методом конечных элементов решена двумерная задача намагничивания элементарной ячейки (зерна поликристалла или монокристалла ферромагнитного материала) [3]. Продemonстрировано возникновение доменных стенок, определена их толщина, описана история их движения и взаимодействия (возникновение 360-градусных доменных стенок), построены картины распределения векторов намагниченности в стенках и доменах, а также кривые средней намагниченности макрообразца при приложении внешнего магнитного поля вдоль и поперек оси магнитокристаллической анизотропии зерна или монокристалла и под углом 45 градусов к этой оси.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 20-01-00031).

Литература

- [1] Ферромагнетики с памятью формы / А.Н. Васильев [и др.] // Успехи физических наук. – 2003. – Т. 173, № 6. – С. 577-607.
- [2] Brown W.F. Micromagnetism – New York, 1963. – 143 p.
- [3] Rogovoy A.A., Stolbov O.V., Stolbova O.S. The microstructural model of the ferromagnetic material behavior in an external magnetic field // Magnetochemistry. – 2021. – V. 7, N. 7. – P. 1-19.

РЕЖИМЫ С ОБОСТРЕНИЕМ В ЗАДАЧАХ ТЕМПЕРАТУРНОЙ КИНЕТИКИ МОЛОЧНОЙ ЖЕЛЕЗЫ

Роготнев А.А.^{1,2}, Никитюк А.С.², Баяндин Ю.В.², Наймарк О.Б.²

¹Пермский федеральный исследовательский центр УрО РАН, Пермь

²Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

rogotnev.a@icmm.ru, nas@icmm.ru, buv@icmm.ru, naimark@icmm.ru

Температурные показатели поверхности кожи человека давно используют для диагностики различных патологий. Тепловой паттерн поверхности тела человека может свидетельствовать о наличии патологических процессов, что связаны с различными формами нарушения кровотока, иннервации биологических тканей и изменениями метаболизма [1]. Так, например, для пораженной раком молочной железы изменится ее поверхностный температурный паттерн, который связан с васкуляризацией и метаболизмом в прилежащих тканях [2]. Метаболизм при раке связан с критической динамикой структурной трансформации в ДНК, и приводит к специфической кинетике распределения тепла и коррелированному поведению областей локализации тепла. Соответствие структурной трансформации сценариям самоорганизации может экспериментально наблюдаться в тканях в виде рядов флуктуаций температуры [3].

Модель метаболизма при раке молочной железы формулируется в виде модифицированного уравнения Пеннеса [4], с диссипативным членом, отражающим нелинейную необратимую динамику открытых комплексов в структуре ДНК, ответственную за качественные изменения в кинетике экспрессии [5]. Задавая данный член в нелинейном виде, и предполагая, что он порождает режимы с обострением, решили тестовую задачу, описанную в [6]. Результаты решения данной задачи демонстрируют применимость используемого подхода для описания температурной кинетики здоровой и пораженной раком молочной железы.

Работа выполнена при финансовой поддержке в рамках государственного контракта № АААА-А19-119013090021-5.

Литература

- [1] Кожевникова И.С., Панков М.Н., Грибанов А.В., Старцева Л.Ф., Ермошина Н.А. Применение инфракрасной термографии в современной медицине (обзор литературы) // Экология человека. – 2017. - № 2. – С. 39 – 46.
- [2] Gautherie M. Thermopathology of breast cancer: measurement and analysis of in vivo temperature and blood flow // Annals of the New York Academy of Sciences. – 1980. – V. 335, No 1. – P. 383–415.
- [3] Наймарк О.Б. Структурно-скейлинговые переходы и локализованные моды дисторсии в двойной спирали ДНК // Физическая мезомеханика. – 2006. – Т.9, №4. – С. 15–29.
- [4] Rogotnev A., Nikitiuk A., Naimark O. and Grishko V. Modeling of heat transfer in breast by modified Pennes equation // AIP Conference Proceedings. – AIP Publishing LLC, 2019. – V. 2167, No 1. – P. 020294.
- [5] Naimark O. Mesoscopic Cell Dynamics in Different Environment and Problem of Cancer // AIP Conference Proceedings. – AIP Publishing LLC, 2019. – V. 2167, No 1. – P. 020237.
- [6] Роготнев А.А., Никитюк А.С., Наймарк О.Б., Баяндин Ю.В. Метаболизм и пространственно-временная динамика локализации тепла при раке молочной железы // VII Всероссийская конференция с международным участием, посвященная памяти профессоров Г.З. Гершуни, Е.М. Жуховицкого и Д.В. Любимова «Пермские гидродинамические научные чтения»: Материалы конференции, Пермь, 22-24 октября 2020. – Пермь: ПГНИУ, 2020. – С. 333–336.

НЕЛИНЕЙНЫЙ МАГНИТНЫЙ ОТКЛИК ВЯЗКОУПРУГОГО ФЕРРОКОЛЛОИДА В ПОЛЕ СМЕЩЕНИЯ

Русаков В.В.^{1,2}, Райхер Ю.Л.¹

¹Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

²Пермский государственный технический университет, Пермь

vvr@icmm.ru, raikher@icmm.ru

Рассмотрена магнитодинамика вязкоупругого ферроколлоида в ситуации, когда система находится в постоянном магнитном поле (поле смещения), а слабое линейно-поляризованное переменное (зондирующее) поле вызывает вращательные качания наночастиц. Эти коллоидные частицы предполагаются магнитожёсткими и невзаимодействующими между собой. Для описания реологии дисперсионной среды использована феноменологическая модель Джеффриса. На основе уравнений Ланжевена, описывающих броуновское вращательное движение в указанной системе [1], выведена система уравнений, определяющих динамическую намагничённость и кинетику ориентации коллоидного ансамбля. Решение задачи получено методом эффективного поля, найдены: гармоники динамической магнитной восприимчивости, а также ориентационный отклик системы.

Анизотропия системы, обусловленная полем смещения, приводит к качественному изменению отклика системы. При параллельности зондирующего поля полю смещения в динамической намагничённости появляется вторая гармоника, а в ориентационном отклике – первая. Исследована зависимость этих «аномальных» откликов от амплитуды поля смещения и реологических параметров среды. При взаимной перпендикулярности приложенных полей магнитный отклик системы «аномальных» гармоник не содержит. Показано, что эффекты механического запаздывания (релаксация напряжений) существенно влияют на спектры откликов всех порядков. Наличие поля смещения по-разному влияет на амплитуды гармоник магнитодинамического отклика: в поперечной ситуации они монотонно убывают по мере роста постоянного поля, а в продольном случае интенсивности «аномальных» гармоник имеют максимумы в области умеренных полей. В пределе сильного поля смещения все отклики практически «замораживаются»: частицы, ориентация которых жёстко зафиксирована, не имеют возможности реагировать на слабое зондирующее воздействие.

Литература

- [1] Rusakov V.V., Raikher Yu.L., Perzynski R. Brownian motion in the fluids with complex rheology // Mathematical Modelling in Natural Phenomena. – 2015. – Vol. 10. – P. 1–43.

НЕИЗОТЕРМИЧЕСКАЯ ПОЛИМЕРИЗАЦИЯ ЭПОКСИДНОГО СВЯЗУЮЩЕГО АЭРОКОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Русаков С. В., Гилев В. Г.

Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь
rusakov@psu.ru, gvg@psu.ru

Полимерные материалы на основе эпоксидных смол находят широкое применение, как в технологических процессах, так и при создании различных конструкций на их основе. Освоение технологии полимеризации таких материалов является перспективным направлением исследований, которое открывает широкие возможности создания больших и малых изделий, в том числе непосредственно в космическом пространстве. Особые условия космоса: высокий вакуум, интенсивная космическая радиация, перепад температур требуют корректировки обычной технологии полимеризации, происходящих в земных условиях [1]. В частности, при неконтролируемых внешних условиях практически невозможно обеспечить постоянство температуры в ходе всего процесса полимеризации.

В настоящей работе приводятся результаты численно-экспериментальных исследований процессов полимеризации связующего в условиях кусочно-линейного изменения температуры реагирующей массы. При этом температура изменялась от 25 до 50 °С по линейному закону, далее процесс продолжался при постоянной температуре 50 °С.

В экспериментах использовалась эпоксидная композиция «холодного» отверждения: олигомер – эпоксидная смола *L*, отвердитель – *EPH* 161 сертифицированные к применению в конструкционных композиционных материалах авиационного назначения.

Контроль процесса полимеризации связующего осуществлялся реологическим методом. Измерения выполнены на ротационном реометре Physica MCR 501. Используемая геометрия: «конус-плита». Диаметр конуса $d = 25$ мм, угол $\alpha = 1^\circ$. Для изменения температурного режима использовалось специальное температурное устройство Н-PTD 200 на основе эффекта Пельтье. Толщина слоя раствора по его внешнему радиусу составляла 0.047 мм, что обеспечивало быстрое установление рабочей температуры в образце. Измерения выполнены в условиях сдвигового деформирования по гармоническому закону с частотой 1 Гц в режиме контроля деформации.

Изменение вязкости в процессе отверждения эпоксидных смол носит сложный характер, но в большинстве случаев чисто практический интерес представляет не весь диапазон изменения вязкости, а лишь критическая точка потери текучести: время затвердевания t^* . В ходе экспериментов были получены кривые изменения комплексной вязкости в зависимости от времени полимеризации. Измерения выполнены при разных скоростях нагрева реакционной массы в диапазоне от 0.2 до 1.2 град./мин. На основании полученных данных определялось время потери текучести по методике работы [2]. Построена математическая модель позволяющая с погрешностью не более 5-6% оценить время отверждения (перехода в гель фазу). Дополнительно определены эффективные значения кинетических параметров, при которых расчетное время потери текучести хорошо согласуется с экспериментальным.

Литература

- [1]. Kondyurin A. V., Rusakov S. V., Pestrenin V. M., Pestrenina I. V. Curing of large prepreg shell in solar synchronous Low Earth Orbit: Precession flight regimes // Acta astronautica, 2018, –N 151. –P.342–347 doi: 10.1016/j.actaastro.2018.06.029.
- [2]. Malkin A. Ja. and Kulichikhin S. G. Rheokinetics of curing // Adv. Polym. Sci. ,– 1991. – Vol. 101. – P. 217–257.

АНАЛИТИЧЕСКАЯ ФОРМУЛА ДИНАМИЧЕСКОЙ ВОСПРИИМЧИВОСТИ ФЕРРОЖИДКОСТИ В ПЕРЕМЕННОМ ПОЛЕ МАЛОЙ И СРЕДНЕЙ АМПЛИТУДЫ

Русанов М. С.¹, Зверев В. С.¹, Елфимова Е. А.¹

¹Институт естественных наук и математики, Уральский Федеральный Университет, Ленина 51, 620000 Екатеринбург, Россия.

rusanoff.mixail@yandex.ru

В работе получено явное аналитическое выражение для динамической восприимчивости феррожидкости в переменном поле малой и средней амплитуды. Главный акцент сделан на учете межчастичных диполь-дипольных взаимодействий.

Поиск аналитической формулы основывался на методе, предложенном в работе [1], где изучался динамический отклик невзаимодействующей системы дипольных твердых сфер на переменное поле произвольной амплитуды. Используя численные данные динамической восприимчивости [2], методом наименьших квадратов были получены формулы, определяющие положение максимума мнимой части восприимчивости ω_p , значение действительной части восприимчивости при малых частотах $\chi'(0)$ и отношение действительной и мнимой частей восприимчивости $k(\xi)$ в точке ω_p в зависимости от амплитуды переменного поля ξ и восприимчивости Ланжевена χ_L . Эти данные позволили получить следующие формулы для действительной $\chi''(\omega)$ и мнимой $\chi'(\omega)$ частей восприимчивости феррожидкости при преобладании броуновского механизма релаксации с характерным временем τ_B :

$$\begin{aligned}\chi'(\omega) &= \frac{\chi(0)}{1 + (\omega\tau_B/\omega_p)^2}, & \chi''(\omega) &= k''(\xi) \frac{\chi(0)\omega\tau_B/\omega_p}{1 + (\omega\tau_B/\omega_p)^2}, \\ \omega_p &= \sqrt{\left(1 - \frac{\chi_L}{3}\right)^2 + 0.0716\xi^2}, & k(\xi) &= 1 + \frac{0.1482\xi^2}{1 + 0.802\xi + 0.1338\xi^2}, \\ \chi(0) &= \left(\chi_L + \frac{\chi_L^2}{3}\right) \left(1 - \frac{0.0985\xi^2}{1 + 0.2598\xi + 0.102\xi^2}\right).\end{aligned}\quad (1)$$

Тестирование формул (1) на результатах численных расчетов восприимчивости феррожидкости [2] показало, что область применимости этих формул $\xi \lesssim 10, \chi_L \lesssim 1$. В настоящий момент идет работа по расширению области применимости формул динамической восприимчивости феррожидкости.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках проекта развития регионального научно-образовательного математического центра «Уральский математический центр».

Литература

[1] T. Yoshida, K. Enpuku Simulation and Quantitative Clarification of AC Susceptibility of Magnetic Fluid in Nonlinear Brownian Relaxation Region // Jpn. J. Appl. Phys E 48, (2009) 063117.

[2] М.С. Русанов, В.С. Зверев, Е.А. Елфимова Влияние амплитуды переменного магнитного поля на динамический отклик феррожидкости // Тезисы докладов научного семинара «Математическое моделирование свойств магнитных нанокмпозитов», (2020) 23.

https://umc.urfu.ru/fileadmin/user_upload/site_25894/Sbornik_tezisov_29-31.10.2020_.pdf

ОТКЛИК СФЕРОИДАЛЬНЫХ И МНОГОСЛОЙНЫХ МАГНИТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ВЕЗИКУЛ НА ПРИЛОЖЕННОЕ ПОЛЕ

Рыжков А.В.¹, Райхер Ю.Л.¹

¹Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

ryzhkov.a@icmm.ru, raikher@icmm.ru

Исследован отклик магниточувствительной везикулы (другое наименование – полимеросома [1]) на однородное магнитное поле. Указанные объекты являются биосовместимыми микроконтейнерами, разрабатываемыми для направленной доставки и контролируемого высвобождения терапевтических или диагностических веществ в клетках живого организма, равно как и для комбинированного тераностического воздействия и внутриклеточной хирургии. Полимерная мембрана везикулы насыщена магнитными наночастицами, что позволяет дистанционно управлять деформационным, структурным и магнитным откликом такого объекта с помощью внешнего магнитного поля. В настоящей работе использована расширенная модель, которая позволяет полнее рассматривать конформационное поведение полимеросом различной исходной структуры, что важно для проектирования таких капсул, придания им заданных свойств и, в конечном счете, их эффективного применения. В частности, рассмотрены сфероидальные мембраны [2], содержащие один слой из магнитных наночастиц, а также сферические многослойные везикулы [3]. Проведены численные эксперименты, результаты которых позволяют анализировать намагничивание полимеросом, структурирование наночастиц внутри их оболочек и вызванное полем формоизменение капсул.

Модель реализована в рамках крупнозернистой молекулярной динамики в программном обеспечении ESPResSo [4]. Капсула (везикула) представляется как ансамбль структурных единиц (в это число входят и полимерные частицы и наночастицы), связи между которыми описываются соответствующими потенциалами. Структурные единицы организованы в слоистую магнитополимерную оболочку так, чтобы эта система представляла собой конечный объект планируемого синтеза с соответствующими исходной формой и размером, числом магнитных слоев, концентрацией наночастиц в них и прочим. Стартовой точкой моделирования каждой конкретной системы является расчет ее равновесной конфигурации в отсутствие поля и затем – в поле конечной величины. В частности, указанная задача решена для однослойной магнитной полимеросомы, равновесной формой которой является эллипсоид вращения с отношением осей, равном двум. Результаты получены для трех вариантов направленности поля относительно осей эллипсоида: вдоль длинной оси, перпендикулярно ей и в диагональном направлении. Другая серия полученных решений описывает намагниченность и формоизменение сферической везикулы, содержащей в своей оболочке два и три слоя магнитных наночастиц. Получена кривая намагничивания полимеросомы, проанализировано изменение ее размеров и объема всего объекта, а также структура агрегатов, формируемых наночастицами под воздействием приложенного поля.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20-71-00045).

Литература

- [1] Oliveira H. et al. Magnetic field triggered drug release from polymersomes for cancer therapeutics // J. Control. Release. – 2013. – Vol. 169ю – P. 165–170.
- [2] Rikken R.S.M. et al. Shaping polymersomes into predictable morphologies via out-of-equilibrium self-assembly // Nature Commun. – 2016. – Vol. 7. – P. 12606.
- [3] Yang K. et al. Cooperative assembly of magneto-nanovesicles with tunable wall thickness and permeability for MRI-guided drug delivery // J. Am. Chem. Soc. – 2018. – Vol. 140. – P. 4666–4677.
- [4] Weik F. et al. ESPResSo 4.0 – an extensible software package for simulating soft matter systems // Eur. Phys. J. Special Topics. – 2019. – Vol. 227. – P. 1789–1816.

МАГНИТОФОРЕЗ В МАГНИТНЫХ ЖИДКОСТЯХ В НЕОДНОРОДНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ, СОЗДАВАЕМЫХ ОСЕВЫМИ МАГНИТНЫМИ СИСТЕМАМИ

Ряполов П.А.¹, Полунин В.М.¹, Баштовой В.Г.², Соколов Е.А.¹, Шельдешова Е.В.¹

¹Юго-Западный государственный университет, Курск

²Белорусский национальный технический университет

r-piter@yandex.ru

Исследован процесс магнитофореза в тонком слое МЖ при длительном воздействии неоднородного МП нескольких конфигураций. В осесимметричных магнитных системах с применением униполярных постоянных магнитов (МСО), способных создавать магнитное поле с напряженностью 500 кА/м в достаточно протяжённой области, экспериментально исследовано протекание процесса магнитофореза в образцах МЖ с различной микроструктурой. Эксперимент проводился с помощью метода фотофиксации динамики межфазной границы в плоской тонкой оптически прозрачной ячейке, заполненной МЖ, снизу которой закреплялся управляемый осветитель. В эксперименте по длительному (~30 суток) исследованию процесса магнитофореза в МЖ в магнитном поле, создаваемом МСО, установлено, что для образца МЖ, содержащего более крупные МНЧ ($d \sim 15$ нм), процесс магнитофореза протекает в 5 раз быстрее, чем в образце МЖ с более мелкими МНЧ ($d \sim 7$ нм). В случае монодисперсного приближения, без учета диффузионных процессов, для диаметра магнитных частиц, участвующих в процессе магнитофореза получено выражение, на основании которого по данным эксперимента построены зависимости размера МНЧ от времени выдержки, представленные на рисунке 1.

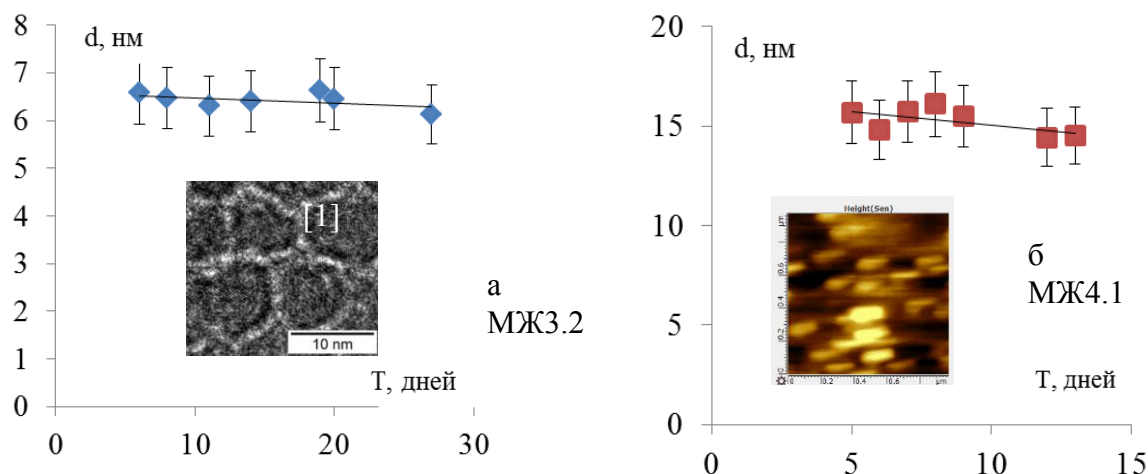


Рисунок 5. Зависимость среднего диаметра МНЧ МЖ, в сравнении с данными, полученными ПЭМ [1] и АСМ

Публикация подготовлена в рамках выполнения государственного задания на (номер 0851-2020-0035).

Литература

[1] Usadel, K. D. Frequency-dependent conversion of the torque of a rotating magnetic field on a ferrofluid confined in a spherical cavity / K. D. Usadel, A. Storozhenko, I. Arefyev, H. Nádasí, T. Trittel, R. Stannarius, P. Veit, A. Eremin // Soft matter. – 2019. – V. 15. – № 44. – P. 9018-9030.

ТВИСТОНЫ В ГРАФЕНОВЫХ НАНОЛЕНТАХ НА ПОДЛОЖКЕ

Савин А. В.¹, Корзникова Е. А.², Дмитриев С. В.²

¹Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова, Москва

²Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, Уфа
elena.a.korznikova@gmail.com

Скрученные наноленты из двумерных материалов обладают множеством необычных свойств, настраиваемых путем изменения угла закручивания, например, электро- и теплопроводность, химические свойства и устойчивость к короблению. При взаимодействии скрученной наноленты с подложкой можно наблюдать новые интересные явления. В работе представлены результаты классического молекулярно-динамического исследования графеновой наноленты, закрученной вокруг своей длинной оси и взаимодействующей с графитовой подложкой. Ван-дер-ваальсовы взаимодействия с подложкой приводят к локализации скручивания и образованию топологических солитонов, называемых твистонами. Топологический заряд твистона q , полученный закруткой на угол β кратный π можно определить как $q = \beta/\pi$; он может быть положительным или отрицательным. Твистоны могут двигаться по наноленте практически не излучая энергию в виде малоамплитудных фононов [1]. Описаны сценарии столкновений твистонов в зависимости от их топологического заряда и ширины наноленты. В узких нанолентах твистоны сталкиваются практически упруго, сохраняя свой профиль и скорость после столкновения, при этом неупругость столкновений возрастает с увеличением ширины наноленты. Полученные результаты способствуют пониманию поведения нанолент из двумерных материалов на подложке.

Литература

[1] Savin A. V., Korznikova E. A., and Dmitriev S. V. Twistons in graphene nanoribbons on a substrate. 2020 Phys. Rev. B 102, 245432

СЛАБОНЕЛИНЕЙНЫЕ КОНВЕКТИВНЫЕ РЕЖИМЫ В ГОРИЗОНТАЛЬНОМ СЛОЕ С ГРАНИЦАМИ НИЗКОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ, С ВЯЗКОСТЬЮ, ЗАВИСЯЩЕЙ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ, ДЛЯ СЛУЧАЯ, КОГДА ОДНА ИЗ ГРАНИЦ СВОБОДНА ОТ КАСАТЕЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

Садиллов Е.С.¹

¹Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

sadilove@icmm.ru

В данной работе исследовались слабонелинейные конвективные режимы для горизонтального слоя с границами низкой теплопроводности и с вязкостью, зависящей от температуры. Было рассмотрено два случая. В первом случае верхняя граница считалась свободной от касательных напряжений, а нижняя – твердой. Во втором же случае – верхняя граница считалась твердой, а нижняя – свободной от касательных напряжений. Зависимость вязкости от температуры предполагалась линейной.

Задача изучалась с помощью метода многих масштабов. Решение в основном порядке малости искалось в виде суперпозиции валов, направленных в разных направлениях. В результате использования метода была получена система амплитудных уравнений, для изучения которой использовалось вторичное разложение по малому параметру. В результате были получены условия существования стационарных решений, а также границы их устойчивости.

Были исследованы валы, квадратные, гексагональные и двенадцатиугольные ячейки. Было обнаружено, что для случая отсутствия зависимости вязкости от температуры для данных задач наблюдается жесткое возбуждение гексагональных ячеек. Остальные конвективные структуры при этом возбуждаются мягко. В то время, как для случая обоих твердых границ, как было изучено ранее [1], в отсутствие зависимости вязкости от температуры, гексагональные ячейки, а также другие конвективные структуры, возбуждаются мягко. При наличии температурной зависимости вязкости можно подобрать такое значение коэффициента, отвечающего за зависимость вязкости от температуры, что все конвективные структуры будут возбуждаться мягко. Если же взять значения температурного коэффициента вблизи данного значения, то задачу исследования конвективных структур математически можно свести к задаче для обоих твердых границ с пересчетом коэффициента температурной зависимости вязкости. Т.е. при этом устойчивыми могут быть только гексагональные и квадратные ячейки, а остальные структуры будут неустойчивыми. При этом при малых надкритичностях (и подкритичностях) гексагональные ячейки устойчивы всегда, а область устойчивости квадратных ячеек ограничена. При достаточно малых числах Прандтля для немалых надкритичностей возникает неустойчивость по отношению к возмущениям с ненулевой вертикальной завихренностью, что иногда называют фазовым хаосом.

Литература

[1] Sadilov E.S., Lyubimov D.V. Weakly nonlinear convective regimes in a horizontal fluid layer with poorly conducting boundaries and temperature-dependent viscosity – European Journal of Mechanics, B/Fluids, 2016. – pp. 70-85.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО УДАРНОГО НАГРУЖЕНИЯ МНОГОСЛОЙНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ СТЕКЛОВОЛОКНА С ЗАЩИТНЫМ ПОКРЫТИЕМ

Саженок Н.А.¹, Нихамкин М.Ш.¹, Воронов Л.В.¹, Семенов С.В.¹, Куракин А.Д.¹

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
sazhenkov_na@mail.ru, nikhamkin@mail.ru, leonid-v-voronov@yandex.ru

Одним из перспективных методов повышения сопротивляемости полимерных композиционных материалов к высокоскоростному повреждению является применение защитных противоударных покрытий. При этом на протяжении двух последних десятилетий заметную популярность среди таких покрытий приобретают полимочевины. Известны работы, посвященные оценке эффективности защитных покрытий на основе полимочевин в условиях нагружения полимерных композиционных материалов взрывом [1-3], а также в условиях высокоскоростного ударного нагружения металлических пластин стальными пробойниками [4] и низкоскоростного соударения композитных пластин на основе алюминия с посторонними предметами [5,6]. Результаты вышеупомянутых работ указывают на способность защитных покрытий из полимочевин к повышению баллистического предела исследуемых материалов и конструкций, однако механизм этого эффекта остаётся не до конца изученным.

Настоящая работа посвящена изучению влияния защитного покрытия из полимочевины на характеристики баллистической стойкости композиционного слоистого материала на основе стекловолокна. В ходе экспериментального исследования двенадцать прямоугольных образцов размерами 200x300x8,5 мм были подвергнуты ортогональному ударному нагружению стальным пробойником с диаметром 23,8 мм и массой 54,7 грамм в диапазоне скоростей соударения от 80 до 150 м/с. В работе определено влияние защитного покрытия толщиной 1,2 мм на величину баллистического предела образцов. Процесс соударения фиксировался при помощи видеосъемки на скорости 45,000 кадров в секунду. Было показано, что применение защитного покрытия на основе полимочевины позволяет повысить баллистический предел образца на 18% при увеличении его массы всего на 7%.

С помощью метода корреляции цифровых изображений, были получены поля динамических деформаций и перемещений на тыльной поверхности образца для наименьшей реализованной в эксперименте скорости соударения - 81,2 м/с. Представленные экспериментальные данные могут быть использованы для идентификации и подтверждения адекватности разрабатываемых численных моделей процесса соударения слоистых полимерных композиционных материалов со стальными пробойниками.

Литература

- [1] Davidson J.S, Fisher J.W, Hammons M.I, Porter J.R, Dinan R.J. Failure mechanisms of polymer-reinforced concrete masonry walls subjected to blast. J. Struct. Eng. 2005; v.131, №1, pp.194-205.
- [2] Szafran J. Matusiak A. Polyurea coating systems: definition, research, applications. XXII LSCE –2016 Monograph from Scientific Seminar, 2016
- [3] Iqbal N., Sharma P.K., Kumar D., Roy P.K. Protective polyurea coatings for enhanced blast survivability of concrete. Construction and Building Materials. 175 (2018) 682–690.
- [4] Xue L., Mock Jr.W., Belytschko T. Penetration of DH-36 steel plates with and without polyurea coating. Mechanics of Materials 42 (2010) 981–1003.
- [5] Mohotti D., Ngo T., Raman S.N., Ali M., Mendis P. Plastic deformation of polyurea coated composite aluminum plates subjected to low velocity impact. Materials & Design. Volume 56, 2014, Pp. 696-713
- [6] Mohotti D., Ngo, Tuan R., Sudharshan N., Mendis P. Analytical and numerical investigation of polyurea layered aluminium plates subjected to high velocity projectile impact. Materials and Design 82 (2015) pp. 1-17.

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО НАТЯГА КОЛЕЦ ПОДШИПНИКА В ОПОРЕ РОТОРА ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Сальников К.М.¹, Яковкин В.Н.²

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь

²АО «ОДК-Авиадвигатель», Пермь

salnikov_kostya@list.ru, jakovkin88@mail.ru

В авиастроении, как и в любой современной развивающейся области, есть некоторые перспективные направления для развития отрасли. Примером может быть – уменьшение расхода топлива, вследствие чего повышается экологичность перелетов, уменьшение шумового загрязнения, аэродинамика, вибрационная устойчивость, уменьшение стоимости технического обслуживания, и ещё многое другое.

Самой нагруженной частью газотурбинного двигателя (ГТД) является его роторная составляющая – это, например, лопатки, вал, внутреннее кольцо подшипника и тела качения. Также высоконагруженными элементами являются – внешние кольца подшипников и подшипниковые опоры.

В данной работе рассматривается соединение внутреннее кольцо подшипника – вал. Внутреннее кольцо на режиме нагружено силами от натяга на вал, центробежными силами, силами от температурного расширения вала, радиальными и осевыми нагрузками от тел качения. При раскрытии стыка между кольцом и валом кольцо перестает быть нагруженными от посадки на вал, но при этом увеличивается восприятие кольцом нагрузок от центробежных сил и силами от пробегания тел качения (шарики, ролики, сепаратор), которые передают радиальные и осевые нагрузки. С другой стороны, чрезмерный натяг кольца на вал (более 60 мкм), может привести к разрушению кольца. Поэтому выбор натяга внутреннего кольца на валу должен подбираться из учёта сохранения плотности посадки и условий прочности кольца, иными словами необходим подбор оптимального значения.

Для подшипников газотурбинных двигателей применяют высокоточные подшипники из прочных сталей, насквозь прокаливаемого типа, например, ЭИ347-Ш, ШХ15-Ш, М50, твердостью сопоставимой с режущим инструментом. Обозначенные подшипниковые стали не в состоянии длительно и надёжно работать при больших напряжениях растяжения. Также необходимо применять дополнительные способы упрочнения, например, дуплексное упрочнение подшипниковых сталей — процесс дополнительного упрочнения поверхностного слоя [1].

Таким образом, в работе определено значение монтажного натяга, которое необходимо обеспечить для предотвращения зазора в соединении деталей при максимальном режиме работы ГТД [2]. Отработана модель для проведения расчета напряженно-деформированного состояния с применением конечно-элементного пакета ANSYS [3]. Адаптирована теория толстостенных оболочек для определения напряжений в таком технологическом процессе как посадка деталей с натягом, при заданных условиях.

Литература

[1] Stive ooi and h.k.d.h. bhadeshia. Duplex hardening of steels for aeroengine bearings. Isij international, Vol. 52 (2012), no. 11, pp. 1927-1934

[2] Дибир А.Г., Макаров О.В., Пекальный Н.И., Юдин Г.И., Гребенников М.Н. Практические расчеты на прочность конструктивных элементов. – Учеб. пособие. – Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2007. – 102 с.

[3] Бруйка В.А. Инженерный анализ в ANSYS Workbench: Учеб. пособ. / В.А. Бруйка, В.Г. Фокин, Е.А. Солдусова, Н.А. Глазунова, И.Е. Адеянов. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2010. – 271с.

ВЛИЯНИЕ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ АНОМАЛИЙ НА БЕЗОПАСНОЕ ВЕДЕНИЕ ГОРНЫХ РАБОТ

Самоделкина Н.А.

Горный институт УрО РАН, Пермь
samodelkina@mi-perm.ru

Ограничения на параметры ведения горных работ в пределах участков развития аномалий в строении водозащитной толщи (ВЗТ), зачастую не имеют строгого геомеханического обоснования. Это связано, как с отсутствием достоверной информации о пространственном положении аномалий и их механических характеристик, так и определенной сложностью адекватной постановки и решения задач данного класса.

В настоящей работе рассматривается аномалия в строении ВЗТ, состоящей из трех слоев: нижнего (ВЗТ₁), среднего (ВЗТ₂) и верхнего (ВЗТ₃), в виде зоны выклинивания ВЗТ₃ и ВЗТ₂. При ведении горных работ на участках выклинивания ВЗТ₃ и ВЗТ₂ существует потенциальная возможность раскрытия контакта между ВЗТ₁ и ВЗТ₂. В этом случае образуется гидравлическая связь водоносных горизонтов с кровлей ВЗТ₁, что приводит к уменьшению мощности ВЗТ на суммарную мощность ВЗТ₃ и ВЗТ₂.

Анализ опасности подработки аномалий проводился при различных уровнях техногенного воздействия на них горных работ, которые обобщенно определялись максимальными оседаниями земной поверхности. В расчетах варьировалось пространственное положение геологической аномалии над выработанным пространством.

Контакт между ВЗТ₂ и ВЗТ₁ в расчетах моделировался элементами Гудмана. Характер деформирования контакта определялся кусочно-линейной аппроксимацией типовой диаграммы его нагружения. Предельное сопротивление сдвигу вычислялось согласно уравнению Кулона.

Условием разуплотнения контакта (явление дилатансии) являлось выполнение неравенства $U > mU_p$, где U - горизонтальное смещение берегов контакта; U_p - горизонтальное смещение соответствующее пиковой прочности контакта.

Численная реализация проводилась методом конечных элементов. Упругопластический характер деформирования подработанного массива учитывался путем последовательных приближений, основанных на применении метода переменных параметров упругости

По результатам выполненных исследований построены номограммы, регламентирующие параметры ведения горных работ в зонах выклинивания ВЗТ₃ и ВЗТ₂.

УПРАВЛЕНИЕ ПРИ ПОМОЩИ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ КОНВЕКЦИЕЙ В ТОНКОЙ ПЛЕНКЕ ЖИДКОСТИ НА НАГРЕТОЙ ПОДЛОЖКЕ

Самойлова А.Е.¹, Непомнящий А.А.²

¹Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь

²Технион – Израильский Технологический Институт, Израиль, Хайфа

samoilova@psu.ru, nepom@technion.ac.il

Исследование посвящено термокапиллярной неустойчивости, которая возникает в тонкой пленке жидкости, помещенной на нагретую твердую подложку [1]. В случае, когда теплопроводность жидкости оказывается значительно больше теплопроводности подложки и теплопроводности окружающего газа, неустойчивость носит длинноволновый характер. Такая неустойчивость хорошо изучена, как с точки зрения линейного анализа, так и нелинейного развития конвекции [1-3].

Мы изучаем управление конвективной неустойчивостью в тонкой пленке при помощи обратной связи. Принцип этого управления основан на ослаблении потока жидкости, вызванного термокапиллярным эффектом. Предполагается, что система оснащена датчиками, способными измерять температуру на свободной поверхности пленки (которая может деформироваться). Пропорционально отклонению значения температуры от равновесного изменяется теплоток через подложку при помощи актуаторов. Таким образом, мы управляем количеством тепла, поступающим в систему, и ослабляем/ усиливаем движение жидкости. Мы рассматриваем два варианта связи между датчиками и актуаторами: линейную и нелинейную (квадратичную).

Линейная обратная связь позволяет управлять порогом возбуждения конвекции через изменение эффективного коэффициента теплоотдачи со свободной поверхности [4]. Контроль за температурой свободной поверхности позволяет подавлять как стационарные, так и колебательные возмущения, которые без контроля приводят к развитию возмущений.

Нелинейная обратная связь влияет на нелинейное развитие возмущений, которое приводит к таким явлениям, как жесткое возбуждение неустойчивости, формирование упорядоченных структур на поверхности пленки [5]. Известно, что жесткое возбуждение конвекции в тонкой пленке приводит к разрыву пленки. При помощи контроля с квадратичной обратной связью можно полностью подавить подкритические возмущения. В области мягкого возбуждения конвекция чаще всего возбуждается в виде бегущих валов [1]. При помощи контроля с квадратичной обратной связью можно реализовать такие экзотические периодические структуры, как стоячие валы, бегущие квадраты и стоячие квадраты.

Литература

- [1] S. Shklyaev, M. Khenner and A. A. Alabuzhev (2012) Long-wave Marangoni convection in a thin film heated from below, Phys. Rev. E 85, 016328
- [2] A. Nepomnyashchy, I. Simanovskii, and J.C. Legros (2012), Interfacial Convection in Multilayer Systems, Second Edition. Springer, New York
- [3] A. E. Samoilova and N. I. Lobov (2014) On the oscillatory Marangoni instability in a thin layer heated from below, Phys. Fluids 26, 064101
- [4] A.E. Samoilova, A. Nepomnyashchy (2019) Feedback control of Marangoni convection in a thin film heated from below, J. Fluid Mech. 876, 573.
- [5] A. E. Samoilova and A. Nepomnyashchy (2020) Nonlinear feedback control of Marangoni wave patterns in a thin film heated from below, Physica D 412, 132627

БИОМЕХАНИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАРУШЕНИЙ ПРИКУСА НА СОСТОЯНИЕ ШЕЙНОГО ОТДЕЛА ПОЗВОНОЧНИКА

А.О. Сахнова¹, В.Н. Никитин¹, Ю.И. Няшин¹

¹Пермский Национальный Исследовательский Политехнический Университет, Пермь
efemera2012@yandex.ru

Цель работы - построение биомеханической модели влияния изменения жевательных усилий при коррекции прикуса на усилия в шейном отделе позвоночника. Одним из этапов исследования является диагностика снимков ТРГ (телерентгенограмма) у пациентов с нарушениями прикуса до ортодонтического лечения и после, которые расшифровываются с помощью специальной методики, позволяющей определить соотношения между цефалометрическими плоскостями, и, соответственно, отклонение фактических параметров от нормы. Снимок ТРГ в сагитальной плоскости также включает в себя часть шейного отдела позвоночника. Изгиб шейного отдела позвоночника на снимках до ортодонтического лечения и после различается. На данный момент не существует таких параметров, которые характеризовали бы кривизну шейного отдела на снимках ТРГ, и которые учитывались бы при расшифровке снимков и дальнейшем выборе метода лечения. Для определения параметра, характеризующего кривизну шейного отдела позвоночника, был рассмотрен снимок ТРГ пациента до лечения с выраженным нарушением прикуса. На данном снимке были проведены цефалометрические плоскости. Экспериментально были определены координаты заднего края тел позвонков, через которые проходит кривая ЛЗКТП, используемая при расшифровке рентгенограммы шейного отдела позвоночника.

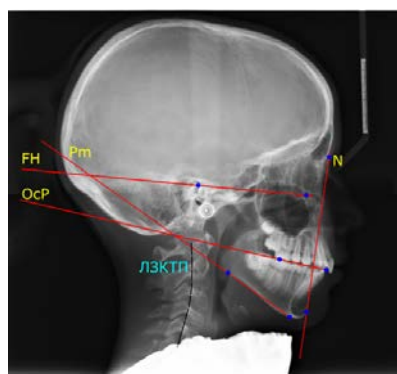


Рис.1. Пациент до ортодонтического лечения, пол Ж. OcP – окклюзионная плоскость, FH – Франкфуртская горизонталь, Pm – плоскость основания нижней челюсти, N – лицевая плоскость, ЛЗКТП – линия заднего края тел позвонков.

Проведена аппроксимация данной экспериментальной кривой методом наименьших квадратов в программном пакете Wolfram Mathematica. Получены коэффициенты, характеризующие кривизну шейного отдела позвоночника. На основании полученных результатов предлагается ввести новый антропометрический параметр – радиус кривизны шейного отдела позвоночника.

Литература

- [1] Р. Славичек. Жевательный орган. Функции и дисфункции / Р. Славичек; пер. А. Островский, Е. Ханин, Б. Яблоновский; науч. ред. Н. Волосок, М. Антоник, - Москва, - изд. дом «Азбука стоматолога», 2008.
- [2] Ишмурзин П.В. Дисфункция височно-нижнечелюстного сустава, ассоциированная с зубочелюстными аномалиями у лиц молодого возраста: принципы и методы ортодонтической коррекции: автореф. дис. ... д-ра мед. наук / Ишмурзин Павел Валерьевич. - Пермь, 2013. - 46 с.

РАЦИОНАЛЬНАЯ ТЕРМОДИНАМИКА. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОЙ ВОЛНЫ

Свистков А.Л., Комар Л.А., Беляев А.Ю.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
svistkov@icmm.ru, komar@icmm.ru, belyaev@icmm.ru

Для решения большинства практических задач используется линейная термодинамика. Но она ограничена рамками предположения о линейной связи между термодинамическими потоками и термодинамическими силами. Имеются ситуации, когда такие ограничения не позволяют исследовать процессы. Поэтому требуется использовать более общую теорию. Имеется две школы термодинамики, позволяющие с более общих позиций формулировать модели явлений в сплошной среде [1]. Это обобщенная термодинамика и рациональная термодинамика. В докладе рассматриваются особенности построения определяющих уравнений в рамках рациональной термодинамики для деформируемой упругой среды с релаксирующим изменением теплового потока. Обсуждаются возможные варианты определяющих уравнений для анализа термоупругого поведения материала в условиях конечных деформаций.

При использовании термодинамики с релаксирующим потоком тепла могут быть получены решения, которые невозможны в моделях линейной термодинамики. В первую очередь можно отметить, что снимается парадокс бесконечной скорости распространения в сплошной среде тепла. Возможны ситуации, когда тепло передается из холодных областей в горячие. Происходит это тогда, когда удастся мгновенно изменить поле температур, а тепловой поток не успевает быстро перестроиться. При этом второй закон термодинамики в формулировке неравенства Клаузиуса-Дюгема выполняется. Интересен случай, когда наблюдается возможность волнового изменения температуры среды.

Многие авторы исходят из предположения, что релаксация теплового потока должна быть учтена в особенностях записи выражения массовой плотности энтропии. В работе показано, что рациональная термодинамика допускает ситуации, когда от потока тепла зависит внутренняя энергия материала, а энтропия не зависит от потока тепла. При этом неравенство Клаузиуса-Дюгема остается справедливым. Важным следствием является факт, что напряжения в изотропном упругом материале должны зависеть не только от температуры, кратностей удлинений и ортонормированной тройки собственных векторов левого тензора растяжений, но и от теплового потока. Это требуется учитывать при решении термоупругих задач. В качестве примера рассматривается появление и распространение в материале тепловой волны при ионно-плазменной обработке полимерного материала.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации. Регистрационный номер: АААА-А20-120022590044-7.

Литература

[1] Jou D. Relationships between rational extended thermodynamics and extended irreversible thermodynamics // Phil. Trans. R. Soc. 2020. A 378: 20190172. <http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2019.0172>

АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОБСТВЕННЫХ ЧАСТОТ КОЛЕБАНИЙ ВЯЗКОУПРУГОЙ КОНСТРУКЦИИ ИЗ МАТЕРИАЛА С ЧАСТОТНО- ЗАВИСИМЫМИ МЕХАНИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Севодина Н.В., Юрлова Н.А., Ошмарин Д.А.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
natsev@icmm.ru, yurlova@icmm.ru, oshmarin@icmm.ru

Анализ и оптимизацию диссипативных характеристик вязкоупругих конструкций наиболее эффективно проводить на основе решения задачи о собственных колебаниях, которая при помощи метода конечных элементов сводится к алгебраической проблеме собственных значений. Результатом решения этой проблемы является спектр комплексных собственных частот колебаний, действительная часть у которых представляет собой частоту, а мнимая – показатель демпфирования.

Исследования динамического поведения конструкций в настоящее время активно проводятся с помощью алгоритмов, в той или иной мере реализованных в коммерческих пакетах программ инженерных расчетов, реализующих метод конечных элементов, (MatLab, ANSYS, Abaqus, MSC NASTRAN и т.д.). Однако решение задачи о собственных колебаниях вязкоупругих конструкций, материал которых описывается наследственной теорией вязкоупругости на основе комплексных динамических модулей, изменяющихся независимо друг от друга, стандартными методами в пакете ANSYS невозможно.

Более того, в том случае, когда характеристики вязкоупругого материала зависят от частоты колебаний, то напрямую воспользоваться каким-либо методом для решения алгебраической проблемы собственных значений для матрицы с переменными коэффициентами также не представляется возможным.

При выборе алгоритма решения алгебраической проблемы собственных значений необходимо учитывать большую размерность алгебраической задачи, возможность решения алгебраической проблемы комплексных собственных значений. Следует отметить, что для рассматриваемых задач имеет смысл решать только частичную проблему собственных значений, то есть, определять не весь спектр собственных частот, а только какую-то его часть. Последнее обстоятельство выдвигает жесткое условие, состоящее в том, что собственные значения должны быть гарантированно определены либо в заданном интервале, либо в требуемой последовательности, например, в порядке возрастания действительных частей в случае комплексных собственных значений.

В данной работе предлагается алгоритм решения задачи о собственных колебаниях вязкоупругих конструкций, материал которых описывается при помощи комплексных частотно-зависимых динамических модулей, основанный на применении метода Мюллера с различными сценариями выбора начальных приближений, и позволяющий использовать стандартные процедуры, реализованные в пакете прикладных программ ANSYS. На примере плоской конструкции, в составе которой есть элемент, выполненный из материала с частотно-зависимыми свойствами различного типа (убывающие или возрастающие с ростом частоты внешнего воздействия), показана неправомерность замены материала такого элемента на частотно-независимый материал.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-01-00158_а.

ПРОБЛЕМА ЗАМЫКАНИЯ В КАСКАДНОЙ МОДЕЛИ ТУРБУЛЕНТНОЙ ВЯЗКОСТИ ДЛЯ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ

Селуков Д.Г.¹, Степанов Р.А.¹

¹Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
selukov.d@icmm.ru, rodion@icmm.ru

Потребность в моделировании турбулентных течений встречается в широком кругу прикладных и фундаментальных задач механики жидкости и газа. Решение уравнения Навье-Стокса для таких задач требует все больших вычислительных ресурсов при большем увеличении интенсивности рассматриваемого течения, поскольку необходимо разрешать все меньшие пространственные и временные масштабы. В настоящее время продолжают развиваться подходы (LES, RANS и т.п.), в рамках которых полный расчет выполняется только для крупномасштабного (среднего) поля скорости, при этом влияние мелкомасштабного поля учитывается с привлечением феноменологических моделей. В качестве такой модели можно использовать каскадные модели турбулентности, которые описывают распределение энергии пульсаций скорости по масштабам. Главная особенность моделей этого класса заключается в динамическом воспроизведении спектральных распределений в инерционном (включая колмогоровский закон « $-5/3$ ») и диссипативном интервале масштабов. В данной работе рассматриваются различные подходы к решению проблемы замыкания, а именно сопряжения турбулентной вязкости, входящей в уравнение среднего поля, и переменных каскадной модели турбулентности.

Возможность использования каскадных моделей для моделирования течения на подсеточных масштабах давно привлекает внимание. На первых этапах эта идея было реализована в виде вычисления коэффициентов турбулентной диффузии различных полей магнитоконвекционного течения при условии однородности и изотропности турбулентности [1]. С тех пор аппарат каскадных моделей был существенно расширен на случай более сложных конфигураций [2]. Ключевым этапам построения новых моделей остается проработка двух основных частей: определяющее соотношение для турбулентной вязкости, зависящей от пульсаций скорости различных масштабов, и специфическая для каскадных моделей составляющая, которая задает обратную связь – воздействие крупномасштабного поля на мелкомасштабное.

В данной работе рассматривается течение Пуазейля при числах Рейнольдса до 10^5 . Использована спиральная каскадная модель [3]. Рассмотрены различные способы замыкания системы на основе принципа баланса потоков кинетической энергии между крупномасштабным и мелкомасштабным полем. Проведен сравнительный анализ этих подходов на сериях численных экспериментов, на примере показаны их преимущества и недостатки.

Литература

- [1] Решетняк М.Ю., Соколов Д.Д., Фрик П.Г. Каскадные модели турбулентности для жидкого ядра земли. *ДАН (Геофизика)*, 2002, 387, 8, 988-991.
- [2] Plunian F., Stepanov R., Frick P., Shell models of magnetohydrodynamic turbulence, *Physics Reports*, Volume 523, Issue 1, 2013, Pages 1-60.
- [3] Степанов Р.А., Фрик П.Г., Шестаков А.В. О спектральных свойствах спиральной турбулентности. *Изв. РАН. МЖГ*. 2009. № 5. С. 33-44.

АНАЛИЗ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ПРИ МОНИТОРИНГЕ ФОРМИРОВАНИЯ ЛЕДОПОРОДНЫХ ОГРАЖДЕНИЙ СТВОЛОВ ШАХТ

Семин М.А., Паршаков О.С., Пугин А.В.

Горный институт УрО РАН, Пермь

seminma@inbox.ru

Наиболее широко распространенным на сегодня специальным способом проходки горных выработок в обводненных грунтах и породах является искусственное замораживание. В результате применения этого способа вокруг проектируемой горной выработки образуется ледопородное ограждение, препятствующее проникновению подземных вод при последующем строительстве горной выработки, а также служащее для упрочнения стенок горной выработки до возведения постоянной бетонной крепи.

Существующая нормативная литература требует проведения непрерывного мониторинга искусственного замораживания горных пород. При строительстве шахтных стволов мониторинг искусственно замораживаемого породного массива осуществляется, прежде всего, с помощью одной или нескольких контрольно-термических скважин, по глубине которых с заданной периодичностью производится измерение температуры. Далее по измеренным температурам производится восстановление поля температур во всем замораживаемом породном массиве, определение фактических границ ледопородного ограждения. Восстановление поля температур во всем породном массиве осуществляется посредством решения коэффициентной обратной задачи Стефана, заключающейся в калибровке значений теплофизических свойств породного массива (параметров тепловой модели) так, чтобы наилучшим образом удовлетворить измеренным температурам в местах расположения контрольно-термических скважин [1].

Опыт показывает, что откалиброванные параметры тепловой модели могут существенно отличаться от своих исходных значений, определяемых в результате лабораторного анализа образцов керна. Это связывается как с погрешностью исходных данных, так и с допущениями, закладываемыми в модель, используемую при выполнении калибровки. В настоящем исследовании проводится анализ отклонений откалиброванных параметров тепловой модели от своих начальных значений для нескольких строившихся стволов шахт. В качестве таких параметров приняты теплопроводности пород в зонах льда и охлаждения, а также массовая влажность пород. Калибровка осуществлялась с использованием двумерной модели кондуктивного теплопереноса, учитывающей теплоту фазовых превращений влаги. Изначально в модели также приняты допущения об отсутствии миграции поровых вод и отсутствии деформирования замораживаемого породного массива из-за расширения замороженной влаги. Проведен анализ влияния этих допущений на отклонения параметров моделей в результате их калибровки для пород различного типа. Также сделан анализ влияния неточности исходных данных на откалиброванные значения параметров модели. Сделан ряд практических выводов о целесообразности принятия модельных гипотез об отсутствии миграции поровых вод и отсутствии деформирования пород при мониторинге поля температур породного массива при его искусственном замораживании.

Литература

[1] Левин Л. Ю., Семин М. А., Зайцев А. В. Калибровка теплофизических свойств породного массива при моделировании формирования ледопородного ограждения строящихся шахтных стволов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2019. – №. 1. – С. 172-184.

НЕСТАЦИОНАРНАЯ ДИНАМИКА ЖЕСТКО ЗАЩЕМЛЕННОЙ АНИЗОТРОПНОЙ ПОЛОСЫ

Сердюк А.О.¹, Сердюк Д.О.¹, Федотенков Г.В.^{1,2}

¹*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
Москва*

²*НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва*
serduksaha@yandex.ru, d.serduk55@gmail.com, greghome@mail.ru

Анизотропные пластины (в частности полимерные композитные пластины) представляют широкий класс конструктивных элементов аэрокосмической техники. Исследование напряжённо-деформированного состояния пластин при статических и ударных нагрузках является неотъемлемым этапом проектирования новых перспективных элементов конструкций, в чём заключается актуальность разработки уточнённых аналитических, численных и экспериментальных методик и подходов. В настоящей работе рассматривается нестационарная динамика жестко защемленной анизотропной полосы.

В декартовой системе координат Охуз исследуется процесс распространения нестационарных возмущений в тонкой пластине постоянной толщины и плотности в виде полосы ограниченной ширины вдоль оси Ох, и бесконечной длины вдоль оси Оу при воздействии на нее нестационарной сосредоточенной нагрузки. В качестве модели пластины принята классическая модель Кирхгофа [1]. Материал пластины принят упругим и анизотропным с симметрией относительно срединной плоскости пластины, совпадающей с плоскостью Оху. Соответствующая начально-краевая задача включает в себя уравнение движения в перемещениях, нулевые начальные условия, и граничные условия жестко защемления торцов полосы. Цель исследования заключается в построении нестационарной функции нормальных перемещений в ответ на воздействие нестационарной нагрузки.

Решение задачи получено при помощи функции Грина для неограниченной анизотропной пластины и метода компенсирующих нагрузок [2]. Решение для функции Грина получено ранее [3] путем интегральных преобразований Лапласа и Фурье. Обратное интегральное преобразование Лапласа выполнено с помощью таблиц, а обратное интегральное преобразование Фурье выполнено численным методом интегрирования быстро осциллирующих функций. Компенсирующие нагрузки найдены из решения системы уравнений построенной с учетом граничных условий для нормального прогиба жестко защемленной полосы.

В качестве примера исследовано распространение нестационарных возмущений в жестко защемленной полосе с упругими константами материала соответствующие монокристаллу меди при действии сосредоточенной нагрузки с переменной во времени амплитудой. В качестве верификации метода решения по критерию выполнения граничных условий построены графики нестационарного нормального перемещения и угла поворота нормали к поверхности полосы вдоль ограниченной оси в фиксированные моменты времени.

Полученное решение является универсальным в отношении вида симметрии материала полосы: может быть исследована нестационарная динамика изотропной, трансверсально-изотропной, ортотропной или анизотропной жестко защемленной пластины в виде неограниченной полосы.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты 20-58-04012 Бел_мол_а и 19-58-04016 Бел_мол_а).

Литература

- [1] Горшков А.Г., Медведский А.Л., Рабинский Л.Н., Тарлаковский Д.В. Волны в сплошных средах. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. — 472 с.
- [2] Венцель Э.С., Джан-Темиров К.Е., Трофимов А.М., Неголыша Е.В. Метод компенсирующих нагрузок в задачах теории тонких пластинок и оболочек – Харьков, 1992. – 92 с.
- [3] Сердюк А.О. Сердюк Д.О. Федотенков Г.В. Исследование нестационарного напряженного состояния неограниченной анизотропной пластины Кирхгофа // Проблемы безопасности на транспорте: матер. X Междунар. научн.-практ. конф. – Гомель: БелГУТ, 2020. – Ч. 1. 122-124 с.

РЕГИСТРАЦИЯ ДЕФОРМАЦИЙ И ДЕФЕКТОВ ВСТРОЕННЫМИ В ЦЕМЕНТНЫЙ ОБРАЗЕЦ ВОД

Сероваев Г.С.¹, Кошелева Н.А.¹, Гусев Г.Н.¹

¹Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
serovaev@icmm.ru, kosheleva.n@icmm.ru, gusev.g@icmm.ru

Прочность и долговечность важных инженерных сооружений в значительной мере определяется механическим состоянием элементов конструкций, а так же условиями их эксплуатации. Развитие технологий фотоники привело к широкому использованию волоконно-оптических датчиков деформаций (ВОДД), в том числе для мониторинга механического состояния различных инженерных сооружений: зданий, мостов, плотин и электростанций [1–3]. ВОДД обладают рядом важных особенностей, благодаря которым данный тип датчиков является широко востребованным. К таким особенностям можно отнести высокую чувствительность и точность ВОДД, коррозионную стойкость, устойчивость к электромагнитным помехам и способность к размещению множества датчиков на одном оптическом волокне. Возможность встраивания оптических волокон с ВОДД на брэгговских решетках в различные материалы открывает новые перспективы по осуществлению контроля целостности конструкций как на этапе производства, так и во время их эксплуатации.

В рамках данного исследования рассматриваются вопросы встраивания оптических волокон с ВОДД на основе брэгговских решеток с целью мониторинга механического состояния конструкции, а также ее целостности во время эксплуатации. Представлен один из подходов регистрации появления и развития дефектов на основе информации, получаемой от ВОДД. Подход основан на расположении датчиков в области концентрации напряжений, возникающей в результате появления дефектов. Данная область определена при помощи численного моделирования контролируемой конструкции. Рассматриваемый подход позволяет использовать статические варианты нагружения, не прибегая к дополнительным воздействиям (кроме эксплуатационных) на объект, которые свойственны вибрационным методам мониторинга состояния конструкций.

В качестве образца была изготовлена балка из цементного раствора. Эксперимент на трехточечный изгиб балки проводился для демонстрации работы брэгговских решеток в зонах растяжения и сжатия. В ходе эксперимента в образец вносился дефект, имитирующий трещину. На основе показаний ВОДД получены экспериментальные данные, позволяющие регистрировать возникновение и рост повреждения. Данные экспериментальные зависимости позволяют наглядно и быстро определять появление и эволюцию дефекта, а также его местоположение. Так же представлены ограничения описанной методики. Сделаны выводы о том, что рассмотренный метод в сочетании с численным моделированием и другими неразрушающими методами контроля позволяет получать более полную информацию о состоянии исследуемой конструкции.

Литература

- [1] Lin Y. Bin et al. Online monitoring of highway bridge construction using fiber Bragg grating sensors // Smart Mater. Struct. IOP Publishing. – 2005. Vol. 14, № 5. P. 1075–1082.
- [2] Taheri S. A review on five key sensors for monitoring of concrete structures // Constr. Build. Mater. – 2019. Vol. 204. P. 492–509.
- [3] Majumder M. et al. Fibre Bragg gratings in structural health monitoring - Present status and applications // Sensors and Actuators a-Physical. – 2008. Vol. 147, № 1. P. 150–164.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ГАЗА В КАНАЛЕ, МОДЕЛИРУЮЩЕМ УЧАСТОК ПВРДТ

Скибина Н.П.¹

¹Национальный исследовательский Томский государственный университет
uss.skibina@gmail.com

Численные методы активно применяются для решения задач дозвуковой и сверхзвуковой газодинамики. Математическое моделирование позволяет рассматривать процессы, протекающие при движении объектов с высокими скоростями, анализировать распределения температуры и давления, изучать структуру течений во внутренних каналах различных технических устройств. В данной работе представлено численное исследование сверхзвукового течения воздуха в канале, моделирующем камеру сгорания прямоточного воздушно-реактивного двигателя на твердом топливе [1, 2].

Физико-математическая модель состоит из уравнений сохранения (массы, импульса и энергии), записанных для вязкого теплопроводного газа, подчиняющегося уравнению Менделеева-Клапейрона. Моделирование турбулентности осуществляется путем решения уравнений SST модели Ментера. Начальные и граничные условия выбираются в соответствии с условиями аэродинамических испытаний в импульсной аэродинамической установке [3, 4].

Поток газа со скоростью $M = 5$ входит в расчетную область через левую границу, набегает на модель и, проходя через воздухозаборное устройство, попадает в рабочий тракт и камеру сгорания двигателя. На внутренних и внешних стенках модели ПВРД выполняется условие прилипания. Выгорание заряда твердого топлива и связанное с ним изменение геометрии не рассматриваются. Химические реакции и пиролиз не учитываются. В качестве топливного заряда выбран легкоплавкий полимерный материал – поликосиметилен с температурой плавления 175°C и рабочим диапазоном температур от -50°C до $+90^{\circ}\text{C}$.

В ходе работы получены: структура течения в осесимметричном канале, поля температуры, давления, плотности и скорости в потоке газа, тепловые потоки через границу «газ-твёрдое тело» в камере сгорания. Проведено сопоставление результатов математического моделирования с полученными ранее экспериментальными и расчетными данными [5, 6].

Литература

- [1] Жарова И. К., Козлов Е.А., Маслов Е.А., Фарапонов В.В., Савкина Н.В., Золотарев Н.Н. Газодинамика и теплообмен при течении рабочего тела в канале, моделирующем проточной тракт ПВРД – XXXIV Сибирский теплофизический семинар, Новосибирск, 2018. – С. 36-36.
- [2] Maslov E. A., Faraponov V.V., Zharova I.K., Zhukov A.S., Kozlov E.A., Savkina N.V., Skibina N.P. Gimayeva N.R. Experimental study of the control agent flow parameters in the channel, simulating the ramjet airflow duct – Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2019. – Т. 1382. – №. 1. – С. 012090.
- [3] Звегинцев В.И. Газодинамические установки кратковременного действия. Часть 1. Установки для научных исследований – Новосибирск, Параллель, 2014. – 551 с.
- [4] Скибина Н. П., Савкина, Н. В., Фарапонов, В. В., Маслов, Е. А. Комплексный подход к решению задачи высокоскоростного обтекания тела в импульсной аэродинамической установке и проверка согласованности полученных результатов – Вестник Томского государственного университета. Математика и механика, 2019. – №. 59. С. 118-129.
- [5] Maslov E., Faraponov V., Arkhipov V., Zharova I., Kozlov E., Savkina N. Investigation of working processes in a flowing channel of ramjet engine – Thermal Science, 2019. – Т. 23. – P.531-536.
- [6] Скибина Н.П. Численное исследование нестационарного течения газа в камере сгорания прямоточного воздушно-реактивного двигателя с учетом процесса теплообмена – Вычислительные технологии, 2020 – 25(6):50 – 61. DOI:10.25743/ICT.2020.25.6.003.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90108.

ОСОБЕННОСТИ ТЕЧЕНИЯ КОНЦЕНТРИРОВАННЫХ СУСПЕНЗИЙ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ

Скульский О.И.

*Институт механики сплошных сред УрО РАН, 614013, Пермь, ул. Академика Королева, д1
skul@icmm.ru*

В механике неньютоновских жидкостей немонотонность кривых течения — явление не уникальное. Причинами его возникновения могут быть, например, резкое снижение вязкости при росте температуры или снижение вязкости при увеличении скорости сдвига, который вызывает ориентацию макромолекул вдоль потока. Для концентрированных суспензий причиной немонотонности кривых течения являются силы контактного взаимодействия частиц, возрастающие с увеличением напряжений.

В работе [1] предложена новая реологическая модель высококонцентрированной суспензии твердых частиц в ньютоновской жидкости, описывающая как непрерывное, так и скачкообразное увеличение эффективной вязкости при равномерном увеличении сдвиговых напряжений. Получены точные аналитические выражения для основных реометрических течений, необходимых для перехода от измеряемых в эксперименте интегральных характеристик к кривой течения и определения материальных констант, входящих в модель. Предложенная модель модифицирована для учета неньютоновских свойств дисперсионной среды, которая при малых скоростях деформации проявляет псевдопластические свойства, а при больших — дилатантные. Эффективная вязкость такой суспензии представлена как сумма вкладов от неньютоновской дисперсионной среды и твердых частиц дисперсной фазы. Для описания реологии дисперсионной фазы использовалась модель Эллиса.

В данном сообщении представлены результаты численного исследования течения суспензий в различных двумерных каналах. Показано, что в зависимости от параметров модели профили скоростей могут принимать различные сложные формы.

Литература

[1] Скульский О.И. Реометрические течения концентрированных суспензий твердых частиц //Вычислительная механика сплошных сред. Пермь, – 2020. – Т. 13, № 3. – С. 269-278

РАЗРАБОТКА ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ПТФЭ И СВМПЭ В ЛАБОРАТОРИИ СВФУ

Слепцова С.А.¹, Охлопкова А.А.¹

¹Северо-Восточный федеральный университет, Якутск

ssard@yandex.ru

Основной целью научно-исследовательских работ в области полимерного материаловедения в лаборатории «Технология полимерных нанокомпозитов» СВФУ является создание материалов антифрикционного назначения, способных сохранять работоспособность и надежность техники, эксплуатирующейся в экстремальных условиях Северных регионов.

Теоретический анализ, обобщение научно-исследовательских работ позволил сформулировать важные теоретические положения о: 1) влиянии критических концентраций на надмолекулярную структуру и свойства ПКМ [1]; 2) характере межмолекулярного взаимодействия между полимером и наполнителем [1-3]; 3) природе и сущности трибоокислительных процессов в ПКМ [4]; 4) механизме формирования вторичной структуры на поверхности трения [5].

Наиболее критическими моментами создания ПКМ антифрикционного назначения на основе ПТФЭ и СВМПЭ являются межфазное взаимодействие на границе раздела фаз «полимер-наполнитель» и формирование на поверхности трения вторичной структуры, желательно с эффектом твердой смазки. Для достижения этих целей используются соединения с потенциальной способностью к реализации желаемых эффектов в материале, а также методы, усиливающие эти способности наполнителей.

В лаборатории исследуются разные технологические способы создания композиционных материалов на основе этих материалов: 1) предварительная механическая активация наполнителей; 2) совместная активация полимерной матрицы и наполнителей; 3) химическая модификация поверхности полимера; 4) совмещение полимера и наноразмерных наполнителей под воздействием ультразвука и/или СВЧ; 5) введение компатибилизаторов или функциональных соединений в полимерную матрицу; 6) модификация полимерной матрицы комплексом соединений, имеющих разную природу, для достижения определенных свойств ПКМ.

Литература

- [1] Охлопкова А.А. Физико-химические принципы создания триботехнических материалов на основе политетрафторэтилена и ультрадисперсных керамик: дис. д-ра техн. наук: 05.02.01, 05.02.04. – Гомель: 2000. – 154 с.
- [2] L. A. Nikiforov, T. A. Okhlopkova, Iu.V. Kapitonova, S. A. Sleptsova, A. A. Okhlopkova, Ee Le Shim, Jin-Ho Cho. Surfactant Effects on Structure and Mechanical Properties of Ultrahigh-Molecular-Weight Polyethylene/Layered Silicate Composites // *Molecules*. – 2017. – 22. – P.2149-2156.
- [3] Vasilev A. P. Struchkova T.S., Nikiforov L.A., Okhlopkova A.A., Grakovich P.N., Shim E. L., Cho J.-H. Mechanical and Tribological Properties of Polytetrafluoroethylene Composites with Carbon Fiber and Layered Silicate Fillers // *Molecules*. – 2019. – Т. 24. – №. 2. – С. 224.
- [4] S. A. Sleptsova, A. A. Okhlopkova, Yu.V. Kapitonova, N. N. Lazareva, M. M. Makarov, and L. A. Nikiforov. Spectroscopic Study of Tribooxidation Processes in Modified PTFE // *Journal of Friction and Wear*, 2016, Vol. 37, No. 2, pp. 129–135.
- [5] Лазарева Н.Н. Разработка триботехнических материалов на основе политетрафторэтилена и механоактивированных слоистых силикатов: дис. к-та техн. наук: 05.17.06 – Казань:2019. – 174 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОВЯЗКОУПРУГОГО ПОВЕДЕНИЯ СИСТЕМЫ ОПРАВКА-КОМПОЗИТНАЯ ОБОЛОЧКА В ПРОЦЕССЕ ИЗГОТОВЛЕНИЯ

Сметанников О.Ю., Сахабутдинова Л.Р.

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
vmm@pstu.ru, lyaysans@list.ru*

В исследовании рассматривается технологическая оснастка для производства крупногабаритного намоточного изделия, представляющего из себя пластиковую оболочку типа «кокон» [1]. Актуальность исследования продиктована проблемами, связанными с разработкой комплексной методики по расчету напряженно-деформированного состояния конструкции в процессе изготовления с учетом термовязкоупругих характеристик материалов формообразующей оправки и наматываемой оболочки [2]. Поэтому предметом настоящего исследования выступает технологический процесс изготовления оболочки на этапах намотки и отверждения связующего. На данном этапе решены следующие задачи:

- проведена идентификация термомеханических параметров вязкоупругости для материалов, входящих в систему «оправка-оболочка»;
- предложена методика адаптации кривых релаксации для задания в пакете конечно-элементного анализа;
- разработан программный модуль для вычисления термомеханических параметров вязкоупругости оболочки в зависимости от схемы укладки армирующего материала и деформаций, возникающих от усилий натяжения при намотке;
- построен параметризованный трехмерный конечно-элементный аналог рассматриваемой конструкции;
- разработан программный модуль вычисления напряженно-деформированного состояния системы «оправка-оболочка» под действием внешних силовых и температурных факторов на этапах намотки оболочки и отверждения связующего.

Для прогнозирования влияния релаксационных свойств наматываемой оболочки на формообразующую оправку, авторами предложена и реализована численная модель в среде ANSYS Mechanical APDL, описывающая термовязкоупругое поведение слоистого композиционного материала в виде сочетания анизотропного упругого поведения среды с одним независимым вязкоупругим оператором.

Предложенные методы расчета и реализованные на их основе вычислительные модули и программы используются для проведения автоматизированных расчетов по определению контактного давления на поверхности песчано-полимерной оправки в процессе изготовления крупногабаритной оболочки. Полученные количественные и качественные результаты позволяют оценить не только распределение давления на поверхности оправки, но и имеют большую практическую значимость для прогнозирования дефектов формы получаемой оболочки.

Литература

- [1] Аношкин А.Н. Теория и технология намотки конструкций из полимерных композиционных материалов. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2003. – 118 с.
- [2] Li Sh., Zhan L., Chang T. Numerical simulation and experimental studies of mandrel effect on flow-compaction behavior of CFRP hat-shaped structure during curing process // Archives of Civil and Mechanical Engineering. – 2018. – Vol. 18, no. 4. – P. 1386-1400.

ВЛИЯНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ И ТЕМПЕРАТУРЫ НА РАЗРУШЕНИЕ АДГЕЗИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Смирнов С.В.¹, Вичужанин Д.И.¹, Коновалов Д.А.¹, Пестов А.В.²

¹ Институт машиноведения УрО РАН, Екатеринбург

² Институт органического синтеза им. И. Я. Постовского УрО РАН
svs@imach.uran.ru

Адгезивные материалы широко используются в строительстве, машиностроении и бытовой технике. При этом конструктивные элементы могут испытывать сложное напряженно-деформированное состояние в условиях как пониженных, так и повышенных температур. Учитывая тенденцию интенсивного расширения применения адгезивных материалов в современных конструкциях и механизмах, задачу прогнозирования их разрушения при эксплуатационных нагрузках следует считать весьма актуальной. Отметим, что в отличие от металлических материалов, для которых исследования влияния напряженного состояния на закономерности когезионного разрушения являются традиционными, для адгезивных материалов такие исследования в настоящее время практически отсутствуют. Целью описываемых в докладе исследований являлась разработка методик проведения испытаний для определения количественного влияния напряженного состояния и температуры испытаний на предельные характеристики адгезивных материалов и их использования для установления закономерностей когезионного разрушения выбранных материалов.

Материал для исследований - адгезивные композиции холодного отверждения на основе эпоксидной смолы ЭД-20 с использованием в качестве отвердителей полиэтиленполиамины, полиамидполиамины, диэтилентриамины.

Для реализации различных схем напряженного состояния проводили испытания цилиндрических образцов на сжатие, образцов «колокольчик» на растяжение и сжатие, слоистых образцов на трехточечный изгиб, выдавливание доньшка толстостенного стаканчика. В качестве характеристических параметров напряженного состояния использовали показатель жесткости напряженного состояния k и показатель вида напряженного состояния Лоде μ_σ , как это принято в феноменологических моделях разрушения металлических материалов:

$$k = \frac{\sigma}{T}; \quad \mu_\sigma = \frac{2\sigma_{22} - \sigma_{11} - \sigma_{33}}{\sigma_{11} - \sigma_{33}} \quad (\sigma - \text{гидростатическое напряжение; } T - \text{интенсивность}$$

касательных напряжений; $\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33}$ – главные напряжения).

В качестве критерия когезионного разрушения использовали величину предельной плотности энергии деформации W^* в месте разрушения образцов материала. По результатам исследований были построены диаграммы предельной плотности энергии деформации материала $W^*(k, \mu_\sigma)$ в диапазоне изменений показателей $k = -1,2 \dots 1,2$ и $\mu_\sigma = -1 \dots 1$ при температурах испытаний $-50, 23$ и 50°C . Необходимые для расчетов значения упругих констант определяли методом динамического механического анализа на приборе DMA EPLEXOR 150, а зависимости $\sigma(\varepsilon)$ в пластической области – на испытательной машине Zwick/Roel 2.5.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 19-19-00571)

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ НАСТРОЙКИ МОДЕЛИ В ЗАДАЧЕ ГАРТМАНА

¹Смольянов И.А., Шмаков Е.И. ²Э. Бакке

¹Уральский федеральный университет, Екатеринбург

²Университет им. Лейбница, Германия

i.a.smolyanov@gmail.com

Физические явления изучаемые в магнитогидродинамике уже давно нашли большое применение в металлургии, ядерной энергетике, измерительной технике и ряде других областей. Хотя применение этих физических явлений используется уже давно, но ряд проблем еще остаются не решенными. Одна из них это исследование нелинейной стабильности потока в сильных магнитных полях. Решение этой проблемы может помочь существенно улучшить характеристики индукционных насосов (например давлений выше 8 бар с расходом жидкости 3 м³/с), повышения качества кристаллизующих слитков и точность управления потоками жидкости.

Классический подход к решению данной задачи — это рассмотрение задачи Гартмана. Решение задачи Гартмана для двумерной постановки была сделана в 60ых годах прошлого столетия [1]. На сегодняшний день актуальным вопросом является обобщение известных результатов для многомерных моделей. Например в работах [2,3] исследуются потоки жидкости в постоянных магнитных полях, которые в определенных режимах позволяют латинизировать поток. Подвижные магниты, как правило используемые в велосемитрии, могут создавать магнитное поле, которое ведет себя как механическая преграда для потока [4]. В работе отмечается [5], что результаты для определения предельных режимов полученные с помощью теории линейной стабильности и эксперимента отличаются на несколько порядков. Стоит отметить, что достаточно мало работ в которых исследуются особенности воздействия бегущего магнитного поля на проводящие потоки жидкости.

Исследования данного явления практически не представляется возможным с помощью эксперимента, а требует создания точных численных моделей, которые должны быть верифицированы. Точность результатов результатов получаемых с помощью таких моделей и устойчивость решений значительно зависит от начальных условий и выбранных граничных условий. В данной работе рассматриваются особенности выбора граничных условий для различных типов моделей турбулентности. Также приводятся несколько способов расчета установившихся Пуазейльевских потоков, которые должны быть использованы для начальных условий в задаче Гартмана.

Литература

- [1] Hunt, J. C. R., & Stewartson, K. (1965). *Magnetohydrodynamic flow in rectangular ducts. II. Journal of Fluid Mechanics*, 23(03), 563.
- [2] D. Krasnov, Y. Kolesnikov, T. Boeck Numerical simulation of electrically conducting jet flow in a straight duct under longitudinal homogeneous magnetic field. *Phys. Fluids* 31, 2019
- [3] D. Krasnov M. Rossi, O. Zikanov and T. Boeck Optimal growth and transition to turbulence in channel flow with spanwise magnetic field *J. Fluid Mech.*, vol 596, 2019, pp. 73-101
- [4] S. Tynpel, T. Boeck, J. Schumacher. Laminar and transitional liquid metal duct flow near a magnetic point dipole. *Journal of fluid mechanics*, Vol. 735 (2013), pp. 553–586.
- [5] D. Krasnov, E. Zienicke, O. Zikanov, T. Boeck and A. Thess. *J. Fluid Mech.* Vol 504, 2004, pp. 183-211

ВЕРИФИКАЦИЯ МОДЕЛИ ДЛЯ РАСЧЕТ ГАРТАМАНОВСКИХ ПОТОКОВ В БЕГУЩЕМ МАГНИТНОМ

¹Смолянов И.А., Шмаков Е.И., ²Э. Бакке

¹Уральский федеральный университет, Екатеринбург

²Университет им. Лейбница, Германия

i.a.smolyanov@gmail.com

Данная работа посвящена одной из задач по исследованию магнитогидродинамических потоков под воздействием бегущего поля. Классическая формулировка данной задачи в литературе называется задачей Гартмана, которая была исследована еще в 1937 [1]. Данная задача рассматривает механизмы перехода от стабильного состояния потока к неустойчивому в каналах различных форм, как правило прямоугольных под воздействием магнитного поля. Применение результатов исследований течений Гартмана можно обнаружить в ядерной энергетике при проектировании индукционных насосов[2].

На сегодняшний день можно найти много работ посвященных влиянию постоянного магнитного поля на проводящие потоки жидкости в канале [3, 4]. Но достаточно мало работ по исследованию влияния бегущего магнитного поля в таких задачах. Авторы данной работы предлагают один из способов исследования данного явления с помощью классификации и разделения магнитных эффектов на поперечный, продольный и толщинный. Такое разделение позволит качественно и количественно оценить как влияет бегущее магнитное поле на потоки жидкости, а также как ими управлять. Использование численного моделирования предполагает использование точных и верифицированных моделей для получения подлинных знаний. Для изучения этих явлений разработана численная модель для решения магнитного и гидродинамического полей в связке используя открытые пакеты OpenFOAM и Elmer. В этой работе авторы делают попытку верифицировать модель для решения связанных магнитного и гидродинамического полей с помощью проверенного упрощенного численного теста. Так как разработанная модель для решения магнитного поля использует формулировку относительно магнитных и электрических потенциалов, а модель для тестирования записана в терминах магнитной индукции и плотности тока, авторы в работе приводят особенности каждой из модели с точки зрения численного моделирования.

Литература

- [1] Hartmann, J. & Lazarus, F. 1937 Hg-dynamics II. Experimental investigations on the flow of mercury in a homogeneous magnetic field. K. Dan. Vidensk. Selsk. Mat. Fys. Medd. 15(7), 1–45.
- [2] S. Tynpel, T. Boeck, J. Schumacher. Laminar and transitional liquid metal duct flow near a magnetic point dipole. Journal of fluid mechanics, Vol. 735 (2013), pp. 553–586.
- [3] D. Krasnov, Y. Kolesnikov, T. Boeck Numerical simulation of electrically conducting jet flow in a straight duct under longitudinal homogeneous magnetic field. Phys. Fluids 31, 2019
- [4] D. Krasnov M. Rossi, O. Zikanov and T. Boeck Optimal growth and transition to turbulence in channel flow with spanwise magnetic field J. Fluid Mech., vol 596, 2019, pp. 73-101

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИБРОИЗОЛЯТОРОВ

Собянин К.В.¹, Шардаков И.Н.²

¹*Национальный Исследовательский Университет «Высшая Школа Экономики», Пермь*

²*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

k.sobyanin@gmail.com, shardakov@icmm.ru

Технические системы чувствительные к вибрациям такие как блоки прецизионного оборудования [1], транспортные средства [2] или здания в регионах с сейсмической активностью [3] нуждаются в тщательном проектировании и дальнейшей тонкой настройке систем виброизоляции.

Тонкая настройка систем пассивной виброизоляции требует наиболее подробных представлений о характеристиках её компонент таких как: массовые характеристики защищаемого объекта (масса, тензор инерции, положение центра масс), геометрические характеристики (координаты закрепления виброизоляторов и их ориентация) и упруго-диссипативные характеристики виброизоляторов (жесткость в различных направлениях и различные коэффициенты диссипации). Заложенные в проекте характеристики не всегда возможно обеспечить при производстве, поэтому на практике их необходимо уточнять по результатам экспериментальных исследований.

В работе рассмотрена задача определения эффективных механических характеристик партии из 4-х промышленных виброизоляторов, используемых в системах виброизоляции блока инерциальных датчиков. Приведен полный цикл экспериментально-теоретических работ: планирование эксперимента и разработка оснастки, проведение эксперимента и обработка результатов. Также рассмотрена задача определения эффективных характеристик диссипативного материала виброизолятора на основе экспериментальных виброграмм.

Литература

- [1] Ильинский, В.С. Защита РЭА и прецизионного оборудования от динамических воздействий – Москва: Радио и связь, 1982. – 296 с.
- [2] Abe, Masato Vehicle Body Roll and Vehicle Dynamics //Vehicle Handling Dynamics (2015): 153–186
- [3] Georgoussis, G. K. Modal rigidity center: it's use for assessing elastic torsion in asymmetric buildings. Earthquakes and Structures, 1(2), 2010, 163–175.

ВЛИЯНИЕ ПОТЕРИ УСТОЙЧИВОСТИ ПОДЛОЖКИ ДАТЧИКА ДЕФОРМАЦИИ НА ЕГО ПОКАЗАНИЯ

Созонов Н.С.¹, Шардаков И.Н.²

¹ООО «Инверсия-Сенсор», Пермь

²Институт механики сплошных сред, Пермь

sozonov@i-sensor.ru, shardakov@icmm.ru

Своевременное определение аварийного состояния инженерных сооружений является ключевой задачей при обеспечении безопасной эксплуатации. Основными инструментами сбора данных о НДС для систем мониторинга являются тензорезисторы и волоконно-оптические датчики деформации. Разные по принципу измерения, оба типа датчиков сходны в принципах монтажа. Для металлических конструкций, как правило, используются датчики с тонкой металлической подложкой, которые устанавливаются на поверхность с помощью контактной точечной сварки.

Для минимизации искажения поле деформации при приварке датчика на объект и для лучшей передачи деформации на чувствительный элемент подложку датчика рационально делать небольшой толщины. Однако при использовании более тонкой подложки нельзя исключать потерю устойчивости при деформациях, близких к нижней границе диапазона измерения. Это следует учитывать при выборе схемы монтажа или разработке датчика деформации.

В данной работе рассмотрено численное моделирование потери устойчивости подложки датчика при отрицательных деформациях. Определены критические параметры нагружения и предложены способы, позволяющие исключить потерю устойчивости в рабочем диапазоне датчика. Результаты численного моделирования подтверждены экспериментально.

ИЗУЧЕНИЕ МЕХАНИЗМОВ ЛОКАЛИЗАЦИИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ И РАЗРУШЕНИЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВИДАХ ДИНАМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Соколов М.А.¹, Симонов М.Ю.^{1,2}, Оборин В.А.¹,

Чудинов В.В.¹, Уваров С.В.¹, Наймарк О.Б.¹

¹Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь,

²Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь

sokovikov@icmm.ru

Целью данной работы является изучение механизмов локализации пластической деформации и разрушения как структурных переходов в ансамблях микродефектов при различных видах динамического нагружения [1].

Эксперименты по исследованию локализации пластической деформации при динамическом нагружении проводились на стержне Гопкинсона - Кольского и при пробивании преград. Температурные поля в процессе деформирования на различных стадиях локализации деформации и разрушения исследовались «in-situ» регистрацией температурных полей с использованием высокоскоростной инфракрасной камеры CEDIP Silver 450M [2]. Величины температурных полей в областях локализации не подтверждают традиционные представления о механизме локализации деформации, обусловленном термопластической неустойчивостью.

Данные экспериментальных исследований, изучение структуры деформированных образцов, а также результаты численного моделирования [3-7], 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.

Теоретические исследования осуществлялись в рамках госзадания ПФИЦ УрО РАН (тема № АААА-А19-119013090021-5). Экспериментальные исследования и численное моделирование осуществлялись при частичной поддержке грантов РФФИ 19-48-590009 p_a.

Литература

- [1] Наймарк О.Б. Коллективные свойства ансамблей дефектов и некоторые нелинейные проблемы пластичности и разрушения // Физическая мезомеханика. – 2003. – Т. 6, № 4. – С.45-72.
- [2] Соколов М.А., Билалов Д.А., Чудинов В.В., Уваров С.В., Плехов О.А., Терехина А.И., Наймарк О.Б. Неравновесные переходы в ансамблях дефектов при динамической локализации пластической деформации // Письма в Журнал технической физики. – 2014. – Т. 40, Вып. 23. – С.82 -88.
- [3] Билалов Д.А., Соколов М.А., Чудинов В.В. Многомасштабные механизмы локализации пластической деформации при пробивании преград // Деформация и разрушение материалов. – 2017. – № 5. – С.43-47.
- [4] Билалов Д.А., Соколов М.А., Чудинов В.В., Оборин В.А., Баяндин Ю.В., Терехина А.И., Наймарк О.Б. Численное моделирование и экспериментальное исследование локализации пластической деформации при динамическом нагружении образцов в условиях близких к чистому сдвигу // Вычислительная механика сплошных сред. – 2017. – Т. 10, № 1. – С.103-112.
- [5] Соколов М.А., Чудинов В.В., Оборин В.А., Уваров С.В., Наймарк О.Б. Изучение механизма разрушения сплавов локализованным сдвигом при динамическом нагружении // Вычислительная механика сплошных сред. – 2019. – Т. 12, № 3. – С. 301-312.
- [6] Соколов М.А., Симонов М.Ю., Билалов Д.А., Симонов Ю.Н., Наймарк О.Б. Локализация пластической деформации в сплаве АМг6 при динамическом нагружении // Физическая мезомеханика. – 2020. – Т. 23, № 2. – С. 45–57.
- [7] Билалов Д.А., Соколов М.А., Баяндин Ю.В., Чудинов В.В., Оборин В.А., Наймарк О.Б. Описание эффекта падения прочности сплава АМг6 с ростом температуры при динамическом нагружении // Вестник ПНИПУ. Механика. – 2019. - №5. – С.5 -14.

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ С ПОМОЩЬЮ АСМ О КОНТУРАХ ВКЛЮЧЕНИЙ, РАСПОЛОЖЕННЫХ ВНУТРИ ЭЛАСТОМЕРНОГО МАТЕРИАЛА

Соколов А.К., Изюмов Р.И., Свистков А.Л.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
aleksandr_sokol@mail.ru, izumov@icmm.ru, svistkov@icmm.ru

Атомно-силовая микроскопия является одним из наиболее перспективных методов исследования структуры материалов на наноуровне. Однако, для получения наиболее полной информации о структуре и свойствах материала на наноуровне среды требуется развитие теоретических моделей работы атомно-силового микроскопа. В настоящее время предложен ряд моделей, которые позволяют методами наноиндентирования получать информацию о структуре и свойствах нанокомпозитов [1]. Для мягких эластомерных материалов можно получить информацию не только о выступающих на поверхности материала жестких частицах наполнителя, но и о расположенных под поверхностью на небольшой глубине в связующем агломератах частиц. Для расшифровки данных предложена соответствующая математическая модель.

В основу модели положено решение динамических задач о проникновении зонда в упругую среду. Учтены конечные деформации материала, эффективная масса и жесткость кантилевера, площадь контакта поверхности зонда с деформируемой средой, поверхностная энергия на границе контакта зонда с материалом. Иллюстрации решений задач, сформулированных в двумерной постановке, демонстрируют возможности получения образа частиц наполнителя в глубине связующего. Круглые жесткие включения располагались на различных глубинах и имели разные радиусы. Исследовано, как теряется возможность получения информации о частице наполнителя от глубины расположения включения и от особенностей динамического поведения системы зонд-кантилевер в полуконтактной моде.

Экспериментальные данные были получены в результате проведенных исследований на атомно-силовом микроскопе в режиме наноиндентирования. В качестве образцов использовался эластомер, наполненный техническим углеродом. Использовались кантилеверы с радиусом кончика зонда около 10 нм. Индентирование проведено на сетке 10х10 точек с шагом между точками индентирования 50 нм.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края в рамках научного проекта № 20-48-596013. Экспериментальная часть выполнена при поддержке госбюджетной темы АААА-А20-120022590044-7.

Литература

[1] Garcia R. Nanomechanical mapping of soft materials with the atomic force microscope: methods, theory and applications // Chem Soc Rev. – 2020. doi: 10.1039/d0cs00318b.

ОЦЕНКА ОТКЛИКА ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ОБРАЗОВ ПРИ ЗАМЕНЕ АНИЗОТРОПНЫХ УПРУГИХ СВОЙСТВ КРИСТАЛЛИТА НА ЭКВИВАЛЕНТНЫЕ ИЗОТРОПНЫЕ

Соколов А.С.¹, Трусов П.В.¹

¹Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь
aleks1997.1997@yandex.ru, tpv@matmod.pstu.ru

Вследствие ускоренного развития техники, сопряженного с существенно возрастающими термомеханическими эксплуатационными нагрузками, в последние десятилетия большое внимание уделяется развитию моделей для описания поведения металлов и сплавов, используемых для проектирования изделий и технологий их изготовления. Возможность прогнозировать и управлять свойствами готовых изделий оказывает значительное стимулирующее влияние на развитие математических моделей, позволяющих описывать процессы изготовления и эксплуатации деталей. При рассмотрении поликристаллических материалов часто предполагается изотропия его свойств, что может приводить к погрешности расчётов до 20-30% [1-2]. Подобная замена осуществляется введением понятия эквивалентного изотропного материала со свойствами, определенными по анизотропным характеристикам (например, упругим) [3-5], которые являются известными для большинства монокристаллов. Изотропные упругие модули в представленной работе определяются по методам Фойгта, Рейсса и Хилла. Следует отметить, что использование данных способов усреднения предполагает, что распределение ориентаций кристаллитов соответствует равномерному закону. Цель данной работы: оценить отклонения, обусловленные заменой реальных анизотропных упругих свойств эквивалентными изотропными, напряженно-деформированного состояния (НДС), уровня запасенной на масштабе представительного макрообъема упругой энергии, которая может влиять на распространение микро- и мезотрещин, остаточных мезонапряжений при деформировании поликристалла по сложным траекториям. Для решения поставленной задачи используется конститутивная двухуровневая статистическая упруговязкопластическая модель [6]. В качестве элемента макроуровня выступает представительный объем поликристалла (макрообразец), представляющий собой агрегат из кристаллитов (зерен, субзерен). В качестве основных механизмов деформирования принимается скольжение краевых дислокаций по системам скольжения (СС), повороты решеток кристаллитов в процессе нагружения.

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

Литература

- [1] Кривошеина М.Н, Кобенко С.В, Туч Е. В. Усреднения свойств композиционных анизотропных материалов при численном моделировании их разрушения // Физическая мезомеханика. Т.13. №.2. 2010. С. 55-60.
- [2] Кривошеина М. Н, Туч Е. В, Хон Ю. А. Применение критерия Мизеса–Хилла для моделирования динамического нагружения сильно анизотропных материалов // Известия РАН. Серия физическая. 2012. Т. 76. № 1. АС. 91-96.
- [3] Ньюнхем Р.Э. Свойства материалов. Анизотропия, симметрия, структура. – Москва, Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», Ин-т комп. исслед., 2007. 652 с.
- [4] Хирт Дж., Лоте И. Теория дислокаций / Пер. с англ. Под ред. Э.М. Надгорного, Ю. А. Осипьян – М.: Атомиздат, 1972. 600 с.
- [5] Шермергор Т. Д. Теория упругости микронееднородных тел. – М: Наука, 1977. 399 с.
- [6] Трусов П. В., Швейкин А. И. Многоуровневые модели моно- и поликристаллических материалов: теория, алгоритмы, примеры применения. — Новосибирск: Издательство СО РАН, 2019. 605 с.

ПОВЕДЕНИЕ КАПЕЛЬ НЕМАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ В МАГНИТНОЙ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ КОЛЬЦЕВОГО МАГНИТА

Соколов Е.А.¹, Шабанова И.А.¹, Васильева А.О.¹, Калюжная Д.А.¹, Ряполов П.А.¹

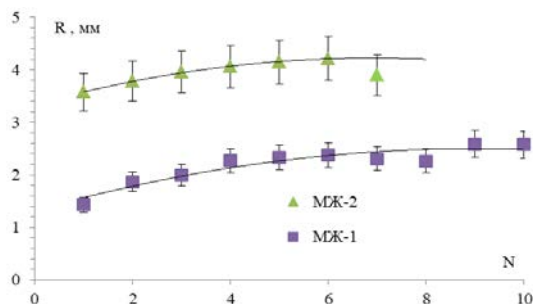
¹Юго-Западный государственный университет, Курск

evgeniysokolov1@yandex.ru

Дано описание экспериментальной установки для скоростной видеофиксации динамики капель воды в МЖ в магнитном поле кольцевого магнита. Эксперимент заключался в следующем: ячейка Хеле-Шоу заполнена МЖ, снизу с помощью мехатронного актуатора соосно ячейке подводится кольцевой магнит, на некотором расстоянии между поверхностью МЖ и верхней плоскостью кольцевого магнита происходит захват капли немагнитной жидкости МЖ. Дальнейшее поднятие магнита приводит к захвату мелких капель немагнитной жидкости и образованию в области нулевого поля капли большего размера. При смене направления движения магнита капля воды принимает миндалевидную форму, МЖ обтекает вокруг капли. С помощью неоднородного магнитного поля капля немагнитной жидкости бесконтактно транспортируется ко дну ячейки. При дальнейшем опускании магнита капля немагнитной жидкости придавливается ко дну неоднородным магнитным полем, после чего происходит отрыв мелких капель [1, 2].

Синтезирована серия образцов, плотность, одного из которых соответствует плотности воды для постановки эксперимента без влияния силы Архимеда на динамику капель.

Проведен эксперимент по видеофиксации динамики отрыва капель от водяного объема, удерживаемого в области перемены знака градиента магнитного поля, в магнитной жидкости, на основании которого определены размеры капель воды для различных концентраций магнитной жидкости. На рисунке приведены зависимости размера мелких капель, отрывающихся от основного объема немагнитной жидкости, от порядкового номера.



Произведена теоретическая оценка баланса сил для отрыва немагнитной капли в магнитной жидкости.

Публикация подготовлена в рамках выполнения государственного задания на 2020 г. (номер 0851-2020-0035).

Литература

[1] Ryapolov P. A., Polunin V. M., Sokolov E.A. Hydrodynamics and acoustics of gas inclusions in a magnetic fluid in the field of an annular magnet // Scientific notes of the Moscow University faculty of physics. – 2020. – №. 1. – С. 2011603-2011603.

[2] Ryapolov P. A. et al. Dynamics of a gas-liquid magnetic system in an inhomogeneous field of an annular magnet // Proceedings of South Western state University. Series: Equipment and technologies. – 2019. – Т. 9. – №. 3. – С. 79-87.

МЕЖЧАСТИЧНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ В АНСАМБЛЕ НЕПОДВИЖНЫХ СУПЕРПАРАМАГНИТНЫХ ФЕРРОЧАСТИЦ

С. А. Сокольский¹, А. Ю. Соловьева¹, Е. А. Елфимова¹

¹Уральский математический центр, Уральский Федеральный Университет,
Ул. Ленина 51, 620000 Екатеринбург, Россия

Sokolsky2304@gmail.com, Anna.Soloveva@urfu.ru, Ekaterina.Elfimova@urfu.ru

В данной работе было исследовано влияние межчастичного диполь-дипольного взаимодействия на статические, термодинамические и магнитные свойства ансамбля неподвижных суперпарамагнитных частиц, находящегося во внешнем магнитном поле.

Релаксация магнитного момента модельных феррочастиц происходила по неелевскому механизму. Направления осей лёгкого намагничивания всех частиц предполагались параллельными друг другу, но под углом относительно направления внешнего магнитного поля $\mathbf{H}$ (направленность осей описывалась с помощью полярного и азимутального углов φ и θ). В системе рассматривалось два варианта распределения феррочастиц по объёму контейнера: в узлах простой кубической решётки (Рис. 1 а) и случайным образом (Рис. 1 б).

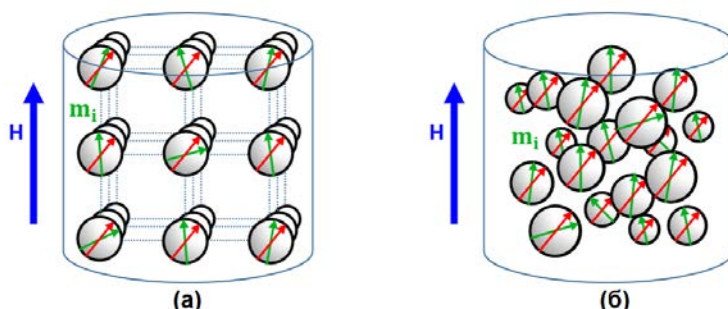


Рисунок 1 – Монодисперсная система неподвижных суперпарамагнитных феррочастиц во внешнем магнитном поле. Контейнер имеет цилиндрическую форму, сильно вытянутую вдоль направления поля $\mathbf{H}$.

Описанная модель была изучена теоретически путём разложения свободной энергии Гельмгольца в классический вириальный ряд с точностью до второго вириального коэффициента, а также с помощью компьютерного моделирования методом Монте-Карло. Было установлено, что в нулевом магнитном поле вклад диполь-дипольного межчастичного взаимодействия в свободную энергию Гельмгольца ΔF для первой системы (Рис. 1 а) зависит от полярного угла φ , в то время как при случайном распределении феррочастиц в объёме (Рис. 1 б) такая зависимость отсутствует. Сравнение аналитических кривых намагниченности и теплоемкости с результатами компьютерного моделирования позволило определить область применимости построенной теории.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 20-02-00358).

Литература

- [1] B. U. Felderhof, *Magnetohydrodynamics*, 36 (2000) 329.
- [2] R. E. Rosensweig, *Ferrohydrodynamics*, Cambridge University Press, 1985.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОНВЕКЦИИ ОСУШЕННОГО ВОЗДУХА ГОЛОГРАФИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Сомов С.А., Иванов А.С.

Институт механики сплошных сред (ПФИЦ УрО РАН), г. Пермь

somov.s@icmm.ru, lesnichiy@icmm.ru

Важную роль в конвекции влажного воздуха атмосферы играет фазовый переход первого рода в системе «вода – водяной пар» [1], однако обычно вычисляется лишь скрытая теплота фазового перехода в результате конденсации, так как тепловое число Рэлея [2] для влажного и сухого воздуха оказываются близки. Однако испарение воды в одной области пространства и конденсация водяного пара в другой части пространства должно в значительной мере изменять конвективные течения. При этом экспериментальных данных, описывающих отличие конвективных течений в сухом воздухе с одной стороны и влажном воздухе в присутствии фазового перехода первого рода вида «газ-жидкость» с другой стороны, не существует.

Предложенная работа посвящена экспериментальному исследованию отличительных особенностей конвекции сухого и влажного воздуха, вызванных изменением концентрации водяного пара в результате его испарения/конденсации в условиях, приближенных к нормальным. Для этого была спроектирована и смонтирована экспериментальная установка для исследования конвекции в конвективной ячейке с воздухом, который предварительно осушался. Проведена работа по обработке данных с голографических пластин, часть результатов представлена на Рис. 1 для разности температур ΔT между холодильником и нагревателем 0, 8, 10 и 16 °С.

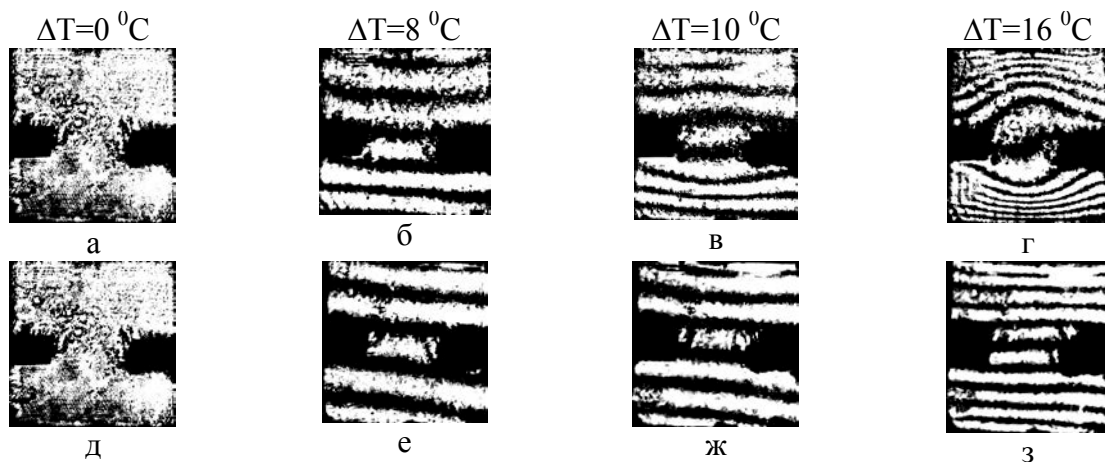


Рис. 1. Эволюция конвекции в сухом воздухе для средней температуры 10 °С (а-г) и для 50 °С (д-з) и с разностью температур ΔT между холодильником и нагревателем.

Предприняты меры по модификации установки для решения проблем возникших во время исследования насыщенного воздуха с фазовым переходом.

Литература

- [1] Shmerlin B.Y., Kalashnik M.V. Rayleigh convective instability in the presence of phase transitions of water vapor. The formation of large-scale eddies and cloud structures // Physics-Uspekhi. 2013. Vol. 56. P. 473–485
- [2] Гериуни Г., Жуховицкий Е. Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости. 1972. - 392 с.

«РОТОРНЫЙ» СПОСОБ ОПИСАНИЯ БОЛЬШИХ ПОВОРОТОВ И ЕГО ПРИЛОЖЕНИЯ К РЕШЕНИЮ РАЗЛИЧНЫХ ЗАДАЧ МЕХАНИКИ

Сорокин Ф.Д.

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва

sorokinfd@bmstu.ru

При решении задач роторной динамики машин, состоящих из валов, зубчатых передач, подшипников и других вращающихся деталей, в большинстве случаев поворот этих элементов вокруг одного из направлений вращения (осевого) намного больше их поворотов вокруг двух других направлений (поперечных). При создании моделей роторных машин традиционно применяется подход, при котором одно из направлений вращения считается основным, а два других — вспомогательными. Это позволяет заменить сложную геометрически нелинейную задачу динамики движения ротора в трехмерном пространстве на более простую задачу — об изгибе балки в двух взаимно перпендикулярных плоскостях при наличии гироскопических моментов. Угловая скорость вращения ротора вокруг оси принимается постоянным параметром, который выступает коэффициентом в линейной системе дифференциальных уравнений движения ротора. Поскольку традиционный подход основан на предположении о постоянстве осевой угловой скорости вращения ротора, он вызывает неизбежные трудности при рассмотрении взаимного влияния вращений вокруг оси ротора и поперечных осей, например, при разгоне и торможении ротора.

В таких задачах, особенно в случае весьма податливого ротора, вращения во всех направлениях должны учитываться точно, то есть следует приводить точное трехмерное описание больших поворотов ротора. Недостатком всех способов описания больших поворотов, использующих три кинематических параметра (углы Эйлера, углы Крылова, векторы поворота), является наличие предельных значений. Проблема состоит в том, что матрицы или тензоры, связывающие угловые скорости с производными кинематических параметров, становятся вырожденными при достижении поворотом ротора некоторого критического значения [1].

В связи со сказанным выше актуальной проблемой является разработка способа описания больших поворотов с учетом специфики роторной динамики машин, для которой один из поворотов (вокруг продольной оси) является очень большим (сотни тысяч и миллионы градусов), а поворот вокруг поперечной оси является тоже большим, но умеренно большим (не более 360 градусов).

Предлагается «роторный» способ описания больших поворотов: полный поворот рассматривается как последовательность двух вращений: сначала рассматривается поворот вокруг продольной оси, затем на него накладывается поворот вокруг одной из поперечных осей. Поворот вокруг продольной оси задается скаляром (числом), величина которого никак не ограничена, а поворот вокруг поперечной оси — вектором γ , содержащим всего две компоненты. Модуль вектора γ ограничен числом 2π (360 градусов). Описание поворотов точное!

Приводятся примеры применения «роторного» способа описания больших поворотов при решении задач динамики твердого тела с одной неподвижной точкой и механики гибких стержней.

Литература

[1] Сорокин Ф.Д. Новый способ описания больших поворотов для задач роторной динамики // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2019. № 7. С. 30-37.

ФЕРРОНЕМАТОДИНАМИКА: СТАТИСТИЧЕСКИЙ ПОДХОД VS ФЕНОМЕНОЛОГИЯ

Степанов В.И., Райхер Ю.Л.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

stepanov@icmm.ru raikher@icmm.ru

Изучение суспензий магнитных наночастиц в мезоморфных жидкостях – средах, которые при определённых условиях переходят в жидкокристаллическое (ЖК) состояние – предмет, равно интересный в фундаментальном и прикладном отношениях. Самым известным типом таких нанокомпозитов являются ферронематики (ФН), где ЖК матрица находится в нематическом состоянии. Ориентационное взаимодействие между частицами и матрицей, возникающее в ФН, придаёт им магнитную управляемость в диапазоне полей от слабых до умеренных (10–1000 Э) – свойство, которым не обладает ни один классический ЖК.

В теории ФН хорошо развиты два главных теоретических подхода: микроскопический, который позволяет исследовать особенности перехода двухкомпонентной композиции (матрица + частицы) в ЖК фазу, и феноменологический, который описывает ФН как сплошную среду со свойствами намагничивающейся анизотропной жидкости. На всём протяжении развития науки жидкокристаллических суспензиях статистический подход применялся, главным образом, для исследования равновесных свойств ФН, в то время как теория их движения в магнитных полях (ферронематодинамика) строилась в рамках феноменологии. Последнее обусловлено, конечно, относительной простотой анизотропных «гидродинамических» моделей.

Исходным пунктом настоящей работы служит кинетическое уравнение вращательной диффузии твёрдой магнитной частицы (уравнение типа Фоккера-Планка) в анизотропной жидкости. Преобразование кинетического уравнения в систему моментных уравнений для наблюдаемых величин и замыкание полученной иерархической цепочки методом среднего поля даёт систему нестационарных уравнений для макроскопических переменных, которая связывает ориентационные движения жидкокристаллической матрицы и суспензии феррочастиц в магнитном поле и гидродинамическом потоке. Анализ построенного подхода показал, что свести его к стандартной феноменологической модели – два векторных уравнения: для директора матрицы и намагниченности ансамбля частиц – возможно лишь путём весьма грубого упрощения. Поскольку при такой редукции из рассмотрения исключается ван-дер-ваальсово взаимодействие между феррочастицами и мезоморфными молекулами, то она порождает ложную посылку о непосредственном магнитном воздействии частиц на матрицу. Выведенные нами уравнения, учитывают ван-дер-ваальсовы силы и позволяют рассчитать недоступные для феноменологии температурные и полевые зависимости времён ориентационной релаксации и коэффициентов анизотропной вязкости ФН.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВУМЕРНОЙ МГД ТУРБУЛЕНТНОСТИ ЗА РЕШЕТКОЙ В КОЛЬЦЕВОМ КАНАЛЕ

Степанов Р.А.¹

¹Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
rodion@icmm.ru

Развитие теории магнитогидродинамической (МГД) турбулентности играет ключевую роль для построения математических моделей происхождения и развития крупномасштабных космических магнитных полей, свойственных планетам с жидким ядром, звездам, галактикам и даже галактическим кластерам. Экспериментальная проверка этих моделей в лабораторных условиях практически исключена. По сути, межзвёздная и солнечная плазма являются единственными объектами, подходящими для наблюдений развитых турбулентных МГД течений. Тем не менее верификация отдельных положений теории может быть выполнена на примерах лабораторных МГД течений с характерными значениями магнитного числа Рейнольдса порядка единицы [1]. Ранее была предложена схема МГД эксперимента, позволяющая получить импульсное течение в тороидальном канале с требуемыми характеристиками [2]. С ее помощью была проведена большая серия исследований, направленных на лабораторную реализацию отдельных механизмов динамо. Теоретический интерес к турбулентности за решеткой мотивировал проведение новых лабораторных экспериментов [3], результаты которых в некоторых аспектах остаются без объяснений или нуждаются в верификации. В данной работе представлены результаты прямого численного моделирования, которые могут быть использованы для интерпретации данных измерений.

Рассматривается двумерное течение несжимаемой электропроводящей жидкости в кольцевом канале, сечение которого частично перекрывается препятствиями. Течение возникает под действием импульсной массовой силы параллельно внутренней оси канала (в реальном эксперименте силы инерции, возникающей при торможении тора). Пульсации магнитного поля индуцируются за счет взаимодействия пульсаций скорости и внешнего магнитного поля. Параметры вычислительных экспериментов выбраны в соответствии с параметрами эксперимента [3]. Цель данной работы провести сравнительный анализ численных и экспериментальных результатов. Точного соответствия добиться невозможно в силу того, что расчеты проводятся в двухмерной постановке, а экспериментальное течение имеет существенно трехмерную структуру. Тем не менее, результат вычислительного эксперимента позволяют получить физически подобную картину и, в частности, верифицировать уравнение баланса кинетической и мантийной энергии флуктуаций.

Литература

- [1] Соколов Д.Д., Степанов Р.А., Фрик П.Г. Динамо на пути от астрофизических моделей к лабораторному эксперименту // Успехи Физических Наук. 2014. 184. 313–335.
- [2] Денисов С.А., Носков В.И., Соколов Д.Д., Фрик П.Г., Хрипченко С.Ю. О возможности лабораторной реализации нестационарного МГД-динамо // Доклады РАН. 1999. 365. 478–480.
- [3] Noskov V., Stepanov R., Frick P., Pavlinov A., Denisov S. Magnetic field in decaying grid turbulence of liquid sodium // Magnetohydrodynamics. 2019. 55, 1-2. 149–159.

ИНТЕРФЕРЕНЦИОННО-ОПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В МЕХАНИКЕ ДЕФОРМИРУЕМОГО ТВЕРДОГО ТЕЛА И ИХ ПРИЛОЖЕНИЯ В МЕХАНИКЕ РАЗРУШЕНИЯ

Степанова Л.В.¹, Долгих В.С.¹

¹Самарский национальный исследовательский университет имени акад. С.П. Королева,
Самара

stepanova.lv@ssau.ru, dolgichvs2015@yandex.ru

Рассмотрен класс задач экспериментального и численного определения полей напряжений у вершины трещины в изотропном линейно упругом материале в условиях смешанного нагружения. В работе с помощью метода цифровой фотоупругости и конечно-элементного анализа построены многопараметрические разложения полей напряжений и перемещений у вершины трещины и найдены коэффициенты многопараметрического асимптотического разложения М. Уильямса механических полей в пластине с центральной трещиной в поле одноосного растяжения, в пластине с наклонной трещиной и в полудиске с вертикальным и наклонными надрезами, испытанном на трехточечный изгиб. В рядах удержаны высшие приближения (до 15 слагаемых), что позволяет 1) дать более точную оценку компонент тензоров напряжений, деформаций и вектора перемещений; 2) расширить область, в которой работает асимптотическое представление М. Уильямса. С помощью современного приложения, разработанного специально для интерпретации экспериментальной информации, получаемой с помощью метода фотоупругости, осуществлена цифровая обработка экспериментальных данных: автоматически определены точки с минимальной освещенностью, принадлежащие изохроматическим полосам различных порядков. Найденные точки используются для вычисления параметров разрушения (коэффициентов интенсивности напряжений, Т-напряжений и коэффициентов высших приближений). В многофункциональном пакете Simulia Abaqus выполнен конечно-элементный анализ нагружения экспериментальных образцов с трещинами, аналогичных использованному в натурном эксперименте. С помощью рассчитанного напряженно-деформированного состояния на основании переопределенного метода извлечены коэффициенты многопараметрического асимптотического разложения М. Уильямса, в котором удержаны 15 слагаемых. Из конечно-элементного решения извлечены коэффициенты высших приближений многопараметрического асимптотического разложения. Предлагаемый алгоритм был протестирован на пластине с центральной трещиной, длина которой много меньше, чем длина стороны пластины, для сравнения с известным аналитическим решением для бесконечной пластины с трещиной, которое позволяет отыскать все коэффициенты высших приближений асимптотического разложения поля напряжений. Показано, что разработанный алгоритм позволяет найти коэффициенты асимптотического разложения с высокой точностью, включая коэффициенты высших приближений. Для рассмотренного класса экспериментальных образцов с помощью метода голографической интерферометрии также найдены коэффициенты многопараметрического разложения напряжений у вершин двух наклонных взаимодействующих трещин.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант №19-01-00631).

Литература

[1] Stepanova L. V. Experimental determination and finite element analysis of coefficients of the multi-parameter Williams series expansion in the vicinity of the crack tip in linear elastic materials. Part I// PNRPU Mechanics Bulletin. – 2020. – №4. – P. 237-249

ДЕФОРМАЦИЯ СФЕРЫ ИЗ МАГНИТОАКТИВНОГО ЭЛАСТОМЕРА В ОДНОРОДНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Столбов О.В., Райхер Ю.Л.

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

Работа продолжает рассмотрение задачи об определении формы, которую принимает сфера из магнитоактивного эластомера (МАЭ) при наложении однородного магнитного поля [1]. Таким образом, речь идёт об эффекте «внешней» или макроскопической магнитострикции в конечно-размерном объекте. Указанный эффект является прямым следствием размагничивающего поля, действующего внутри образца (оно зависит от формы последнего), и поэтому обсуждаемую магнитомеханическую задачу вполне правомерно решать в континуальном приближении. В соответствии с ним МАЭ рассматривается как сплошная среда, обладающая одновременно упругостью (описываемой потенциалом Пенга-Ландела) и безгистерезисной намагниченностью (описываемой законом Фрёлиха-Кеннелли). Таким образом, предполагается, что перегруппировка частиц наполнителя в объёме полимерной матрицы несущественна, а способность материала к намагничиванию однородна по всему объёму образца. Иными словами, «внутренняя» магнитострикция, обусловленная пространственной перегруппировкой частиц в матрице, в данном случае несущественна.

Для задач такого типа в работе [1] был предложен численный подход, который превосходит все предшествующие по точности и адекватности. С его помощью было показано, что:

- предположение о том, что стрикционная деформация растягивает МАЭ-сферу в сфероид (эллипсоид вращения), справедливо только при ничтожно малых деформациях / слабых полях, в то время как в полях умеренной величины МАЭ-объект, сохраняя осевую симметрию, принимает форму, существенно отличающуюся от эллипсоидальной;
- в композитах с достаточно высокой чувствительностью к магнитному полю (высокая степень наполнения магнитной фазой) стрикционное удлинение имеет гистерезисный характер: при превышении критического значения поля вытяжка МАЭ-объекта скачком увеличивается на конечную величину;
- даже для МАЭ, намагниченность которых недостаточна для возникновения гистерезисного эффекта, имеется пороговый эффект, заключающийся в том, что по достижении полем критического значения конечности объекта из закруглённых становятся клювообразными: в этой точке один из главных показателей кривизны поверхности меняет знак.

Все эти выводы получены в работе [1], где магнитный отклик материала сферы предполагался линейным: намагниченность неограниченно растёт с увеличением приложенного поля. Поскольку стрикционное удлинение является результатом конкуренции упругих и магнитных сил внутри МАЭ, а для возникновения описанных выше гистерезисных явлений требуются поля конечной величины, использованное в [1] предположение о линейности намагничивания малореалистично, хотя, вероятно, пригодно для качественного анализа. В настоящей работе использован нелинейный закон намагничивания, который учитывает насыщение намагниченности реального МАЭ. Новые оценки значительно отличаются от тех, что даны в [1], и, на наш взгляд, должны гораздо лучше подходить для описания экспериментов.

Литература

- [1] Stolbov O.V., Raikher Yu.L. Large-scale shape transformations of a sphere made of a magnetoactive elastomer // Polymers. – 2020. – Vol. 12. – Art. no. 2933.

О РОЛИ ИНЕРЦИОННЫХ ВОЛН В ГЕНЕРАЦИИ ЗОНАЛЬНОГО ТЕЧЕНИЯ ВО ВРАЩАЮЩЕЙСЯ СФЕРЕ С ОСЦИЛЛИРУЮЩИМ ЯДРОМ

Субботин С.В.¹, Ширяева М.А.¹, Козлов В.Г.¹

¹Пермский государственный гуманитарно-педагогический университет, Пермь
subbotin_sv@pspu.ru

Известно, что для вращающихся жидкостей характерно поддержание внутреннего волнового движения, известного как инерционные волны. Последние традиционно рассматриваются во вращающихся сферических слоях в связи с гео- и астрофизическими приложениями. Данная работа посвящена экспериментальному исследованию нелинейного отклика жидкости, связанного с распространением в сферическом слое инерционных волн. Источником возмущений является внутреннее ядро, совершающее поперечные колебания в поперечном направлении вращения. Рассматриваются две ситуации: когда направление колебаний ядра сонаправлено и противоположно вращению полости. Независимо от знака колебаний пространственная структура пульсационного течения представляет собой систему конусообразных свободных сдвиговых слоев, угол наклона которых относительно оси вращения определяется как $\theta = \arcsin(\omega/2)$, где ω – безразмерная частота колебаний.

Обнаружено, что в профиле осредненного зонального течения имеется серия экстремумов, радиальное положение которых согласуется с пространственно-волновой картиной. Анализ результатов показывает, что один из экстремумов связан с критическими широтами на границе ядра, где рождаются инерционные волны. С увеличением частоты колебаний его положение постепенно смещается от границы тангенциального цилиндра к оси вращения. Следующий экстремум связан с отражением инерционных волн от границы полости и ярко проявляется при их фокусировке в волновые аттракторы (Рис. 1). Неоднородность пульсационного движения жидкости в вязком пограничном слое генерирует осредненную геострофическую циркуляцию вблизи точек удара волны о стенку. Наиболее интенсивное зональное течение возникает при резонансном возбуждении собственных инерционных колебаний вращающейся жидкости в виде глобальных вихревых структур (инерционные моды) [1]. В этом случае профиль угловой скорости качественно меняется: максимальное дифференциальное вращение жидкости наблюдается вблизи оси вращения полости, при этом экстремум, связанный наличием критических широт на поверхности ядра, не проявляется.

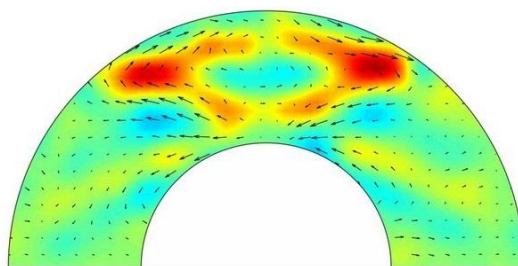


Рис. 1. Пример мгновенного поля скорости при частоте $\omega = -1.80$

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (№18-71-10053).

Литература

[1] Tilgner A. Zonal Wind Driven by Inertial Modes // Phys. Rev. Lett. 2007. Vol. 99. P. 194501.

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ТЕЧЕНИЯ В НЕРАВНОМЕРНО ВРАЩАЮЩЕМСЯ ЦИЛИНДРЕ С НАКЛОННЫМИ ТОРЦАМИ

Субботин С.В.¹, Ширяева М.А.¹

¹Пермский государственный гуманитарно-педагогический университет, Пермь
subbotin_sv@pspu.ru, davydovapsu@gmail.com

Экспериментально исследуется движения жидкости в неравномерно вращающейся (либрирующей) цилиндрической полости с наклонными торцами. Скорость вращения полости в лабораторной системе отсчета меняется по закону $\omega(t) = \Omega(1 + \varepsilon \sin(\Omega_{lib}t))$, где Ω – средняя угловая скорость вращения, Ω_{lib} – угловая частота либраций, ε – амплитуда либраций. В результате вращательных вибраций в местах соединения боковых и торцевых стенок полости рождаются инерционные волны, распространяющиеся в жидкости под углом $\Theta = \arcsin(\sigma/2)$, где $\sigma = \Omega_{lib}/\Omega$. Благодаря азимутальной неоднородности геометрии торцов инерционные колебания происходят неосесимметричным образом.

Обнаружено, что при определенных частотах либраций после многократного отражения от стенок полости инерционные волны формируют глобальные осциллирующие вихревые структуры – инерционные моды (Рис. 1). В отличие от [1] вихревые структуры являются азимутально-неоднородными ($k=1$) и в течение периода либраций совершают вращательные колебания относительно полости с амплитудой $\sim \pi/2$.

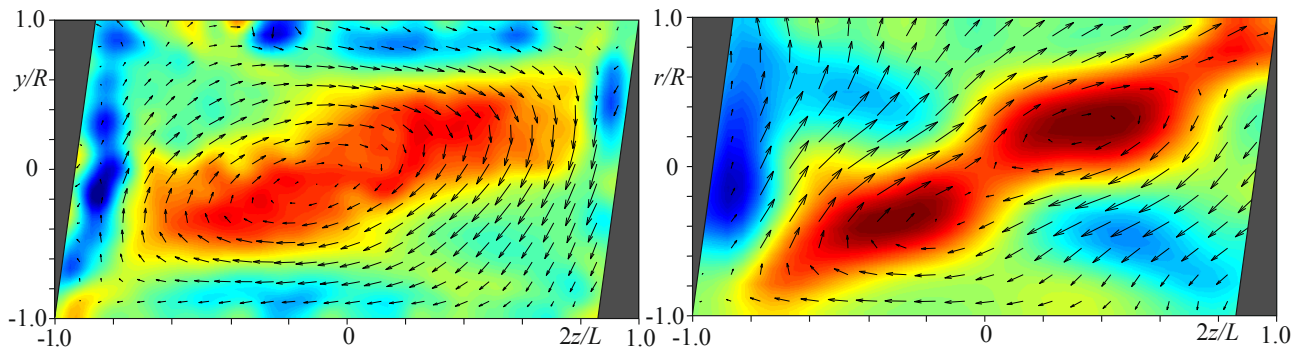


Рис. 1. Мгновенное поле скорости при частоте $\sigma = 0.52$ (слева) и 0.68 (справа)

Колебания жидкости приводят к возникновению осредненного течения в динамических пограничных слоях Стокса вблизи боковой стенки цилиндра. Течение имеет вид струй, бьющих вдоль всей боковой стенки. Направление осредненного движения жидкости меняется на противоположное через азимутальный угол $\sim \pi$. С увеличением номера моды осредненное течение трансформируется: направление движения жидкости в струях, а также их количество меняется.

Работа выполнена при поддержке Гранта Президента Российской Федерации (проект МК-1779.2021.1.1) и Правительства Пермского края (грант для ведущей научной школы С-26/1191).

Литература

[1] Subbotin S. Steady circulation induced by inertial modes in a librating cylinder // Phys. Rev. Fluids 2020. V. 5 (1). 014804.

ФИЗИЧЕСКИЙ МЕХАНИЗМ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛООБМЕНА В СЛУЧАЕ НЕОДНОРОДНЫХ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ

Сухановский А.Н., Васильев А.Ю.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
san@icmm.ru, vasiliev.a@icmm.ru

Одной из интересных проблем конвекции Рэлея-Бенара является влияние неоднородных граничных условий на структуру течения и конвективный теплоперенос. Ранее в [1], при помощи математического моделирования конвекции Рэлея-Бенара в кубической полости для неоднородного распределения нагрева на нижней границе, было показано, что пространственное распределение нагрева влияет на структуру течения и величину теплового потока. В данной работе основной упор сделан на изучение структуры пограничного температурного слоя и физического механизма, отвечающего за варьирование теплового потока при изменении пространственного распределения нагрева. В работах [2,3], в которых задавались периодические граничные условия на одной из горизонтальных границ, было показано, что с уменьшением размера нагреваемых областей (с ростом пространственной частоты) происходит монотонный рост теплопотока, который в результате стремится к теплопотoku в случае однородных граничных условий. Авторы [3] предложили физическую интерпретацию этого эффекта, а именно гомогенизацию пограничного слоя за счет горизонтальных потоков тепла и достижения при уменьшении размера нагреваемых областей структуры пограничного слоя, такой же, как и в случае однородных граничных условий. Для изучения этого явления в данной работе использовались несколько конфигураций неоднородного нагрева, ранее представленных в [1], для чисел Рэлея равных 10^7 и $2 \cdot 10^9$. Показано, что в рассмотренных случаях неоднородного нагрева, структура пограничного температурного слоя также сильно неоднородна. Неоднородность пограничного слоя является результатом нескольких факторов, а именно пространственным распределением нагрева, структурой крупномасштабной циркуляции и влиянием мелкомасштабных течений, над локализованными нагревателями. Обнаружено, что толщина пограничного слоя может быть значительно меньше, чем в случае классической конвекции Рэлея-Бенара. Наблюдаемое уменьшение толщины пограничного температурного слоя и соответствующий рост теплопотока, определяется размером нагреваемых областей, чем они меньше тем этот эффект сильнее. Формирование пограничного слоя и варьирование его толщины подобно хорошо известному случаю формирования пограничного температурного слоя при натекании холодного потока на нагретую пластину, когда толщина пограничного слоя нарастает от края до некоторого асимптотического значения.

Работы проведены при поддержке проекта РФФИ №19-41-590004, расчеты проводились на вычислительном кластере «Тритон» (ИМСС УрО РАН).

Литература

- [1] Васильев А.Ю., Сухановский А.Н., Степанов Р.А. Конвективная турбулентность в кубической полости при неоднородном нагреве нижней границы // Вычислительная механика сплошных сред. 2019. Т.12, № 1. Стр. 17 – 26.
- [2] P. Ripesi, L. Biferale, M. Sbragaglia, A. Wirth. Natural convection with mixed insulating and conducting boundary conditions: low- and high Rayleigh number regimes // Journal of Fluid Mechanics 742 (2014)636–663.
- [3] D. Bakhuis, R. Ost - , E. van der Poel, R. Verzicco, D. Lohse. Mixed insulating and conducting thermal boundary conditions in Rayleigh-Benard convection // Journal of Fluid Mechanics 835 (2018) 491–511.

ГИБРИДНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

Тагильцев И.И.^{1,2}, Шутов А.В.^{1,2}

¹Новосибирский государственный университет, Новосибирск

²Институт Гидродинамики им. М.А.Лаврентьева, Новосибирск

i.i.tagiltsev@gmail.com, alexey.v.shutov@gmail.com

В прикладных задачах механики твердого тела рассматриваемые структуры зачастую являются преднапряженными, то есть имеют остаточные напряжения, возникающие в процессе их создания. В качестве примеров подобных структур можно рассматривать биологические мягкие ткани и сварные швы.

В текущей работе композитный материал моделируется в рамках гипотезы Фойгта, при которой в рассматриваемом элементарном объеме напряжения вычисляются как сумма напряжений его составляющих. Исследование посвящено моделированию остаточных напряжений с помощью так называемого F_0 -подхода и его применению при оценке напряжений в структурах с ограниченным количеством экспериментальных данных. Основой подхода является описание перехода материальной частицы между двумя отсчетными конфигурациями: ненапряженной и разгруженной. При этом важно не только корректное использование геометрических пре- и пост-процессоров, но и правильная трансформация начальных условий. В работе развивается геометрически нелинейная постановка, не требующая предположений о малости упругих или неупругих деформаций. Для моделирования неупругих свойств материала используется мультипликативное разложение тензора градиента деформации, при этом показано, что учет остаточных напряжений с помощью F_0 -подхода не увеличивает сложности используемых вычислительных алгоритмов [1]. Для нахождения поля остаточных напряжений с помощью экспериментальных данных вводится параметризация поля F_0 , после чего решается обратная задача минимизации функционала разницы напряжений в контрольных точках. Показано, что такой метод устойчив к различным способам параметризации поля начальных деформаций.

Предлагаемый подход внедрен в комплекс конечных элементов MSC.MARC. В качестве демонстрации подхода проведено моделирование преднапряженных кровеносных сосудов и сварных металлических конструкций. Первые моделируются как вязкоупругий композит, в котором матрица армирована семействами волокон; вторые – как изотропный упругопластичный материал с упрочнением. В обоих случаях применяются эффективные вычислительные алгоритмы безитерационного интегрирования эволюционных уравнений [2, 3, 4].

Литература

- [1] Tagiltsev I. I., Shutov A. V. Geometrically nonlinear modelling of pre-stressed viscoelastic fibre-reinforced composites with application to arteries //Biomechanics and modeling in mechanobiology. – 2020. – С. 1-15.
- [2] Tagiltsev I. I., Laktionov P. P., Shutov A. V. Simulation of fiber-reinforced viscoelastic structures subjected to finite strains: multiplicative approach //Meccanica. – 2018. – Т. 53. – №. 15. – С. 3779-3794.
- [3] Shutov A. V., Tagiltsev I. I. Efficient numerics for the analysis of fibre-reinforced composites subjected to large viscoplastic strains //State of the Art and Future Trends in Material Modeling. – Springer, Cham, 2019. – С. 367-380.
- [4] Shutov A. V. Efficient implicit integration for finite-strain viscoplasticity with a nested multiplicative split //Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. – 2016. – Т. 306. – С. 151-174.

ПРЕДОПЕРАЦИОННАЯ ОЦЕНКА РИСКОВ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ОСЛОЖНЕНИЙ В ЭНДОВАСКУЛЯРНОЙ НЕЙРОХИРУРГИИ: ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НА ОСНОВЕ КЛИНИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Тихвинский Д.В.^{1,2}, Куянова Ю.О.² Паршин Д.В.²

¹Новосибирский государственный университет, Новосибирск

² Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск
d.tikhvinskii@g.nsu.ru, july9696@mail.ru, danilo.skiman@gmail.com

Церебральные аневризмы являются широко распространенным заболеванием и встречаются в среднем в количестве 50 на 1000 человек населения[1]. Целью данной работы является изучение причин реканализации церебральных аневризм при лечении их эндоваскулярно установкой поток-перенаправляющих устройств.

В работе мы рассмотрели виртуальную установку поток-перенаправляющих устройств в церебральные сосуды пациент-специфичной геометрии, которая была получена в результате реконструкции DICOM-изображений реальных пациентов, проходивших лечение в Национальном медицинском исследовательском центре им. академика Е.Н. Мешалкина. Согласно локальному комитету по этике, данные пациентов предоставляются анонимизированными, были получены согласия пациентов на использование материалов в научных целях. В нашей работе мы проводим численное моделирование в ANSYS 17/2 (Лицензия ИГИЛ СО РАН).

В работе численно в пакете ANSYS 17.2 подтверждается, что именно изменение значений WSS (касательного напряжения на стенке сосуда) для постоперационной конфигурации сосудов со стентом по сравнению с дооперационной соответствует хорошему исходу. Полученное в ходе расчетов распределение значений WSS по поверхности стента дало примерные границы этих значений для удачного и неудачного исходов операции. Полученный результат обнаруживает сходство с влиянием изменения значений WSS для других внутрисосудистых устройств [2]. Статистический анализ результатов численного моделирования показывает устойчивые и значимые отклонения в значениях WSS в области после установки стента для различных исходов операций, что является новым предиктором для определения рисков развития послеоперационных осложнений.

Литература

- [1] D.M. Sforza, C.M. Putman and J.R. Cebal Computational fluid dynamics in brain aneurysms. International Journal for Numerical Methods in Biomedical Engineering 2011
- [2] Q. Zhang, L. Jing, J. Liu, K. Wang, Y. Zhang, N. Paliwal, H. Meng, Y. Wang, Sh. Wang, and X. Yang. Predisposing factors for recanalization of cerebral aneurysms after endovascular embolization: a multivariate study. Journal of NeuroInterventional Surgery, 10(3):252—257, 2018.

ПРЯМАЯ ДВУХУРОВНЕВАЯ УПРУГОВЯЗКОПЛАСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ: ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДСТАВИТЕЛЬНОГО ОБЪЁМА ПОЛИКРИСТАЛЛА МЕТАЛЛА

Токарев А.А., Янц А.Ю

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
maximus5.59@gmail.com, tokarev28.art@gmail.com

В последние годы в работах механиков и физических металловедов (В.Е. Панин, Л.Б. Зуев и др.), посвященных высокоточным экспериментальным исследованиям, часто отмечается существенное влияние на поведение металлических образцов внутренних и внешних границ кристаллитов (как для моно-, так и для поликристаллов) при деформировании оных [1]. Границы играют важнейшую роль в формировании концентраторов напряжений и в распространении пластических сдвигов в объеме образца. Ранее был проведен анализ представительного объема поликристалла с использованием статистической модели поликристалла, которая не учитывала влияние границ (внутренних и внешних) на отклик материала. Данная работа позволила уточнить значения представительного объема путем постановки и решения прямой краевой задачи деформирования образца. Для определения отклика материала использовалась упруговязкопластическая модель, учитывающая эволюционирующую структуру на различных масштабных уровнях [2]. Сперва проводилась генерация зёрненной структуры образца, которая происходила путём разбиения куба, представляющего из себя геометрию всего поликристалла, на равные подкубы, каждый из которых описывает геометрию конкретного зерна, а затем полученная геометрия разбивалась на конечные элементы при помощи пакета gms. Ориентации зёрен выбирались по случайному равномерному закону для каждой реализации процесса нагружения. На двух противоположных гранях образца задавались кинематические граничные условия сжатия. Для решения поставленных краевых задач для разного количества зёрен использовался метод конечных элементов в скоростной постановке [3]. Был проведен анализ интенсивности напряжений для множества реализаций процессов нагружения в момент сжатия образца на 1%, осреднённых по всему объёму. Полученная кривая стандартного отклонения напряжений монотонно падает при увеличении количества зёрен, а кривая среднего значения имеет асимптотический характер при пилообразной форме с амплитудой, не превышающей 3%.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 20-31-70027) и Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (базовая часть государственного задания ПНИПУ FSNM-2020-0027).

Литература

- [1] Панин В.Е., Егорушкін В.Е., Панин А.В. Физическая мезомеханика деформируемого твердого тела как многоуровневой системы. I. Физические основы многоуровневого подхода // Физ. мезомех. 2006. Т.9. №3. С. 9-22.
- [2] Трусов П.В., Швейкин А.И., Нечаева Е.С., Волегов П.С. Многоуровневые модели неупругого деформирования материалов и их применение для описания эволюции внутренней структуры // Физ. мезомех. 2012. №1.
- [3] Поздеев А.А., Трусов П.В., Няшин Ю.И. Большие упругопластические деформации: теория, алгоритмы, приложения. – М.: Наука, 1986. 232 с.

ОЦЕНКА ОСНОВНЫХ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ЕСТЕСТВЕННОЕ НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ МАССИВОВ СОЛЯНЫХ ПОРОД

Токсаров В.Н.¹

¹ГИ УрО РАН», Пермь
tokсарov@mi-perm.ru

Анализ ранее проведенных исследований [1-11] показал, что коэффициент бокового распора пород (λ) в слоистом соляном массиве находится в определенном диапазоне, который определяется двумя основными факторами. Первый - это геологический фактор давления вышележащих пород, а второй – геомеханический фактор предела октаэдрической прочности соляных пород. Вертикальная компонента главных напряжений на всех типах месторождений (купола, пласты, антиклинали) определяется весом вышележащих пород. Дополнительными факторами, оказывающими влияющими на местное распределение напряжений в нетронутым массиве соляных пород, является наличие разного рода геологических аномалий: складки, диапиры, трещины, разломы, наличие воды и пр.

На глубинах до 200 м соляные породы в слоистых толщах по данным инструментальных измерений находятся практически в упругом состоянии ($\lambda=0,4$). С увеличением глубины отмечается рост коэффициента бокового распора, который на глубине 1000 м равен 0,8. Можно предположить, что на глубинах порядка 1500 м слоистые соляные породы находятся в гидростатическом состоянии ($\lambda \approx 1$).

В соляных куполах отсутствует тенденция изменения средних горизонтальных напряжений с глубиной. Коэффициенты бокового распора изменяются в диапазоне от 0,8 до 1,0, что свидетельствует о напряженном состоянии, близком к гидростатическому.

В соляных массивах в тектонически активных регионах во многих случаях горизонтальные напряжения превышают вертикальные. Выравнивание горизонтальных и вертикальных напряжений наблюдается на глубинах более 1500 м.

Литература

- [1]. Serata S., Milnor S.W. Geomechanics of bedded salt, Berkeley, 1979, 184 p.
- [2]. Cristescu N. D. A general constitutive equation for transient and stationary creep of rock salt / Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol. 30, No. 2, pp. 125-140, 1993.
- [3]. Галаев Н.З., Рыженьков А.М. Оценка напряженного состояния крутопадающих калийных залежей в зависимости от глубины их залегания и состояния отработки / Разработка соляных месторождений. - Пермь, 1986.- с. 39-46.
- [4]. Проскуряков Н.М., Ковалев О.В. Исследование напряженного состояния калийных пластов в зонах геологических нарушений // Напряженное состояние породных массивов.- Новосибирск, 1978.- с. 7-9.
- [5]. Adachi T., Serata S., Sakurai S. Determination of underground stress field based on inelastic properties of rocks / The 11th U.S. Symposium on Rock Mechanics (USRMS), June 16 - 19, Berkeley. 1969.- p. 293-328.
- [6]. Schnapp, M.J., Kocherhans J.G., Nelson A. Stress measurements in salt in a deep borehole, southeastern Utah // Hydraulic Fracturing Stress Measurements, National Academy Press, Washington, 1983, pp. 79-85.
- [7]. Heusermann S., Eickemeier R., Sprado K.H., Hoppe F.J. Initial rock stress in the Gorleben salt dome measured during shaft sinking / Geotechnical Measurements and Modelling).- Swets & Zeitlinger; Lisse, Netherlands, 2003.- pp. 139-144.
- [8]. Doe, T.W., Osnes J.D. In Situ Stress and Permeability Tests in the Hutchinson Salt and the Overlying Shale, Kansas / Solution Mining Research Institute Fall Meeting, Rapid City, SD, October 2-4, pp. 181-213.
- [9]. Токсаров В.Н. Анализ полей напряжений в массивах соляных пород / Стратегия и процессы освоения георесурсов: материалы ежегод. науч. сессии Горного института УрО РАН.- Пермь, 2012.- с. 105-108.
- [10]. Eriksson, L.G., Michalski, A. Hydrostatic conditions in salt domes - a reality or a modeling simplification? / in Proc. Int. Symp. on Rock Stress and Rock Stress Measurements, Stockholm, Centek Publ.- Lulea, 1986.- pp. 121-132.

АКУСТОУПРУГИЙ ЭФФЕКТ ПРИ ПЛАСТИЧЕСКОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ И УСТАЛОСТНОМ РАЗРУШЕНИИ МЕТАЛЛОВ

Третьяков Д.А.¹, Беляев А.К.^{1,2}

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

²Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург

trityakov_da@spbstu.ru, vice.ipme@gmail.com

Рассматривается акустоупругий эффект – явление пропорциональности между действующими механическими напряжениями и скоростями упругих поперечных волн, распространяющихся в напряженной среде. Данный эффект, свойственный кристаллическим твердым телам, был теоретически предсказан [1], а затем и экспериментально исследован [2] для широкого класса металлов, и лег в основу ряда методов неразрушающего контроля, применяемых в промышленной диагностике для оценки величины главных напряжений в случае плосконапряженного состояния наряду с тензометрией [3].

В основе линейной акустоупругости, разработанной на базе теории конечных деформаций с использованием потенциала Мурнагана, лежит измерение фазового сдвига между скоростями поперечных волн, распространяющихся в материале вдоль осей главных напряжений, величина которого характеризуется параметром акустической анизотропии. В результате многочисленных исследований [3,4], удалось установить, что для упруго деформируемых материалов зависимость акустической анизотропии от напряжений имеет линейный характер. Этот факт лег в основу отечественного метода акустоупругости [4].

Для случая пластических деформаций аналогичная зависимость не была получена. В научной литературе известен ряд моделей, с той или иной точностью описывающих акустоупругий эффект в диапазоне малых пластических деформаций [5]. Как правило, полученные согласно им оценки говорят об эффектах второго порядка. Вместе с тем, последние исследования [6,7] указывают на то, что пластические деформации и дефекты оказывают значительно большее влияние на акустоупругий эффект в реальных материалах.

В работе рассмотрены случаи монотонного неупругого деформирования, а также малоциклового нагружения образцов из промышленного проката в широком диапазоне деформаций. Получена обобщенная кривая зависимости параметра акустической анизотропии от величины осевых деформаций. Исследован вопрос влияния потери устойчивости поверхностного слоя в процессе деформирования на величину акустоупругого эффекта. На основании экспериментально полученного поля акустической анизотропии показано, что локализация пластических деформаций и дефектов в поверхностном слое материала оказывает существенное влияние на интегральную величину акустоупругого эффекта. Предложен новый подход к оценке величины поврежденности по результатам измерений скоростей упругих волн и параметра акустической анизотропии.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов №№ 20-38-90208 и 20-08-01100.

Литература

- [1] Biot M.A. The influence of initial stress on elastic waves //J. Appl. Phys. – 1940. – Vol.11 (8). – pp.522-530.
- [2] Hughes D.S., Kelly J.L. Second-order elastic deformation of solids //Phys. Rev.– 1953.– Vol.92 (5). –pp.1145-1149.
- [3] Гузь А.Н., Махорт Ф.Г., Гуша О.И. Введение в акустоупругость – Киев, 1977. – 148 с.
- [4] Никитина Н.Е. Акустоупругость. Опыт практического применения. – Н. Новгород, 2005. – 208 с.
- [5] Kobayashi M. Acoustoelastic theory for finite plastic deformation of solids //JSME. –1992.– Vol.35 (1). – pp.45-52.
- [6] Ерофеев В.И., Морозов А.Н., Никитина Е.А. Учет влияния поврежденности материала на скорость распространения в нем упругой волны //Труды МАИ. – 2010. – №. 40. – С. 4-8.
- [7] Belyaev A.K. et al. Estimating the plastic strain with the use of acoustic anisotropy //Mechanics of Solids. – 2016. – Vol.51 (5). – pp.606-611.

КОЭФФИЦИЕНТ ТЕПЛОВОГО РАСШИРЕНИЯ ТОНКИХ ПЛЕНОК ФОТОПОЛИМЕРОВ

Труфанов А.Н.

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

Современные оптоволоконные датчики и приборы на их основе должны обеспечивать корректность измеряемых данных в достаточно широком температурном диапазоне, в условиях которого в используемых материалах могут происходить релаксационные переходы. Известно, что изменение температуры существенно влияет на термомеханические свойства полимеров, а при размягчении или стекловании значения некоторых параметров могут меняться в разы и даже на порядки [1]. Чем точнее известны зависимости характеристик используемых материалов от температуры, тем полнее можно учитывать и компенсировать отклонения, наведенные термо-механическими воздействиями.

В работе рассмотрено влияние температуры на коэффициент температурного расширения (КТР) полимеров с целью разработки технологичной методики его измерения и построения функциональных зависимостей, учитывающих условия и характер эксплуатации.

Разработана методика исследования температурных зависимостей КТР на динамомеханическом анализаторе. Выполнена верификация полученных данных на других измерительных приборах. На натурных экспериментах продемонстрировано, что коэффициент температурного расширения полимеров зависит не только от температуры, но и от скорости ее изменения, что обусловлено конформационными механизмами. Установлено, что влияние скорости изменения температуры тем выше, чем больше задаваемая программой эксперимента скорость изменения температуры и меньше толщина образца, т.е. чем быстрее обеспечивается изменение температуры материала образца. Полученные данные показывают, что измерение КТР в пленках полимеров, при двух разных скоростях изменения температуры, отличных даже на единицы градусов в минуту, может приводить к существенному отличию значений при фиксированных значениях температуры. Описываемый эффект наблюдается не только в области релаксационного перехода, но и в существенно более широком диапазоне температур. Таким образом коэффициент температурного расширения зависит не только от абсолютного значения температуры, но и от скорости ее изменения и температурной истории в целом, в результате чего в образцах с разной историей могут реализовываться существенно отличающиеся картины полей деформации при одинаковых термо-механических воздействиях. Также установлено, что в условиях термоцикла «нагрев-охлаждение» в полимерах могут накапливаться остаточные деформации. В виду того, что зависимости температурного расширения полимера, снятые при нагреве и охлаждении - не совпадают, т.к. площадь, ограниченная графиком зависимости КТР от температуры, является температурной деформацией и всегда можно выбрать диапазон изменения температуры, в котором между площадями под кривыми соответствующими охлаждению и нагреву будет существенная разница. Описанный эффект продемонстрирован на натурном эксперименте.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края в рамках научного проекта № 20-48-596009.

Литература

[1] Бартенев Г., Зеленов Ю. Физика и механика полимеров: Учебное пособие. Высшая школа. 1983.

МАКРОСКОПИЧЕСКАЯ НАМАГНИЧЕННОСТЬ XY-МАКРОСПИНОВОЙ СИСТЕМЫ В РАМКАХ ОБОБЩЕННОЙ ТЕОРИИ ОТТА–АНТОНСЕНА

Тюлькина И.В.¹, Голдобин Д.С.^{1,2}, Клименко Л.С.^{1,2}, Поперечный И.С.¹, Райхер Ю.Л.¹

¹Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

²Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь

irinatiulkina95@gmail.com

Рассматривается задача о фазовых переходах между низкотемпературными состояниями магнитного (макроспинового) упорядочения в двумерных XY-массивах [1, 2]. Система моделируется как ансамбль идентичных однодоменных частиц, выстроенных в квадратную решетку на плоскости, и связанных посредством диполь-дипольного взаимодействия. Все частицы обладают сильной магнитной анизотропией типа «легкая плоскость». В рассматриваемом диапазоне температур основным состоянием системы является антиферромагнитная структура «полосчатого» типа, в которой макроспины (магнитные моменты индивидуальных частиц) подвержены термодинамическим флуктуациям: температура суперпарамагнитной блокировки T_b ниже таковой T_{af} для антиферромагнитного перехода.

Описание основано на стохастических уравнениях динамики индивидуальных магнитных моментов, взаимодействие которых задается в рамках приближения среднего поля. В рамках обобщенной теории Отта-Антонсена [3–5] описывается динамика параметров порядка (включая макроспиновую намагниченность и антиферромагнитный параметр порядка), а также строго получена и проанализирована статистическая сумма системы. В диапазоне температур, в котором существует антиферромагнитное фазовое состояние, постоянное магнитное поле, произвольно наклоненное к плоскости структуры, может вызвать фазовые переходы первого рода из антиферромагнитного состояния в ферромагнитное. Построена фазовая диаграмма устойчивых и метастабильных состояний.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ № 19-42-04120.

Литература

- [1] Tyulkina I.V., Goldobin D.S., Klimenko L.S., Poperechny I.S., Raikher Y.L. Collective in-plane magnetization in a two-dimensional XY macrospin system within the framework of generalized Ott-Antonsen theory // Philosophical Transactions of the Royal Society A. – 2020. – Vol. 378. – P. 20190259.
- [2] Leo N., Holenstein S., Schildknecht D., Sendetskyi O., *et al.* Collective magnetism in an artificial 2D XY spin system // Nature Communications. – 2018. – Vol. 9. – P. 2850.
- [3] Tyulkina I.V., Goldobin D.S., Klimenko L.S., Pikovsky A. Dynamics of noisy oscillator populations beyond the Ott-Antonsen ansatz // Physical Review Letters. – 2018. – V. 120, № 26. – P. 264101.
- [4] Голдобин Д.С., Тюлькина И.В., Клименко Л.С., Пиковский А. К описанию коллективной динамики в ансамблях реальных осцилляторов // Вестник Пермского университета. Физика. – 2018. – № 3 (41). – С. 5–7.
- [5] Goldobin D.S., Tyulkina I.V., Klimenko L.S., Pikovsky A. Collective mode reductions for populations of coupled noisy oscillators // Chaos. – 2018. – V. 28, № 10. – P. 101101.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСШИРЕНИЯ ПОЛОСТИ В ВОДЕ ПРИ ЭЛЕКТРОВЗРЫВЕ

Уваров С.В., Баяндин Ю.В., Банникова И.А

ИМСС УрО РАН, Пермь

usv@icmm.ru

Работа посвящена экспериментальному исследованию и моделированию распространения волн сжатия и расширения полости, инициированных электровзрывом проводника. Электровзрыв производился на экспериментальной установке, разработанной в ИМСС УрО РАН [1]. Батарея конденсаторов ёмкостью 0,33 мкФ заряжалась до напряжения 30кВ. Накопленная энергия составляла 150Дж. Процесс регистрировался высокоскоростной камерой Photron FASTCAM SA-Z 2100K с частотой кадров 1 млн к/с. Данные высокоскоростной съёмки позволили измерить скорость распространения волны сжатия и скорость расширения полости, которые составили 1474 м/с и 750 м/с соответственно. Измеренная скорость ударной волны близка по значению к скорости, измеренной другим методом [1]. Также было обнаружено, что поверхность, соответствующая фронту ударной волны гладкая. Что позволяет сделать вывод об отсутствии возмущений на фронте с размерами более 0,5мкм

Для моделирования откольного разрушения было предложено введение объемных дефектов в жидкости. Приведено обобщение энтропии и свободной энергий на случай неравновесного состояния. В работе представлены результаты расчетов скорости свободной поверхности при ударно волновом нагружении, с учетом дефектов, вязкости и сжимаемости. Для описания поведения УВ при взрыве в жидкости было принято следующее: Жидкость вязкая и сжимаемая, принимается гипотеза о том, что до давления в 10 ГПа температурные эффекты в ударной волне несущественны, объемной вязкостью пренебрегаем, предполагается, что температурная волна порожденная взрывом распространяется медленнее, чем ударная волна, поэтому ее влияние мало так как скорость распространения теплового возмущения примерно равна 0.22 м/с, что пренебрежимо мало по сравнению со скоростью звука в воде.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края, проект № 19-48-590016 и №. 20-41-596013

Литература

- [1] Банникова И.А., Зубарева А.Н., Уткин А.В., Уваров С.В., Наймарк О.Б. Метастабильные состояния, релаксационные механизмы и разрушение жидкостей при интенсивных воздействиях// Физическая мезомеханика-.2016.С.69-77.

АНАЛИЗ ДЕФОРМИРОВАНИЯ СОЛЯНЫХ ПОРОД ГРЕМЯЧИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ В РЕЖИМЕ ПОЛЗУЧЕСТИ

Ударцев А.А.

Горный институт УрО РАН, Пермь

udartsev@mi-perm.ru

Исследования физико-механических свойств горных пород являются неотъемлемой составляющей эффективной и безопасной отработки месторождений полезных ископаемых. Это особенно актуально для Гремячинского месторождения калийных солей (ГМКС), на котором идет строительство первого рудника. Разработка данного калийного месторождения, расположенного в пределах Котельниковского района Волгоградской области, ведется в сложных горно-геологических условиях. Соляные породы залегают на глубине 1100-1300 м, продуктивный пласт представлен сильвинитом, а вмещающие породы карналлитом, каменной солью и доломит-ангидритовыми породами. Безопасность ведения горных работ планируется осуществлять за счет использования камерной системы разработки с оставлением поддерживающих междуканальных целиков, работающих в режиме ползучести и находящихся в объёмно-напряженном состоянии. В этой связи, изучение характера деформирования во времени под действием постоянной сжимающей нагрузки продуктивных пластов месторождения и наиболее слабых вмещающих карналлитовых пород является актуальной задачей.

В рамках выполнения данной работы был проведен комплекс лабораторных исследований, включающий испытания сильвинитовых и карналлитовых образцов по схеме Кармана (боковое давление $\sigma_3 = 0, 5$ и $7,5$ МПа) в режиме условно-мгновенного нагружения, а так же в условиях ползучести. Методика проведения экспериментов представлена в работе [1].

По результатам экспериментов на условно-мгновенное сжатие определялись предел прочности, модуль деформаций и спада. По результатам длительных испытаний строились кривые ползучести при различных уровнях нагружения, которые использовались для построения графиков длительной прочности и определения скорости установившейся ползучести. Получены зависимости скорости установившейся ползучести от степени нагружения и бокового давления. Установлен характер влияния бокового давления на предел длительной прочности сильвинитовых и карналлитовых пород.

Литература

[1] Барях А. А., Асанов В. А., Паньков И. Л. Физико-механические свойства соляных пород Верхнекамского калийного месторождения: учеб. пособие. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2008. – 199 с.

ЗАДАЧИ ОБ ИНТЕРФЕЙСНЫХ ТРЕЩИНАХ. НЕКОТОРЫЕ ТОЧНЫЕ РЕШЕНИЯ

Устинов К.Б.¹

¹Институт проблем механики РАН, Москва

ustinov@ipmnet.ru

Среди работ, посвященных пограничным трещинам, следует отметить фундаментальные работы [1, 2], в которых было получено распределение напряжений вблизи вершины трещины [1], и получена связь между коэффициентами интенсивности напряжений (КИН) и скоростью высвобождения энергии [2]; а также работу [3], где было показано, что распределение полей напряжений определяется лишь двумя безразмерными параметрами - комбинациями упругих постоянных (параметров Дундурса).

В докладе представлен ряд точных аналитических решений задач двумерной теории упругости о трещинах, проходящих по границе раздела материалов, обладающих различными упругими свойствами. Применением интегральных преобразований - двустороннего преобразования Лапласа либо преобразования Меллина - задачи сведены к функциональным уравнениям, либо к системам двух уравнений, соответствующих скалярным либо матричным задачам Римана, асимптотики решения которых получены в виде однократных интегралов. Решения получены на основе метода [4,5], разработанного для задач о трещинах в однородных телах и обобщенных в работах автора [6-10] для интерфейсных трещин в составных телах при некоторых ограничениях на параметры Дундурса. В докладе представлены следующие решения: слой, отслаивающийся от полуплоскости [6], расслаиваемая составная полоса [7], приграничная наклонная интерфейсная трещина в полуплоскости [10]. Также представлено обобщение решения задачи о составной полосе на случай анизотропии [8,9].

Литература

- [1] Williams M.L., The stresses around a fault or crack in dissimilar media. Bull. Seismol. Soc. Am., 1959, 49, 199–204.
- [2] Salganik R.L., The brittle fracture of cemented bodies. J. Appl. Math. Mech, 1963, 27, 1468–1478.
- [3] Dundurs J. Discussion: Edge-bonded dissimilar orthogonal elastic wedges under normal and shear loading. J. Appl. Mech. Trans. ASME, 1969, 36, 650–651.
- [4] Khrapkov, A. Certain cases of the elastic equilibrium of an infinite wedge with a nonsymmetric notch at the vertex, subjected to concentrated forces. J Appl Math Mech 1971. 35(4), 625–637.
- [5] Zlatin A.N., Khrapkov A.A. Semi-infinite crack parallel to the boundary of an elastic half-plane. Sov. Phys. Dokl, 1986, 31, 1009.
- [6] Ustinov K. On separation of a layer from the half-plane: elastic fixation conditions for a plate equivalent to the layer. Mech. Solid. 2015, 50 (1), 62–80.
- [7] Ustinov K. On semi-infinite interface crack in bi-material elastic layer. Eur. J. Mech. A Solids, 2019, 75, 56–69.
- [8] Ustinov K.B., Massabò, R., Lisovenko D.S., Orthotropic strip with central semi-infinite crack under arbitrary loads applied far apart from the crack tip. Analytical solution. Engineering Failure Analysis, 2020, 110, 104410.
- [9] Ustinov K.B., Idrisov D., On delamination of bi-layers composed by orthotropic materials: Exact analytical solutions for some particular cases, ZAMM, 2021, DOI: 10.1002/ZAMM.202000239.
- [10] Ustinov, K.B., Certain cases of elastic equilibrium of a composed wedge with an interface crack. Mathematics and Mechanics of Solids, 2020, 25 (12) 2199-2209.

К РАЦИОНАЛЬНОМУ ПРОЕКТИРОВАНИЮ ОСНАСТКИ ПРИ РЕЗОНАНСНЫХ ИСПЫТАНИЯХ ОБЪЕКТА

Уткин А.О.¹, Яковкин В.Н.¹, Келлер И.Э.²

¹АО "ОДК-Авиадвигатель", Пермь

²Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь

flaymel@yandex.ru, jakovkin@avid.ru

Для оценки прочности и ресурса деталей газотурбинного двигателя требуются соответствующие испытания, которые, для экономии временных и материальных затрат, проходят в лабораторных условиях [1-4]. Такие испытания требуют наличие специального приспособления для закрепления объекта исследования на экспериментальном оборудовании (оснастки) [3-4]. Зафиксированы случаи, когда применение вибронагружающего экспериментального оборудования высокой мощности не позволяет достичь требуемого уровня возбуждения объекта исследования, что затрудняет проведение усталостных испытаний. В большинстве случаев это объясняется неверно сконструированном и примененном приспособлении для крепления объекта исследования [1-3]. Рациональное проектирование таких приспособлений для эффективных и безопасных испытаний является важной задачей.

Существенное сокращение временных затрат при проектировании оснастки достигается путем численного моделирования динамики системы вибростенд-оснастка-объект. Для рационального проектирования конструкции оснастки критерием служат параметры амплитудно-частотной характеристики испытываемого объекта в окрестности заданной частоты его колебаний в условиях испытаний. Решение данной задачи для множества различных объектов (лопаток газотурбинного двигателя) требует применение общих принципов, основанных на динамике колебательных систем [5].

В работе с помощью конечноэлементной модели динамического поведения системы вибростенд-оснастка-лопатка, реализованной в пакете ANSYS, исследовалось изменение уровня возбуждения лопатки при заданных собственной частоте ее колебаний и усилии вибростенда за счет изменений параметров конструкции оснастки. Исследованы ситуации, когда испытываемая лопатка выступает в качестве динамического гасителя, а также слияние собственных частот колебаний оснастки и лопатки. Для калибровки коэффициентов демпфирования и подтверждения данных расчета экспериментом выполнены эксперименты, в которых регистрировались виброускорения и вибронапряжения по четырем датчикам, установленным на лопатке и оснастке.

Литература

- [1] Под ред. Писаренко Г.С. Прочность материалов и элементов конструкции в экстремальных условиях, в двух томах. Том 2.- Институт проблем прочности.- Киев.: Наукова Думка, 1980, 743 с.
- [2] Серенсен С.В., Гарф М.Э., Кузьменко В.А. Динамика машин для испытаний на усталость. – М.: Машиностроение. – 1967, 460 с., ил.
- [3] Шорр Б.Ф., Серебряков Н.Н., Стадников А.Н., Шадрин Д.В., Руденко Е.С., Каначкин А.В., Бортников А.Д. Экспериментально – расчетные исследования эффективности различных способов демпфирования колебаний деталей газотурбинных двигателей // Вестник самарского государственного аэрокосмического университета, Том 14, №3, Ч.1, 2015.
- [4] Ровков В.А., Жабко Н.И., Коломнец Ю.А. Вибростенд для усталостных испытаний объектов // Пат. SU 1057806 А, дата подачи заявки 26.01.78, дата публикации 30.11.83, бюл. №44, с.4.
- [5] Utkin A.O., Yakovkin V.N. Modeling of Rig Dynamics to Determine Dynamic of GTE Elements Performance under Shaker Conditions // Journal of Physics: Conference Series (JPCS), 2020.

НАДКРИТИЧЕСКИЕ ДВИЖЕНИЯ В РАВНОМЕРНО ВРАЩАЮЩЕМСЯ СЛОЕ СМЕШИВАЮЩИХСЯ РЕАГИРУЮЩИХ ЖИДКОСТЕЙ

Уточкин В.Ю., Брацун Д.А., Сираев Р.Р.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь

vyutochkin@pstu.ru, dabracun@pstu.ru, rrsiraev@pstu.ru

Анализируется влияние поля центробежной силы на развитие конвективного движения в системе реагирующих жидкостей, помещенных во вращающуюся ячейку Хеле-Шоу (рис.1,а). Начальная конфигурация включает в себя два concentрических слоя водных растворов реагентов сильная кислота – сильная основа, разделенных тонкой диффузионной границей. Ранее в статическом поле тяжести были впервые обнаружены новые режимы конвекции [1,2]. Отличие рассматриваемой задачи заключается в том, что причиной хемоконвективного движения является центробежная сила, интенсивность которой растет с расстоянием от оси вращения и может варьироваться за счет изменения частоты вращения. Так как порог возбуждения режимов зависит от указанных выше параметров, взаимодействие конвективных мод может происходить в разных сочетаниях. Возможно также получить хемоконвективные режимы, наблюдавшиеся в [1,2], в «чистом» виде.

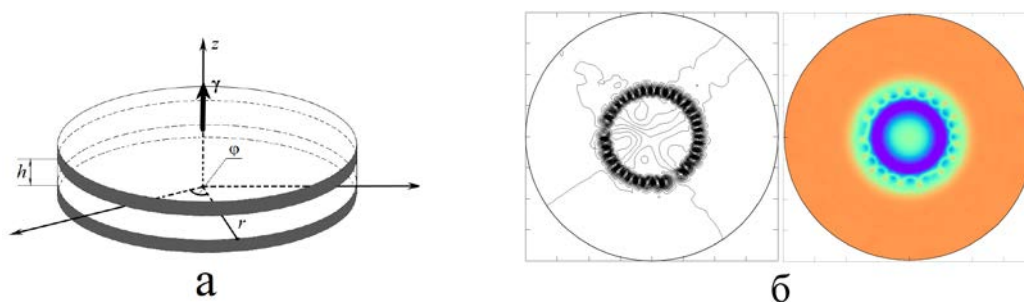


Рис.1. (а) – схематическое изображение ячейки Хеле-Шоу, (б) – локализованная система конвективных вихрей

В работе демонстрируются результаты численного расчета нелинейной динамики. Показано, что в зависимости от начальных концентраций в системе могут осуществиться различные сценарии развития неустойчивости. Зависимость коэффициентов диффузии компонентов смеси от их концентрации приводит к возникновению потенциальной ямы в профиле плотности. Под действием инерционного поля в ней может развиваться конвективное движение в виде периодической последовательности вихрей (рис.1,б). При достаточном удалении линии начального контакта растворов от оси вращения теряет устойчивость область жидкости, примыкающая к оси. На ячейки это оказывает модулирующее воздействие, поэтому периодичность структуры может быть нарушена с ростом как угловой скорости, так и удаленности от оси вращения. При изменении начальных концентраций данный режим сменяется волной плотности, быстро распространяющейся в направлении инерционного поля. Обнаружен эффект увеличения скорости распространения волнового фронта с ростом перегрузки. Найдены границы существования указанных режимов в зависимости от параметра вращения и расстояния до оси.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 19-11-00133).

Литература

- [1] Bratsun D., Kostarev K., Mizev A., Mosheva E. Concentration-dependent diffusion instability in reactive miscible fluids // Phys. Rev. E. – 2015. – Vol. 92. – 011003.
- [2] Bratsun D., Mizev A., Mosheva E., Kostarev K. Shock-wave-like structures induced by an exothermic neutralization reaction in miscible fluids // Phys. Rev. E. – 2017. – Vol. 96. – 053106.

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ АРМИРОВАННЫХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА

Ушканов А.А., Слепцова С.А.

Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова, Якутск
alexanderushkanov@mail.ru, ssard@yandex.ru

В настоящее время полимерные композиционные материалы (ПКМ) являются наиболее востребованными материалами, используемыми в технике и машиностроении, и обеспечивают не только замену металлов и сплавов, но и повышают надежность и долговечность деталей машин, работающих в экстремальных условиях Крайнего севера [1]. Среди полимеров, применяющихся для изготовления деталей узлов трения, наиболее предпочтительным комплексом свойств обладает политетрафторэтилен (ПТФЭ) [2]. Это непрозрачный полимер с низким коэффициентом трения, хороший диэлектрик, не подвержен действию грибка и отличается самой высокой среди полимеров химической стойкостью, а также термо- и морозостойкостью [3]. Основными недостатками ПТФЭ являются высокий уровень износа и хладотекучесть, которые в свою очередь приводят к необходимости частого ремонта узлов трения и уплотнений. Наполнение матрицы различными по природе ингредиентами является весьма эффективным методом устранения этих недостатков.

Целью работы является исследование влияния наполнителей различной природы на свойства ПТФЭ.

Объектами исследования служили ПТФЭ и композиты на его основе, содержащие в качестве наполнителей углеродные волокна марки «Белум» или базальтовые волокна завода «Сахабазальт», ультрадисперсный ПТФЭ марки «ФОРУМ®» и α -оксид алюминия. Подготовка компонентов заключалась в сушке при температуре 180°C в течение 4 часов, затем оксид алюминия отдельно подвергали предварительной механической активации в течение 2 мин в планетарной мельнице с частотой вращения барабанов 1800 об/мин. Образцы для испытаний получали сухим смешением компонентов с последующим холодным прессованием для их формования, после чего их спекали в муфельной печи при 375°C и калибровали для корректировки формы образцов и устранения последствий термической усадки при спекании. Исследования проводились по стандартным методикам.

Результаты проведенных исследований показали, что полученные композиты обладают существенно улучшенными свойствами по сравнению с ненаполненными полимерами и промышленно выпускаемыми материалами на основе ПТФЭ. Установлено, что одновременное введение базальтового волокна и α -оксида алюминия в качестве наполнителя ПТФЭ позволило значительно повысить износостойкость материала (до 1500 раз) при высоком сохранении значений деформационно-прочностных характеристик. Выявлено, что композит с тем же содержанием наполнителей обладает меньшей хладотекучестью в 2,8 раза, чем чистый полимер.

Литература

- [1]. Васильев, А.П. Эксплуатационные характеристики политетрафторэтилена разных марок, модифицированных углеродными волокнами / А.А. Охлопкова, Т.С. Стручкова, А.Г. Алексеев, Е.С. Колесова, П.Н. Гракович // Вестник СВФУ. - 2017. - № 4 (60). - С. 34-46.
- [2]. Мамаев, О.А. Повышение механических и триботехнических свойств композитов на основе ПТФЭ оптимизацией состава и технологии / О.А. Мамаев // Омский научный вестник. - 2011. - № 1 (97). - С. 33-37.
- [3]. Сокольская, М.К. Связующие для получения современных полимерных композиционных материалов / М.К. Сокольская, А.С. Колосова, И.А. Виткалова, А.С. Торлова, Е.С. Пикалов // Фундаментальные исследования. – 2017. – № 10 (2). – С. 290-295.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ ТЕРМОУСАЖИВАЕМЫХ ТРУБОК С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ

Фасхутдинова Ю.Б.¹, Сметанников О.Ю.¹

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
fub26@mail.ru, sou2009@mail.ru

Полимерные термоусаживаемые трубки из сшитого полиэтилена с памятью формы широко применяются в качестве изоляционного материала для соединений проводов и труб благодаря простоте использования и высоким эксплуатационным качествам. Уменьшение продольной усадки позволит существенно повысить удобство применения изделий на практике, поэтому исследование термомеханического поведения термоусаживаемых трубок при различных условиях производства и эксплуатации является одной из актуальных задач механики [1]. В данной работе рассмотрено влияние типа ограничений в осевом направлении на этапе экспандинга на конечную продольную деформацию готовых изделий на этапе термоусадки.

В рамках исследования, в качестве определяющих выбраны соотношения вязкоупругой модели Прони без объемной релаксации. Для учета больших деформаций при описании модели поведения материала использован потенциал упругой энергии нео-Гука. Проведена экспериментальная идентификация выбранных определяющих соотношений в DMA испытаниях с постоянной частотой в технологическом температурном интервале. Для верификации физической модели разработана и реализована программа эксперимента по ступенчатому одноосному нагружению образца из сшитого полиэтилена в нескольких температурных диапазонах с последующим отслеживанием релаксации напряжений.

Выполнено численное моделирование технологического этапа экспандинга трубки с последующей термоусадкой готового изделия. Рассматривался фрагмент конечной длины, проходящий те же технологические операции, что и реальный фрагмент в составе всей заготовки. Проведен ряд вычислительных экспериментов, различающихся типом ограничений в осевом направлении. С целью подтверждения предварительных выводов о причинах продольной усадки реализовано численное моделирование этапа экспандинга, приближенное к реальному процессу производства, учитывающее контактное взаимодействие и движение заготовки по полости экспандера. Найдены условия, обеспечивающие существенное уменьшение осевой усадки.

Выполнена серия численных экспериментов по моделированию восстановления формы в условиях контактной задачи при термоусадке готового изделия на трубу диаметром, превышающим начальный диаметр трубки. Установлена зависимость остаточной деформации после усадки от величины отношения радиусов. Показана вероятность демонстрации изделием как относительной усадки, так и относительного удлинения, в зависимости от величины продольной усадки на этапе экспандинга.

Исследования проведены при финансовой поддержке Правительства Пермского края в рамках научного проекта: «Модели, методы и цифровые технологии для создания функциональных композиционных и полимерных материалов с помощью их обработки концентрированными потоками гамма-частиц в различных газовых средах».

Литература

[1] Сметанников О.Ю., Фасхутдинова Ю.Б., Субботин Е.В. Исследование средствами ANSYS эффекта памяти формы в изделиях из сшитого полиэтилена // Вычислительная механика сплошных сред. – 2020. – Т. 13, № 2. – С 134 – 149.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОБРАЗОВАНИЯ, ДРЕЙФА И КОАЛЕСЦЕНЦИИ ПАРОГАЗОВЫХ ПУЗЫРЬКОВ В ВОДНЫХ РАСТВОРАХ СОЛЕЙ И ПАВ В СОНОХИМИЧЕСКОМ РЕАКТОРЕ

Фатталов О.О.^{1,2}, Любимова Т.П.^{1,2}, Рыбкин К.А.^{1,2}, Кучинский М.О.^{1,2}

¹Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

²Пермский государственный университет, Пермь

fattalov@mail.ru

Экспериментально исследована временная динамика популяции пузырьков в объеме жидкости, при наличии поверхностно активного вещества (ПАВ) sodium dodecyl sulfate (SDS) и солей KCl, NaCl различной концентрации в сонохимическом реакторе флотационной машины ФМЛ-1.

Актуальность данной тематики подтверждается активной публикацией работ по ней разными исследователями за последние два года (см., например, [1-3]), что связано с активным развитием вопроса о оптимизации процессов флотации за счет ультразвукового воздействия (УЗ). Особенностью настоящего исследования заключается в одновременном наличии не только ионов солей [4], но и молекул ПАВ в водном растворе, которые оказывают влияние на процессы образования, дрейфа и коалесценции пузырьков.

В экспериментах наблюдался эффект генерации парогазовых пузырьков за счет процесса акустической кавитации с их последующей коалесценцией. Динамика пузырьков фиксировалась с помощью оптической системы регистрации данных, состоящей из камеры Basler acA1920 с объективом TC2MHR036-C и коллимированным источником монохроматического света, а также скоростной камеры Basler a504kc. Затем, с помощью специализированного программного обеспечения определялись размеры и количеством пузырьков в каждый момент времени. Показано, что наличие ПАВ и солей в водных растворах приводит к ингибированию процесса коалесценции пузырьков, а также, к смене режима УЗ дегазации жидкости и изменению динамики пузырьков, находящихся в узлах акустических стоячих волн.

Исследование выполнено при финансовой поддержке из средств гранта Российского научного фонда (проект № 20-69-46066).

Литература

- [1] Suja V. C. et al. Bubble coalescence in worm-like micellar solutions //arXiv preprint arXiv:2006.11965. – 2020.
- [2] Liu B. et al. Coalescence of bubbles with mobile interfaces in water //Physical review letters. – 2019. – Т. 122. – №. 19. – С. 194501.
- [3] Guo D. S. et al. Bubble behaviors during subcooled pool boiling in water and nonionic surfactant aqueous solution //International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2020. – Т. 159. – С. 120087.
- [4] Rybkin K. A. et al. Experimental study of formation and dynamics of cavitation bubbles and acoustic flows in NaCl, KCl water solutions //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2017. – Т. 879. – №. 1. – С. 012026.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ РОСТА ОДИНОЧНОГО ПУЗЫРЬКА В ВОДНЫХ РАСТВОРАХ СОЛЕЙ И ПАВ РАЗЛИЧНЫХ КОНЦЕНТРАЦИЙ ПОД ДЕЙСТВИЕМ УЛЬТРАЗВУКА

Фатталов О.О.^{1,2}, Любимова Т.П.^{1,2}, Рыбкин К.А.^{1,2}, Кучинский М.О.^{1,2}, Козлов М.В.²

¹ *Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

² *Пермский государственный университет, Пермь*

cozlov.maks@mail.ru

Как известно, при ультразвуковом воздействии в жидкостях образуются парогазовые пузырьки, поведение которых широко исследуется в литературе [1-3]. Настоящая работа является продолжением исследования [4], посвященного воздействию ультразвука на солевые растворы.

В данной работе исследована динамика роста одиночного пузырька в дистиллированной воде, в водных растворах солей NaCl и KCl различной концентрации, а также в дистиллированной воде при наличии поверхностно-активного вещества sodium dodecyl sulfate (SDS) в сонохимическом реакторе флотационной машины ФМЛ-1 при ультразвуковом воздействии на жидкость с частотой 28 кГц.

В экспериментах наблюдались закрепление и дальнейший рост одиночного пузырька на акриловой пластинке вблизи стенки сонохимического реактора, который был изготовлен из органического стекла толщиной 3 мм. Динамика роста одиночного пузырька в экспериментах фиксировалась с помощью оптической системы регистрации данных, которая состояла из камеры Basler acA1920-155um с объективом TC2MHR036-C и коллимированного источника монохроматического света. Для определения размера пузырька в каждый момент времени было разработано специализированное программное обеспечение. Эксперименты показали, что размеры и динамика роста одиночного пузырька зависят от наличия ПАВ и солей в водных растворах. Так, в дистиллированной воде, наблюдается увеличение среднего диаметра пузырька, на фоне его периодических осцилляций в следствии УЗ воздействия. В растворах солей и ПАВ различной концентрации, в связи уменьшением интенсивности коалесценции пузырьков, скорость роста пузырька падает, кроме того максимальный размер закрепившегося на поверхности пузырька существенно уменьшается.

Исследование выполнено при финансовой поддержке из средств гранта Российского научного фонда (проект № 20-69-46066).

Литература

- [1] Wu J., Nyborg W. L. Ultrasound, cavitation bubbles and their interaction with cells //Advanced drug delivery reviews. – 2008. – Т. 60. – №. 10. – С. 1103-1116.
- [2] Merouani S. et al. Effects of ultrasound frequency and acoustic amplitude on the size of sonochemically active bubbles–theoretical study //Ultrasonics sonochemistry. – 2013. – Т. 20. – №. 3. – С. 815-819.
- [3] Xu Z. Numerical simulation of the coalescence of two bubbles in an ultrasound field //Ultrasonics sonochemistry. – 2018. – Т. 49. – С. 277-282.
- [4] Rybkin K. A. et al. Experimental study of formation and dynamics of cavitation bubbles and acoustic flows in NaCl, KCl water solutions //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2017. – Т. 879. – №. 1. – С. 012026.

АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЙ ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ РАЗМЕЩЕНИИ НА ПОВЕРХНОСТИ КОНСТРУКЦИЙ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ НА ПОДЛОЖКАХ

Фёдоров А.Ю.¹, Виндокурова Е.Р.²

¹*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь*

²*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
fedorov@icmm.ru, vindokurova@i-sensor.ru*

Волоконно-оптические датчики деформаций являются в сравнении с другими типами датчиков относительно новым инструментом измерения деформации. Интерес к этим датчикам и рост числа их приложений на различных объектах определяются: малыми размерами, невосприимчивостью к электромагнитным помехам, размещением нескольких датчиков на одной линии и рядом других достоинств. Вместе с тем, обоснованное использование волоконно-оптических датчиков деформаций требует решения ряда новых задач. Одна из которых связана с оценкой перераспределения деформаций при встраивании датчиков в измеряемый объект. Волоконно-оптические датчики деформаций могут встраиваться в материал, либо располагаться на его поверхности. При использовании второго варианта наиболее распространённая конструкция датчиков представляет собой оптическое волокно, смонтированное на подложке из металлического или полимерного материалов, которая в свою очередь должна быть жёстко прикреплена к поверхности контролируемой конструкции. При этом естественно ожидать, что размещение этой подложки на поверхности конструкции приведёт к локальному перераспределению деформаций. В данной работе предлагается математическая модель для оценки изменения полей деформаций и приводятся информативные данные об изменении компонент тензора деформаций в зависимости от соотношения механических характеристик подложки и материала, на поверхности которого размещается волоконно-оптический датчик деформаций, при различных размерах конструкции в зоне расположения датчика.

ВЛИЯНИЕ ГИДРОИЗОЛЯЦИОННОГО ТАМПОНАЖА НА СОХРАННОСТЬ ВОДОЗАЩИТНОЙ ТОЛЩИ

Федосеев А.К.¹

¹ Горный институт Уральского отделения Российской академии наук, Пермь, Россия
rm-anton@mi-perm.ru

В условиях значительных деформаций породного массива вокруг отработанного пространства случается, что традиционные методы защиты рудника от затопления, такие как закладка очистных камер, не могут обеспечить сохранность водозащитной толщи (ВЗТ). В качестве одного из возможных методов предотвращения проникновения пресных вод в выработанное пространство рассматривается закачка тампонажных материалов и создание противифльтрационной завесы в породах соляно-мергельной толщи (СМТ), обеспечивающей гидроизоляцию нарушенной зоны в ВЗТ. По результатам расчетов закачки разных тампонажных материалов на специальном полигоне, наиболее предпочтительным материалом для пород толщи СМТ представляется FORTIS WN-AM100S. Целью геомеханических исследований являлась оценка последствий воздействия давления тампонажа на сохранность ВЗТ с учетом ее уже нарушенного состояния. Для анализа деформирования подработанного массива во времени использовался реологический подход, основанный на математическом описании прогнозных графиков нарастания оседаний земной поверхности. Локализация пластических деформаций в физическом смысле трактовалась, как разрушение пород ВЗТ: в области сжатия вследствие развития трещин сдвига, в области растяжения – трещин отрыва. Для оценки влияния давления тампонажа на изменение напряженно-деформированного состояния ВЗТ рассматривались два варианта закачки тампонажных растворов: через одну скважину, расположенную над центром нарушенной зоны и более жесткий сценарий, когда максимальное давление поддерживается в пределах всей области трещиноватости в кровле ВЗТ. Для этих двух вариантов дополнительно выполнялись расчеты, отражающие возможность проникновения под давлением тампонажных растворов в нарушенную часть ВЗТ. Максимальные давления тампонажа изменялись в диапазоне от 10 до 20 атм. По результатам геомеханического анализа были определены максимальные значения давления нагнетания, при которых в пределах рассмотренного опасного участка существует потенциальная возможность создания гидроизоляционной завесы в породах соляно-мергельной толщи.

МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ И АНАЛИЗА ДЕТАЛЕЙ ИЗ ЯЧЕИСТОГО МАТЕРИАЛА ПЕРЕМЕННОЙ ПЛОТНОСТИ

Фетисов К.В.¹, Максимов П.В.¹

¹*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь*
k.v.fetisov@inbox.ru, pvmperm@mail.ru

В докладе представлена методика проектирования, анализа прочности и оптимизации деталей, в состав которых входит геометрическая ячеистая микроструктура переменной плотности. Изготовление подобных малых конструкций возможно методами аддитивного производства, например, по технологии селективного лазерного сплавления изготавливаются металлические конструкции с мельчайшими элементами типа стержней, тонких оболочек, диаметр или толщина которых достигает 0.3 мм [1]. Благодаря этому данная аддитивная технология, а также изготовленные детали активно используются в аэрокосмической технике, медицине, приборостроении. При этом методики проектирования и анализа подобных конструкций не сформированы, что делает данное исследование актуальным. Предлагаемая методика состоит из нескольких этапов. На первом этапе происходит подбор типа микроструктуры из базы стержневых и тонкостенных элементарных ячеек под определенный вид напряженного состояния. Далее происходит вычисление эффективных механических характеристик ячейки при разной плотности и температуре, после чего полученные свойства используются в определении оптимальной плотности ячеистой микроструктуры в детали при помощи модифицированного алгоритма топологической оптимизации SIMP [2]. Завершающий этап – создание геометрической, расчетной и технологической модели детали с геометрической ячеистой микроструктурой. Все перечисленные этапы и соответствующие им вычисления были выполнены численно, методом конечных элементов в программном комплексе ANSYS в рамках линейной теории упругости. В практической части исследования данная методика была использована для дополнительного снижения массы ранее оптимизированных кронштейнов аэрокосмической техники [3,4].

Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ по государственному заданию FSNM-2020-0028.

Литература

- [1] Brandt M. Laser Additive Manufacturing: Materials, Design, Technologies and Applications. Woodhead Publishing, 2016. 498 p.
- [2] Bendsøe, M. P. Optimization of Structural Topology, Shape, and Material. Springer, 1995. 267 p.
- [3] Faskhutdinov R.N., Dubrovskaya A.S., Dongauzer K.A. et al. Topology optimization of a gas-turbine engine part. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 177 012077. 2017.
- [4] Dubrovskaya A., Dongauzer K., Faskhutdinov R. The design of lightweight gas turbine engine parts using topology optimization. MATEC Web of Conferences 129, 01067. 2017.

ПОВЕРХНОСТНЫЙ ЭФФЕКТ ПРИ ДИФФУЗИИ ВОДОРОДА В МИКРОПОЛЯРНОЙ СРЕДЕ

Фролова К.П.^{1,2}, Вильчевская Е.Н.^{1,2}, Полянский В.А.^{1,2}

¹Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург

² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург
kspfrolova@gmail.com

В работе предлагается модель для описания поверхностного эффекта, наблюдаемого экспериментально при искусственном насыщении металлических образцов водородом. Поверхностный эффект заключается в существенно неравномерном распределении концентрации водорода по толщине образца, при котором практически весь водород аккумулируется в тонком поверхностном слое порядка нескольких характерных размеров зерен металла [1]. Разработанная модель описывает перенос водорода в микрополярной сплошной среде с учетом взаимовлияния внутренних напряжений и деформаций и накопленного в результате диффузии водорода.

Решается связанная задача для осесимметричного образца. При определении его напряженно-деформированного состояния учитываются как силовые, так и моментные взаимодействия между частицами упругой среды; вводятся трансляционные и вращательные степени свободы [2, 3]. На боковой поверхности образца задается либо распределенный момент, моделирующий наличие дефектов, образованных в результате обработки поверхности, либо независимые повороты, моделирующие развороты зерен. Полученные поля напряжений и деформаций резко убывают при удалении от боковой поверхности образца к центру, при этом размеры области затухания решения определяются неклассическими упругими модулями, отражающими «размерный эффект» и позволяющими учесть структурную неоднородность материала на мезоуровне. При решении уравнения диффузии учитывается влияние энергии упругой деформации среды, являющейся быстро убывающей функцией радиальной координаты. Насыщение материала водородом сопровождается собственными деформациями, приводящими к перераспределению напряженно-деформированного состояния в образце, что, в свою очередь, влияет на процесс диффузии.

Предложенная модель позволила описать быстрый процесс диффузии водорода в приповерхностной области и медленный – при удалении от нее. Полученные результаты качественно и количественно совпадают с экспериментальными данными.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 20-08-01100).

Литература

- [1] Polyanskiy V.A., Belyaev A.K., Alekseeva E.L., Polyanskiy A.M., Tretyakov D.A., Yakovlev Y.A. Phenomenon of skin effect in metals due to hydrogen absorption – Continuum Mechanics and Thermodynamics. – 2019. – V. 31(6). – P. 1961–1975.
- [2] Eringen A.C. Theory of micropolar elasticity – Microcontinuum field theories. – 1999. – P. 101–248.
- [3] Eremeyev V.A., Lebedev L.P., Altenbach H. Foundations of micropolar mechanics – Springer Science & Business Media, 2012.

ЗАДАЧИ СО СВОБОДНОЙ ГРАНИЦЕЙ В МОДЕЛИ ВОДНОГО РАСТВОРА ПОЛИМЕРА

Фроловская О.А.

*Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск
Новосибирский государственный университет, Новосибирск*

oksana@hydro.nsc.ru

Для описания движения слабых водных растворов полимеров используется математическая модель [1], учитывающая релаксационные свойства среды. Искомые функции являются вектор скорости и давление. По сравнению с классической моделью Навье-Стокса исследуемая модель содержит дополнительный параметр – коэффициент релаксационной вязкости.

Рассматривается задача о нестационарном движении водного раствора полимера в полосе, ограниченной снизу твердой стенкой, а сверху – параллельной ей плоской свободной границей. Уравнения и соотношения на свободной границе содержат член с релаксационной вязкостью. Это означает, что релаксационные свойства среды могут проявить себя на свободной границе.

В линейной задаче течение имеет слоистый характер, и ширина полосы постоянна [2]. Точное решение этой задачи представимо рядом Фурье.

В нелинейной задаче ищется решение, в котором продольная компонента скорости является линейной функцией продольной координаты, а поперечная компонента скорости и давление не зависят от этой координаты. Исследуется изменение ширины полосы со временем в зависимости от параметра, пропорционального коэффициенту релаксационной вязкости. Выявлено влияние релаксации напряжений на свободной границе на характер течения. Здесь возможны два режима движения: стабилизация движения к покою с течением времени и разрушение решения за конечное время, то есть ширина полосы мгновенно становится неограниченной.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-01-00096).

Литература

- [1] Павловский В.А. К вопросу о теоретическом описании слабых водных растворов полимеров // ДАН СССР. 1971. Т. 200, № 4. С. 809-812.
- [2] Пухначев В.В., Петрова А.Г., Фроловская О.А. Растворы полимеров и их математические модели // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2020. № 2 (206). С. 84-93.

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ПЕРЕНОСА ПРИМЕСИ ПРИ ЗАКУПОРКЕ ПОРИСТОЙ СРЕДЫ

Хабин М.Р.^{1,2}, Колчанов Н.В.^{1,2}, Евграфова А.В.¹, Марышев Б.С.¹

¹Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

²Пермский государственный университет, Пермь

mikhail.khabin@mail.ru, kolchanovn@gmail.com, eav@icmm.ru, bmaryshev@mail.ru

Большинство природных пористых сред имеют довольно сложную структуру. Обычно перенос растворенных веществ в пористой среде описывается в рамках стандартной диффузионной модели. Однако многие экспериментальные данные не могут быть объяснены в рамках такого подхода, так как транспорт через пористую среду часто осложняется иммобилизацией растворенного вещества. Иммобилизация приводит к уменьшению размера пор, а это означает изменение проницаемости среды. Изменение проницаемости, в свою очередь, приводит к вариации скорости фильтрации. Существует несколько наиболее популярных моделей, описывающих процессы иммобилизации растворенных веществ при фильтрации через пористую среду.

В данной работе экспериментально исследуется процесс транспорта примеси через пористую среду. Экспериментальная установка представляет собой медную трубку, заполненную пористой средой. В качестве наполнителя использованы стеклянные шарики заданного диаметра. Это наиболее доступный вариант наполнителя с хорошо контролируемым размером зерна. Через трубку осуществляется фильтрация дистиллированной воды, при постоянном перепаде давления между входом и выходом. Процесс фильтрации чистой жидкости осуществляется до полного насыщения среды водой. Контроль насыщения осуществляется электронными весами с точностью не менее 1%. В момент времени, когда достигнуто полное насыщение среды, начинается закачка раствора NaCl постоянной концентрации. Одновременно проводится измерение концентрации NaCl и массового расхода смеси на выходе из трубки. Измерения проводятся непрерывно до момента регистрации нулевой концентрации и постоянного расхода. В результате получается кривая выноса примеси (зависимость концентрации на выходе от времени) и зависимость расхода от времени для каждого значения перепада давления и концентрации NaCl на входе.

Для оценки транспортных параметров среды численно решалась одномерная задача о переносе растворенного вещества. Уравнение Дарси использовалось для моделирования течения в пористой среде. Предполагалось, что проницаемость однозначно зависит от пористости среды, использовалось соотношение Козени-Кармана. Перенос растворенного вещества моделировался в рамках МІМ подхода с учетом насыщения немобильной фазы и линейной кинетики десорбции. Предполагалось, что в этом случае пористость среды уменьшается пропорционально объемной концентрации адсорбированного вещества. Таким образом, при решении описанной задачи можно получить зависимость концентрации растворенного вещества и расхода на выходе от времени. На основе сравнения экспериментальных данных с данными, полученными в ходе численного моделирования, решается обратная задача идентификации транспортных параметров среды. Получены значения коэффициентов сорбции, эффективного коэффициента диффузии. Также показано, что в пределах погрешности метода эти параметры практически не зависят от перепада давления и концентрации растворенного вещества на входе.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20-11-20125)

ПРОВОДЯЩИЙ ЦИЛИНДР ВО ВНЕШНЕМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Халилов Р.И.

ИМСС УрО РАН, Пермь

[*khalilov@icmm.ru*](mailto:khalilov@icmm.ru)

Для обеспечения безопасности технологических процессов, их необходимо оснащать измерительными приборами, способными обеспечить надежное и точное измерение уровня. Основной задачей измерения уровня является определение положения поверхности среды внутри хранилища, реактора или резервуара. Точнее, измерение уровня заключается в определении линейного расстояния по вертикали между точкой отсчета (которая обычно совпадает с дном емкости) и поверхностью жидкости, сыпучей среды, или границей раздела двух жидкостей. Точное измерение уровня жидкости в емкости, реакторе или ином резервуаре имеет большое значение для многих технологических процессов.

В технологических процессах, где используются жидкие металлы, часто затруднено прямое измерение уровня. Высокая температура, необходимая герметичность объемов, высокое давление, агрессивная среда часто приводят к использованию бесконтактных методов измерения. Одним из таких является индуктивный метод измерения уровня. Необходимым условием использования этого метода является электрическая проводимость среды.

В работе исследуется взаимодействие переменного магнитного поля и неподвижной проводящей среды. Генерация магнитного поля осуществляется цилиндрической катушкой. Проводящая среда представляет собой жидкий металл, помещенный в цилиндрический объем. Магнитное поле катушки генерирует вихревые токи в цилиндрическом проводящем теле, которые создадут вторичное магнитное поле. Суперпозиция начального и вторичного магнитных полей представляет собой результирующее магнитное поле. Таким образом, наличие проводящего цилиндрического тела приводит к искажению магнитного поля катушки. Этот метод используется в ряде индукционных электромагнитных устройств, одним из которых является уровнемер.

В работе численно и экспериментально исследуется способ определения границы раздела проводящего тела. Метод измерения основан на воздействии переменного магнитного поля на проводящее тело. Искажения магнитного поля регистрируются катушками (либо измерительными, либо самой генерирующей). Численно рассчитаны распределения магнитных полей, их искажения вблизи проводящего тела. Разработана и создана лабораторная экспериментальная установка, подтверждающая численные расчеты.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Правительства Пермского края в рамках научного проекта «Разработка систем измерения расхода жидкого металла в каналах металлургических и ядерных энергетических установок»

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНВЕРСИЙ ГАЛАКТИЧЕСКОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА БОЛЬШИХ РАССТОЯНИЯХ ОТ ЦЕНТРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЫЧИСЛЕНИЙ НА ВИДЕОКАРТАХ

Хасаева Т.Т.¹, Михайлов Е.А.¹, Тепляков И.О.²

¹Московский государственный институт имени М.В. Ломоносова, Москва

²Объединенный институт высоких температур РАН, Москва

В настоящий момент хорошо известно, что ряд галактик обладают магнитными полями величиной несколько микрогаусс. Они генерируются при помощи механизма динамо, в рамках которого рост поля обеспечивают два явления: альфа-эффект, связанный с турбулентными движениями межзвездного вещества, и дифференциальное вращение галактического диска [1]. Особый интерес представляют так называемые инверсии магнитного поля, связанные с резкой сменой его направления [2].

Можно отметить ряд работ, посвященных изучению процессу формирования магнитных полей с инверсиями [3, 4, 5]. Как правило, они использовали так называемое планарное приближение. Оно основано на том, что магнитное поле сосредоточено главным образом в экваториальной плоскости. Кроме того, галактический диск можно считать достаточно тонким и предположить, что зависимость поля от вертикальной координаты описывается косинусоидальным законом.

Вместе с тем, важно отметить, что данные работы связаны с изучением магнитных полей на относительно умеренных расстояниях от центра галактики (в пределах 8 – 10 кпк). При этом, существуют работы, говорящие о возможности генерации магнитных полей на расстояниях вплоть до 15 – 20 кпк [6]. Встает вопрос о том, может ли направление магнитного поля на таком расстоянии быть противоположным по сравнению с полем во внутренних областях – иначе говоря, можем ли мы наблюдать инверсию на периферии галактики.

Отдельный вопрос относится к начальным условиям для системы уравнений динамо. В силу того, что начальные поля связаны с турбулентными эффектами, логично использовать стохастические начальные условия [3]. Необходимость перебора существенного количества выборок случайных начальных значений вместе с большими пространственными масштабами требует наличия значительных вычислительных ресурсов.

Одна из возможностей решения этой проблемы - использование параллельных вычислений на видеокартах. В настоящей работе нами с использованием технологии CUDA был исследован вопрос о генерации магнитных полей на больших расстояниях от центра. Показано, что в таком случае можно получить решения с инверсиями нужного нам типа. Также установлено, что стохастические начальные условия могут привести к их возникновению.

Литература

- [1] Beck, R., Brandenburg, A., Moss, D., Shukurov, A., Sokoloff, D. Galactic Magnetism: Recent Developments and Perspectives. *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* 1996, 34, 155.
- [2] C. L. van Eck, J. C. Brown, J. M. Stil et al. Modeling the Magnetic Field in the Galactic Disk Using New Rotation Measure Observations from the Very Large Array. *Astrophys. J.*, 2011, 728, 97.
- [3] Moss, D., Stepanov, R., Arshakian, T. G. et al. Multiscale magnetic fields in spiral galaxies: evolution and reversals. *Astron. Astrophys.* 2011, 537, A68.
- [4] Андреасян Р. Р., Михайлов Е. А., Андреасян А. Р. Структура и особенности формирования инверсий галактического магнитного поля // *Астрономический журнал*. — 2020. — Т. 97, No 3. — С. 179–189.
- [5] Mikhailov, E., Khasaeva, T. Evolution of the magnetic field reversals in galaxies. *Bulgarian Astronomical Journal*. 2019, 31, 39.
- [6] Mikhailov, E., Kasparova, A., Moss D. et al. // Magnetic fields near the peripheries of galactic discs. *Astron. Astrophys.* 2014, 568, A66.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ТЕЧЕНИЯ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА VOF

Хегай Е.И.¹

¹Томский государственный университет, Томск
efim_h@ftf.tsu.ru

Высокая сложность технологического процесса литья, многообразие конструкций массопроводов, большое количество влияющих на результат параметров и множество других факторов привели к разработке программных средств моделирования течений вязкой жидкости. Численный анализ позволяет спрогнозировать и предотвратить возникновение дефектов изделий, связанных с особенностями технологического процесса. В связи с этим разработка средств численного моделирования течений вязких жидкостей является актуальной задачей на сегодняшний день.

В настоящей работе проведено моделирование течения вязкой жидкости, реализуемого при заполнении ёмкости в пространственной постановке. Жидкость поступает в ёмкость через входной канал на верхней крышке с заданным расходом.

Течение описывается уравнениями Навье-Стокса и неразрывности. На твердых стенках выполняются условия прилипания, на свободной поверхности – условия отсутствия касательных напряжений и равенство нормального напряжения внешнему давлению. Задача решается численно с использованием метода контрольного объема и алгоритма SIMPLE [1]. Местоположение свободной поверхности определяется с помощью метода PLIC VOF [2], обобщенного на случай пространственного течения.

В качестве результатов продемонстрированы картины течения при различных формах заполняемой ёмкости и входного канала. Показано влияние основных параметров задачи, таких как число Рейнольдса и число Фруда, на характер течения. При этом выявлены их значения, соответствующие режиму устойчивого заполнения и значения, при которых происходит потеря устойчивости струи жидкости.

Литература

- [1] Патанкар С., Численные методы решения задач теплообмена и механики жидкости. Пер. с англ. М.: Энергоатомиздат. 1984. 152 с.
- [2] Jang W., Jilesen J., Lien F.S., Ji H. A study on the extension of a VOF/PLIC based method to a curvilinear coordinate system // International Journal of Computational Fluid Dynamics. 2008. V.22, No.4. – P. 241-257.

ИЗМЕРЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Хохрякова К.А., Шмырова А.И., Шмыров А.В., Мизева И.А.

¹Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
bca@icmm.ru, lutsik@icmm.ru, shmyrov@icmm.ru, mizeva@icmm.ru

Прямые измерения поверхностного натяжения магнитной жидкости, находящейся в контакте с другой немагнитной несмешивающейся средой, по-прежнему вызывают большой интерес ученых [1, 2]. Можно выделить две основные тенденции: определение длины волны зарождающейся пиковой неустойчивости свободной и межфазной поверхностей в ортогональном магнитном поле [3] и сравнение формы капли магнитной жидкости, растянутой в продольном поле, с формой смоделированной капли [4, 5]. Первый метод ограничен использованием размагничивающего фактора тонкого слоя феррожидкости, а второй определяется формой эллипса или сферы. Плюсы и минусы обоих методов при постановке двумерных задач были получены в [6], где капиллярные эффекты играют существенную роль из-за толщины МП, расположенного в ячейке Хеле-Шоу.

В работе представлены результаты экспериментального исследования зависимости поверхностного натяжения МЖ от величины напряженности и ориентации постоянного магнитного поля методом капиллярных волн [7, 8]. Особенность метода капиллярных волн (МКВ) заключается в наложении периодических малоамплитудных возмущений немагнитной природы (акустической волны) и бесконтактной регистрации профиля субмиллиметровых цилиндрических капиллярных волн с помощью цифровой интерферометрии [8]. Данный метод позволяет избежать неустойчивости поверхности при докритических величинах ортогонального подмагничивающего поля и корректно учесть размагничивающий фактор при расчете магнитного давления (неустойчивость Розенцвейга). В случае использования метода капиллярных волн амплитуда качания плоскости межфазной границы не превосходит по величине 0.1 градуса, что меньше амплитуды качания под действием фоновых вибрационных колебаний. Таким образом, характеристики возбуждаемой волны оказываются нечувствительны к прямому воздействию магнитного поля, что позволяет измерить свойства межфазной поверхности, взаимная ориентация вектора нормали к которой и вектора напряженности магнитного поля в процессе измерения не нарушается.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 20-01-00648 А.

Литература

- [1] Latikka M., Backholm M., Timonen J., Ras R. Wetting of ferrofluids: Phenomena and control // Current Opinion in Colloid & Interface Science. – 2018. – Vol. 36. – P. 118–129.
- [2] Khokhryakova (Bushueva) C., Kostarev K., Shmyrova A. Deformation of ferrofluid floating drop under the action of magnetic field as method of interface tension measurement // Experimental Thermal and Fluid Science. – 2019. – Vol. 101. – P. 186–192.
- [3] Amin M.S., Elborai S., Lee S.-H., He X., Zahn M. J. Surface Tension Measurement Techniques of Magnetic Fluids at an Interface Between Different Fluids Using Perpendicular Field Instability // Ap. Phys. – 2005. – Vol. 97. – P. 1–3.
- [4] Sudo S., Hashimoto H., Ikeda A. Measurement of the Surface Tension of a Magnetic Fluid and Interfacial Phenomena // JSME International J. – 1989. – Vol. 32. – P. 47–51.
- [5] Afkhami S., Tyler A.J., Renardy Y., Renardy M., Pierre T.G.St., Woodward R.C., Riffle J.S. Deformation of a hydrophobic ferrofluid droplet suspended in a viscous medium under uniform magnetic fields // J. Fluid Mech. – 2010. – Vol. 663. – P. 358–384.
- [6] Flament C., Lacis S., Bacri J. -C., Cebers A., Neveu S., Perzynski R. Measurements of ferrofluid surface tension in confined geometry // Phys. Rev. E. – 1996. – Vol. 53. – P. 4801.
- [7] Шмырова А.И., Мизёва И.А., Артамонова П.А. Модификация метода капиллярных волн // Вестник Пермского Университета. Физика. – 2018. – № 3. – Т. 41. – С. 32–38.
- [8] Shmyrov A., Mizev A., Shmyrova A., Mizeva I. Capillary wave method: an alternative approach to wave excitation and to wave profile reconstruction // Physics of Fluids. – 2019. – Vol. 1, No. 31. – P. 012101(8).

ЭКСПЕРИМЕНТ ПО ВВЕДЕНИЕ НАНО ЧАСТИЦ SiC И BN В ЖИДКИЙ АЛЮМИНИЙ С ПОМОЩЬЮ МГД ПЕРЕМЕШИВАНИЯ С ПОСЛЕДУЮЩЕЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИЕЙ РАСПЛАВА

С.Ю. Хрипченко¹, В.М. Долгих¹, Д.М. Кисельков²

¹Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

²Институт технической химии УрО РАН, Пермь
khripch@icmm.ru, dolgikh@icmm.ru, dkiselkov@yandex.ru

В работе описывается методика и результаты экспериментов по вводу наночастиц (100-200нм) SiC и BN в расплав алюминия АК0 находящегося в цилиндрическом тигле с водоохлаждаемым дном и обогреваемыми стенками. Тигель был помещен в МГД - перемешиватель, который, создавая бегущее и вращающееся магнитные поля, осуществлял двунаправленное перемешивание жидкого металла в тигле. После введения в расплав таблеток с армирующими частицами, металл перемешивался, и после растворения таблеток направленно кристаллизовался. Таблетки диаметром 20мм и толщиной 15мм изготавливались из смеси порошка алюминия (100-156мкм) и армирующих nano частиц путем прессования в специальной форме. Концентрация армирующих частиц в таблетках подбиралась с помощью предварительных экспериментов и составляла 5% от их общей массы. В одних экспериментах в расплав вводилось 0,59%, 1,04%, 1,77% наночастиц SiC, а в других экспериментах вводилось 0,7%, 1%, 1,8% nano частиц гексагонального BN от массы слитков.

Как показали эксперименты, введение армирующих частиц в жидкий алюминий в составе таблеток при помощи МГД - перемешивания расплава может быть реализовано. Экспериментально была получена зависимость предельной прочности и удельного электросопротивления металла от концентрации введенных в него армирующих наночастиц. С возрастанием концентрации введенных наночастиц в расплав растет предельная прочность и удельное электросопротивление закристаллизовавшегося металла. Зависимости предельной прочности и электросопротивления алюминия от концентрации наночастиц SiC и BN, очень похожи и близки к линейным (в исследованном интервале концентраций вводимых частиц). Механическая прочность получаемого материала с увеличением концентрации вводимых nano частиц растет быстрее, чем увеличение удельного электросопротивления. В экспериментах предельная прочность образцов возрастала на 22%, в то время как электросопротивление увеличивалось на 5-6%. Это дает предпосылки использования такого материала для изготовления самонесущих проводов в линиях электропередач.

Работа была поддержана грантом РФФИ №19-48-590001 p_a

ПРОГНОЗ НАКЛОНА ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПО ДАННЫМ НЕРАВНОМЕРНОГО ОСАЖИВАНИЯ ЗДАНИЙ

Цветков Р.В.¹, Глот И.О.¹, Гусев Г.Н.¹, Епин В.В.¹, Шардаков И.Н.¹, Шестаков А.П.¹

¹Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

flower@icmm.ru

Контроль за деформационными процессами в горных породах, спровоцированными, например, добычей полезных ископаемых, имеет важное значение, так как позволяет оперативно оценивать и прогнозировать его влияние на окружающую инфраструктуру. Развитие данных процессов может вызвать искажение земной поверхности вместе с расположенными на ней конструкциями, а также стать причиной появления провалов. Исследование деформаций горного массива достаточно сложно как в экспериментальном плане, так и в плане его математического моделирования вследствие недостатка данных из внутренних областей массива. Одним из способов деформационного мониторинга горного массива является контроль за оседаниями земной поверхности, который можно осуществлять разными способами.

В работе использован подход, в котором наклон поверхности в месте расположения здания оценивается по результатам его неравномерного осаживания [1]. Данный наклон можно характеризовать двумя параметрами: величиной и его направлением. Таким образом, в условиях городской застройки при мониторинге группы зданий можно оценивать не только деформационное состояние одной конструкции, но и изменение наклона части поверхности массива, на котором они расположены. Накопленная в результате многолетних наблюдений информация об эволюции данных процессов с хорошим временным разрешением служит основой как для оценки текущей ситуации, так и для прогнозирования. Это обстоятельство является важным преимуществом данного подхода, поскольку данные измерений, получаемые другими методами, требуют больших временных затрат.

На основании данных систем мониторинга, полученными за 6 лет наблюдений, были произведены оценки изменения наклонов группы зданий на поверхности массива, которые и были использованы для составления прогнозов. Прогнозирование осуществлялось путем анализа временных рядов с применением моделей авторегрессии со скользящей средней [2], экспоненциального сглаживания и их модификаций [3]. С их помощью выполнены прогнозные оценки изменения величины наклона и его направления для фрагментов поверхности массива на различные интервалы времени.

Литература

- [1] Shardakov I., Barayakh A., Yepin V., Tsvetkov R., Glot I. Control of surface subsidence based on building deformation monitoring data // MATEC Web of Conferences – 2019.– V. 265(7). – 05026.
- [2] Box G.E.P., Jenkins G.M., Reinsel G.C., Ljung G.M. Time series analysis: Forecasting and control – New Jersey, 2015. – 712 p.
- [3] Hyndman R.J., Athanasopoulos G. Forecasting: principles and practice – Melbourne, 2018. – 380 p.

ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА КЕРАМИЧЕСКИХ РЕСТАВРАЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ CAD/CAM ТЕХНОЛОГИИ

Чебоксарцева М.А.¹, Зайцев Д.В.^{1,2}, Мандра Ю.В.³, Ивашов А.С.³, Жолудев С.Е.³, Григорьев С.С.³

¹ *Уральский Федеральный Университет, Екатеринбург*

² *Институт высокотемпературной электрохимии УрО РАН, Екатеринбург*

³ *Уральский Государственный Медицинский Университет, Екатеринбург*
heboksaceva2001@icloud.com, dmitry.zaytsev@urfu.ru

CAD/CAM - это трехмерная компьютерная технология, которая применяется для проектирования и изготовления высокоточных изделий в промышленности. Такая технология также позволяет создать трехмерную модель зубного ряда и быстро изготовить элемент любой формы реставрируемого зуба из керамического блока с высокой точностью на фрезерной машине. На сегодняшний день появляются новые материалы, механические свойства которых необходимо аттестовать, как при сжатии, так и при растяжении. Прямое растяжение керамических материалов достаточно сложная процедура. Поэтому для аттестации механических свойств таких хрупких материалов, как керамика, применяется метод непрямого растяжения – диаметрального сжатия. В качестве материалов для исследования были выбраны блоки из керамических материалов для реставрационной стоматологии по технологии CAD/CAM: гибридная керамика VITA ENAMIC (VITA) и литий силикатная стеклокерамика IPS e.max CAD (Ivoclar). Целью данной работы является сравнение прочностных свойств VITA ENAMIC и IPS e.max CAD при одноосном сжатии и непрямом растяжении. Блоки сверлили полым алмазным сверлом в водной среде. В результате получили по 20 заготовок цилиндрической формы (диаметр 4мм) из каждого материала. Заготовки были использованы для приготовления образцов для одноосного и диаметрального сжатия. Торцы заготовок полировали на абразивных материалах, с уменьшением размера зерна при каждом следующем шаге полировки, для достижения плоско параллельности торцов и нужной высоты образца. Высота образцов для одноосного сжатия была 5мм, а для диаметрального сжатия 2мм. Всего было изготовлено по 10 образцов цилиндрической формы для каждой схемы нагружения из каждого материала (всего 40 штук). Образцы, изготовленные из IPS e.max CAD перед механическим испытанием подвергали термообработке согласно протоколу изготовителя ($T=840-850^{\circ}\text{C}$ в течение 25-35 минут). Механические свойства при одноосном и диаметральном сжатии определяли на испытательной машине Shimadzu AG-X 50kN. При одноосном сжатии, образец нагружали вдоль оси цилиндра, а при диаметральном сжатии, перпендикулярно ей. Аттестация поверхностей образцов до и после испытания проводили при помощи фотоаппарата в режиме макросъемки Canon D90 с Canon EF-S 60 mm f/2.8 Macro USM и Canon Macrolite MT-24 EX. В работе показано, что характер деформационного поведения и разрушения VITA ENAMIC и IPS e.max CAD при одноосном сжатии и непрямом растяжении схожи и подобны поведению хрупких материалов. Предел прочности IPS e.max CAD в два с лишним раза выше, чем у VITA ENAMIC, как при сжатии, так и при растяжении. Однако, IPS e.max CAD оказался чувствителен к дефектам на краях образца при одноосном сжатии. В образцах IPS e.max CAD начинали появляться трещины от краёв образца при напряжениях более 100 МПа. Следовательно, при использовании IPS e.max CAD его поверхности необходимо обрабатывать алмазными инструментами с минимальным размером зерна, а при выборе IPS e.max CAD для реставрации, необходимо принимать во внимание рацион питания пациента.

Работа выполнена при поддержке РФФИ № 20-48-660017 p_a.

МОДЕЛИРОВАНИЕ АДАПТАЦИИ ГУБЧАТОЙ КОСТНОЙ ТКАНИ

Чикова Т.Н., Тверье В.М.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь

ChikovaTN@gmail.com, tverier_55@perm.ru

Представленная работа посвящена моделированию адаптации губчатой (трабекулярной) костной ткани к новой нагрузке. Актуальность темы обоснована существующими сложностями инструментальной диагностики структуры костной ткани. Известно, что значительное продолжительное изменение в нагрузке на скелет вызывает адаптационные процессы в структуре костной ткани направленные на локальное упрочнение кости к данной нагрузке [1]. Описанным процессом перестройки костной ткани можно управлять. Одним из ярких примеров такого управления, является установка брекет-системы пациенту (рис. 1).

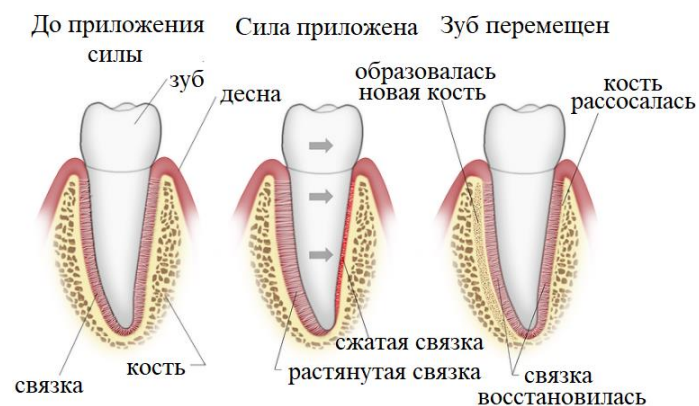


Рис. 1. Движение зуба под воздействием ортодонтической аппаратуры [2]

За счет наличия губчатой костной ткани в нижней и верхней челюсти, можно задавая усилия посредством брекет-системы, перемещать (вращать) неправильно расположенные (ориентированные) зубы. Современные методы исследования костной ткани, позволяющие наблюдать положение отдельных трабекул внутри костного матрикса, связаны со значительной лучевой нагрузкой. Поэтому создание математических моделей, демонстрирующих связь между нагружением и перемещением, является востребованной задачей цифровой персонализированной медицины. Модель, предлагаемая в данной работе, является с одной стороны простой, так как кинетика перестройки представлена двумя скалярными кинетическими уравнениями, содержащими одну неизвестную величину. С другой стороны, модель является наглядной, демонстрируя в векторной форме преимущественную ориентацию трабекул в рассматриваемом объеме костной ткани [3]. Верификация предложенной модели происходит путем сравнения с существующими численными решениями и результатами исследования *in vitro*.

Благодарности: публикация подготовлена при финансовой Правительства Пермского края.

Литература

- [1] Cowin S.C. Wolff's law of trabecular architecture at remodeling equilibrium // J. Biomech. Engineering. – 1986. – V. 108. – P. 83–88.
- [2] Блог клиники DIAMED. – URL: <https://diamed.tomsk.ru/stati/kak-breket-sistema-dvigaet-zuby/>
- [3] Тверье В.М. Кинетические уравнения перестройки трабекулярной костной ткани в пространстве Ильюшина // Российский журнал биомеханики. – 2019. – Т. 23. № 2. – С.293–301.

УГЛЕРОДНОЕ ПОКРЫТИЕ НА ПОВЕРХНОСТИ ГЕМАКОНТЕЙНЕРОВ ИЗ ПОЛИВИНИЛХЛОРИДА

Чудинов В.С.¹, Шардаков И.Н.¹

¹ИМСС УрО РАН, Пермь

chudinovsl@mail.ru, shardakov@icmm.ru

По данным ВОЗ ежегодно в мире собирается около 118,5 миллиона донаций крови. Кровь и ее компоненты широко применяются для гемотрансфузии в медицине, а также в биотехнологических процессах фарминдустрии. Переливание крови всегда связано с большим риском заражения гемотрансмиссивными инфекциями. Альтернативой гемотрансфузии донорской крови является аутогемотрансфузия, переливание собственной заготовленной заранее крови, что бесспорно более безопасно. В биотехнологических процессах форменные элементы крови, например, лейкоциты, применяются в производстве лейкоцитарных интерферонов, предназначенных для лечения вирусных, онкологических и аутоиммунных заболеваний. Чаще получают более безопасные рекомбинантные интерфероны из генетически модифицированных клеток E.Coli. Однако применение лейкоцитарного интерферона все еще актуально в ряде тяжелых и специфических случаев протекания болезни, т.к. его активность выше рекомбинантного, возможно, из-за наличия других биологически активных веществ. Помимо этого, перспективным направлением является разработка противовирусных и антибактериальных пептидных лекарственных препаратов, получаемых в том числе из лейкоцитов [1,2]. Для разработки пептидных препаратов, производства лейкоцитарных интерферонов и гемотрансфузии крови необходимо сохранять длительное время ее компоненты и, в частности, форменные элементы. Фактором разрушения клеток крови вне организма может являться материал стенки полимерного гемаконтейнера [3]. В работах [4] было показано, что полученная ионно-плазменным методом углеродная поверхность на полиуретане способствует улучшенной пролиферации клеточной культуры человека по сравнению с поверхностью необработанного полимера. В данной работе было изучено влияние углеродного покрытия, созданного на поверхности гемаконтейнера из поливинилхлорида, на адсорбцию белков, пролиферацию клеточных культур и на лейкоциты цельной крови. Полученные результаты демонстрируют более эффективную сохранность лейкоцитов в гемаконтейнере, обработанном ионно-плазменным методом, в сравнении с необработанным. Но на углеродном покрытии происходит коагуляция клеток крови, возможно, из-за селективной адсорбции белков факторов свертывания крови на обработанной плазмой поверхности гемаконтейнера. Это возможно устранить за счет подбора режимов ионно-плазменной обработки или с помощью предварительного нанесения белков, препятствующих коагуляции клеток на стенках гемаконтейнера. Планируются дальнейшие исследования в этом направлении.

Литература

- [1] Гришина Т.А., Волков А.Г., Волкова Л.В. Цитотоксичность и токсикологическая характеристика нового лейкоцитарного полипептида – Вопросы биологической, медицинской и фармацевтической химии. 2020. Т. 23. № 5. С. 54-58.
- [2] О. В. Шамова, Д. С. Орлов, М. С. Жаркова и др. Мини-бактенецины ChBac7.5N α и ChBac7.5N β – антимикробные пептиды из лейкоцитов козы Capra hircus – Acta Naturae, 2016. Т. 8. № 3 (30). С. 147-157.
- [3] Волкова Л.В., Гришина Т.А. Влияние гемопластика различных производителей на продуктивную способность клеток млекопитающих – Биофармацевтический журнал. 2019. Т. 11. № 2. С. 11-15.
- [4] V.S. Chudinov, I.V. Kondyurina, I.N. Shardakov, etc. Polyurethane Modified by Plasma Ion Implantation for Medical Application – Biophysics. 2018. V. 63. No. 3. P. 330–339.

СВОБОДНАЯ БАЗА ПУБЛИКАЦИЙ SCHOLIA ПРИМЕНИТЕЛЬНО К МЕХАНИКЕ СПЛОШНЫХ СРЕД

Чупин А.В.¹²

¹Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

²Пермский государственный университет, Пермь

chupin@icmm.ru

Существует несколько уже признанных источников библиографической информации – WebOfScience, Scopus, eLibrary, CrossRef. Большинство из них являются коммерческими, закрытыми системами и распространяются по дорогой подписке. В то же время в последнее время приобретает значимость такое понятие как «открытая наука». Аналогом к нему является open-source в мире программного обеспечения. Всё больше становится open-access журналов, которые придерживаются данной идеологии. Кроме этого, были обнаружены существенные проблемы в качестве этих баз данных (отсутствующие и неверные ссылки в Web of Science, дубликаты публикаций в Scopus, «сырой» характер данных в CrossRef)[1], которые нельзя решить «извне», общими усилиями.

Одним из набирающих силу претендентов на замену является свободная всеобщая международная всеязычная база знаний Викиданных[3]. Кроме всего прочего, несколько лет назад начался массовый импорт библиографических ссылок на академические публикации, коих в данный момент содержится более 30 миллионов, что покрывает 40% ссылок в CrossRef. Извлечение и визуализация данных из Викиданных может быть произведена различными инструментами, в докладе будет рассмотрена Scholia[2], непосредственно работающая с библиографической и наукометрической информацией.

Scholia позволяет в автоматическом режиме строить выборки по теме, журналу, месту работы авторов, а также с помощью связанных инструментов исправлять ошибки в базе и пополнять её. Открытый характер базы позволяет создавать свои инструменты извлечения и визуализации данных, из которых можно выделить сервис запросов, с помощью которого можно анализировать любую совокупность публикаций практически неограниченным числом способов[4]. В качестве примеров применения можно отметить: отслеживание списка публикаций организации или конкретной группы людей, построение карт места рождения исследователей в конкретной теме и т.п. В презентации будут показаны инструменты и результаты для некоторых примеров, касающихся различных аспектов механики сплошных сред и её исследователей.

Литература

- [1] N. J. van Eck, L. Waltman, “Accuracy of citation data in Web of Science and Scopus,” *arXiv e-prints*, p. arXiv:1906, 2019.
- Catalano, G., Daraio, C., Leta, J., Moed, H. F., Ruocco, G., Zhang, X. (2020). Novel Approaches to the Development and Application of Informetric and Scientometric Tools. *Journal of Data and Information Science* 5, 4, 1-4, <https://doi.org/10.2478/jdis-2020-0041> [Accessed 20 February 2021]
- [3] F. A. Nielsen, “Scholia, Scientometrics and Wikidata,” *The Semantic Web: ESWC 2017 Satellite Events*, Cham, 2017, pp. 237–259.
- [4] Lane Rasberry, Egon L. Willighagen, Finn Arup Nielsen, Daniel Mietchen, “Robustifying Scholia: paving the way for knowledge discovery and research assessment through Wikidata,” *Research Ideas and Outcomes*, V. 5, P. e35820, 2019.

ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ МИКРОСТРУКТУРЫ В ПОЛИКРИСТАЛЛАХ

Шавшуков В.Е., Ташкинов А.А.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
shavshukov@pstu.ru, tashkinov@pstu.ru

Поликристаллические материалы являются агрегатами анизотропных зерен-кристаллитов стохастической структуры. Поля мезонапряжений/мезодеформаций случайны и существенно неоднородны. Флуктуации полей обусловлены не только случайными формой и размерами зерен, но и их взаимодействием [1]. В специфических локальных микроструктурных образованиях флуктуации могут достигать больших значений.

Экспериментально было обнаружено, что в поликристаллических материалах первые очаги разрушений возникают в определенных кластерах из нескольких зерен [2]. В зернах этих экстремальных кластеров локальные (мезо-) деформации и напряжения достаточно высоки, чтобы вызвать первые повреждения или пластические сдвиги. В стохастической микроструктуре поликристалла образование экстремальных кластеров происходит случайно и редко. Тем не менее, они определяют инициирование повреждений в материале и могут критически повлиять на надежность поликристаллических деталей машин. Поиск и исследование экстремальных кластеров экспериментально на образцах поликристаллических материалов требует больших затрат времени и ресурсов. Эффективным является вычислительный подход. Здесь мы представляем мощный вычислительный метод для поиска экстремальных кластеров, для исследования их возможных паттернов и для оценки абсолютных максимумов локальных деформаций/напряжений, которые могут быть достигнуты в этих кластерах, основанный на теоретико-полевым подходе к механике деформирования поликристаллов [3]. Экспериментально наблюдаемые кластеры состоят из нескольких (3-4) предпочтительно ориентированных соседних зерен. Естественно ожидать, что в больших кластерах могут генерироваться большие всплески локальных полей. Мы нашли типичные формы экстремальных кластеров (малых и больших) в четырех различных поликристаллах с зернами слабой и сильной анизотропией при одноосном растяжении. Во всех рассмотренных случаях экстремальные кластеры имеют вид симметричных паттернов. В больших кластерах сильно анизотропных зерен максимум мезодеформации в несколько раз превышает макродеформацию. В кластерах слабо анизотропных зерен концентрация локальной деформации умеренная (десятки процентов).

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации на выполнение фундаментальных научных исследований (проект № FSNM-2020-0027).

Литература

- [1] Abdolvand H., Wright J. and Wilkinson A. J. Strong grain neighbour effects in polycrystals. *Nature Commun.* 2018. **9**, 171 pp 1–11.
- [2] Miao J., Pollock T.M., Jones J. Microstructural extremes and the transition from fatigue crack initiation to small crack growth in a polycrystalline nickel-base superalloy. *Acta Mater.* 2012. **60** 2840–2854
- [3] Shavshukov V.E. Extreme Strain Fluctuations in Polycrystalline Materials. *Physical Mesomechanics*, 2020, Vol. 23, No. 1, pp. 13-20.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МОРФОЛОГИИ СТРУКТУРЫ НА ДЕФОРМИРОВАНИЕ НАНОПОРИСТЫХ МЕТАЛЛОВ

Шалимов А.С.¹, Ташкинов М.А.¹

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
Shalimov96@pstu.ru, M.Tashkinov@pstu.ru

Многие современные материалы, используемые в высокотехнологичных приложениях, обладают пористой ячеистой структурой, и характеризуются наличием пустот на различных масштабных уровнях. Нанопористые металлы известны как разновидность трехмерного пористого твердого тела с наномасштабным характерным размером структурных элементов. Они имеют взаимопроникающую сеть наноразмерных пор и твердых лигаментов (связок) [1]. Твердая фракция пористого тела составляет около 30% [2]. В недавних исследованиях изучалось использование таких металлов в качестве функционального материала для катализа, актуаторов и зондирования [3,4].

Размер лигаментов оказывает значительное влияние на механические свойства материала. Отдельные лигаменты имеют пластические свойства, при этом деформация не перераспределяется на близлежащие лигаменты, что в результате приводит к хрупкому поведению материала. Как при сжатии, так и при растяжении, образцы с меньшими диаметрами лигаментов имеют более высокий предел текучести. При сжатии нанопористое золото является чрезвычайно пластичным и подвергается значительному упрочнению в процессе деформации за счет уплотнения пор. При растяжении материал становится хрупким и разрушается с одной доминантной трещиной. Исследование характера деформирования нанопористых металлов, а также величины и расположения сопутствующих концентраций напряжений, остаются актуальными задачами.

В работе созданы геометрические модели пористых представительных объемов открытого типа со взаимопроникающей структурой, имитирующие структуру нанопористого золота. Расчет полей напряжений и деформаций в представительном объеме при реализации нагружения трехмерного представительного объема такого материала осуществлен на основе построения континуальной модели с учетом параметров, определенных на меньших масштабных уровнях. Для выполнения численных расчетов использован метод конечных элементов. Исследовано влияние морфологического строения и параметров микроструктуры на перераспределение напряжений и возникновение зон концентраций напряжений в металле при упругом и упругопластическом поведении.

Исследование выполнено в Пермском национальном исследовательском политехническом университете при поддержке Российского научного фонда (проект № 20-79-00216).

Литература

- [1] Jiao J., Huber N. Deformation mechanisms in nanoporous metals: Effect of ligament shape and disorder // *Comput. Mater. Sci.*, – 2017. – Vol. 127. – P. 194–203.
- [2] Weissmüller J. et al. Nanoporous Metals by Alloy Corrosion: Formation and Mechanical Properties // *MRS Bull.*, – 2009. – Vol. 34, № 8. – P. 577–586.
- [3] Ding Y., Chen M. Nanoporous Metals for Catalytic and Optical Applications // *MRS Bull.*, – 2009. – Vol. 34, № 8. – P. 569–576.
- [4] Stenner C. et al. Piezoelectric Gold: Strong Charge-Load Response in a Metal-Based Hybrid Nanomaterial // *Adv. Funct. Mater.*, – 2016. – Vol. 26, № 28. – P. 5174–5181.

МНОГОУРОВНЕВАЯ КОНСТИТУТИВНАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОПИСАНИЯ СВЕРХПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

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

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
elvira16_90@mail.ru

Для исследования свойств металлов и сплавов в состоянии сверхпластичности наиболее распространенными являются опыты на одноосное растяжение. Кривые одноосного растяжения для испытаний на структурную сверхпластичность (СП) в условиях реализации данного режима демонстрируют стадийность, которая связана с действием и взаимодействием различных механизмов, а также сменой их ролей при деформировании. Из анализа результатов многочисленных исследований установлено, что при характерных для СП температурно-скоростных диапазонах зернограничное скольжение (ЗГС) является лидирующим, при этом важную роль играет внутризеренное дислокационное скольжение (ВДС), зернограничная диффузия и взаимовлияние механизмов. Весьма существенны процессы динамической рекристаллизации и ротаций решеток кристаллитов.

Предлагается модифицированная многоуровневая статистическая модель, ориентированная на описание сверхпластического деформирования с учетом действия всех перечисленных механизмов [1, 2]. Для межзеренных границ вводятся внутренние переменные, характеризующие их свойства, и формулируются соответствующие эволюционные уравнения. В эволюционных уравнениях для ЗГС учитывается понижение критических напряжений за счет повышения энергии границ в результате притока внутризеренных дислокаций и за счет процессов, связанных с зернограничной диффузией (диффузионная «подстройка» границ). В модели учитывается, что при реализации ЗГС часть дислокаций ориентационного несоответствия в границах диссоциирует в зернограничные дислокации, что приводит, в зависимости от соотношения скоростей ВДС и ЗГС, к ослаблению упрочнения или к разупрочнению для ВДС. Кроме того, активизация ЗГС по границам зерна дает возможность его дополнительного поворота за счет действия сдвиговых напряжений по границам. Разработанная модель содержит описание размеров, формы, взаиморасположения кристаллитов и границ, а также их изменения в процессе деформирования с учетом динамической рекристаллизации.

Полученные результаты численных экспериментов по сверхпластическому деформированию алюминиевого сплава удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными.

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

Литература

- [1] Трусов П.В., Шарифуллина Э.Р., Швейкин А.И. Многоуровневая модель для описания пластического и сверхпластического деформирования поликристаллических материалов // Физическая мезомеханика. – 2019. – Т.22, №2. – С.5-23.
- [2] Shveykin A.I., Trusov P.V., Sharifullina E.R. Statistical crystal plasticity model advanced for grain boundary sliding description// Crystals. – 2020. – Vol.10, Is.9. – 18 p. DOI: 10.3390/cryst10090822

ЧИСЛЕННАЯ ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ МНОГОУРОВНЕВЫХ КОНСТИТУТИВНЫХ МОДЕЛЕЙ

Швейкин А.И., Трусов П.В., Романов К.А.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь

shveykin@pstu.ru

Для исследования и совершенствования методов обработки металлов и изделий давлением целесообразно применять многоуровневые конститутивные модели материалов, позволяющие явным образом описывать механизмы неупругого деформирования, а также перестройку структуры материала и изменение определяемых ее состоянием физико-механических свойств [1]. Экспериментально наблюдаемое свойство памяти неупруго деформируемого материала в многоуровневых моделях учитывается за счет введения внутренних переменных; это позволяет использовать в качестве оператора в конститутивных моделях систему относительно простых математических соотношений – дифференциальных или тензорно-алгебраических уравнений, однако с существенно нелинейной правой частью (в некоторых случаях – с ее алгоритмическим определением).

Поскольку стохастический характер имеют как характеристики свойств материала на всех структурно-масштабных уровнях, так и воздействия, продуцируемые стохастическими граничными условиями, актуально исследование получаемых с использованием конститутивных моделей материалов решений (истории изменения откликов) по отношению к возмущениям входных данных (истории воздействий и начальных условий) и оператора. Особо следует отметить важность решения этой задачи для обоснованного применения новых конститутивных моделей для описания современных технологических процессов термомеханической обработки, в частности, для создания функциональных материалов.

В [2] исследовалась чувствительность модели к возмущениям параметров оператора в отсчетной конфигурации, принятые значения констант материала, входящие в оператор, полагались в дальнейшем фиксированными для каждого анализируемого процесса. Для более полного анализа устойчивости модели введено определение устойчивости решения, в отличие от традиционного учитывающее возмущения истории изменения воздействий и возмущения оператора, осуществляемые в разные моменты в течение всего рассматриваемого времени процесса. Обозначены трудности применения методов Ляпунова к рассматриваемой проблеме. Предложена программа численной реализации предлагаемого подхода, включающая рассмотрение разнообразных возмущений начальных условий, истории воздействий, оператора, и определение интегральной нормы отклонения получаемых решений от базовых. Результаты применения подхода для исследования конститутивных моделей поликристаллических ГЦК- и ГПУ-металлов свидетельствуют об их устойчивости.

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

Литература

- [1] Трусов П.В., Швейкин А.И. Многоуровневые модели моно- и поликристаллических материалов: теория, алгоритмы, примеры применения. – Новосибирск: Изд-во СО РАН. – 2019. – 605 с. DOI: 10.15372/MULTILEVEL2019TPV
- [2] Швейкин А.И., Шарифуллина Э.Р., Трусов П.В., Пушкин Д.А. Об оценке чувствительности статистических многоуровневых моделей поликристаллических металлов к возмущениям параметров // Вычислительная механика сплошных сред. – 2018. – Т. 11, № 2. – С. 214-231. DOI: 10.7242/1999-6691/2018.11.2.17

МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНВЕКТИВНЫХ ПОТОКОВ ПРИ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ НАПРАВЛЕННОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ

Швыдкий Е.Л.¹, Смольянов И.А.¹, Бааке Э.²

¹Уральский федеральный университет, Екатеринбург

²Ганноверский университет, Германия

e.l.shvydsky@urfu.ru

Направленная горизонтальная кристаллизация осуществляется путем охлаждения металлического расплава с одной из боковой стенок емкости. С этой поверхности начинается процесс затвердевания чистого металла. Более того, такие температурные условия соответствуют случаю вертикальной конвекции [1-3], то есть когда к объему жидкости приложен горизонтальный температурный градиент. Вызванные таким температурным градиентом конвективные течения влияют на распределение температуры и, следовательно, на форму и эволюцию границы раздела жидкой и твердой фаз.

Другой рассматриваемый вопрос это возникновение концентрационной конвекции. В случае кристаллизации двухкомпонентного сплава фаза с более низкой температурой плавления затвердевает быстрее и возле ее поверхности образуется слой насыщенный второй фазой. В таком случае уже градиент концентрации будет источником конвективных течений.

Чтобы более подробно понять процессы влияния конвективных потоков на процесс затвердевания необходимы достоверные численные модели. В докладе представлены созданные и валидированные модели вертикальной конвекции жидкости с низким значением числа Прандтля [4], фазового перехода чистого галлия [5] и кристаллизации двухкомпонентного SnPb сплава [6, 7]. Все численные модели созданы на основе метода коночных объемов на платформе OpenFOAM.

Литература

- [1] Ng, C. S., Ooi, A., Lohse, D. & Chung, D. Vertical natural convection: application of the unifying theory of thermal convection. (2015) *J. Fluid Mech.* 764, 349–361
- [2] Shishkina, O. Momentum and heat transport scalings in laminar vertical convection. (2016) *Phys. Rev. E* 93, 051102.
- [3] Zwirner, L., Khalilov, R., Kolesnichenko, et al. The influence of the cell inclination on the heat transport and large-scale circulation in liquid metal convection. (2020) *J. Fluid Mech.* 884, A18.
- [4] V. Botton, R. Boussaa, R. Debacque et al. A 2D1/2 model for low Prandtl number convection in an enclosure. (2013) *International Journal of Thermal Sciences* 71 53-60
- [5] C. Gau and R. Viskanta Melting and Solidification of a Pure Metal on a Vertical Wall. *J. Heat Transfer.* 1986, 108(1): 174-181
- [6] M. Bellet, H. Combeau, Y. Fautrelle et al. Call for contributions to a numerical benchmark problem for 2D columnar solidification of binary alloys. (2009) *International Journal of Thermal Sciences* 48, pp. 2013-2016
- [7] H. Combeau, M. Bellet, Y. Fautrelle et al. Analysis of a numerical benchmark for columnar solidification of binary alloys. (2012) *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 33, 012086

ДИНАМИКА ОБЪЕМА МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ В НЕОДНОРОДНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Шельдешова Е.В., Полунин В.М., Чураев А.А., Ряполов П.А.

Юго-Западный государственный университет, Курск
blackberry__@mail.ru

Исследовано магнитное поле осесимметричной магнитной системы с применением униполярных кольцевых магнитов (МСО), а также зависимость частоты колебания системы от длины МЖ-цилиндра. На основе полученных данных предложен оригинальный способ определения намагниченности МЖ.

Был проведен динамический эксперимент с измерением частоты колебаний системы «столбик МЖ, подвешенный в сильном и неоднородном магнитном поле».

Исследования проводились на образцах магнитной жидкости, представляющих собой коллоидный раствор однодоменных частиц магнетита Fe_3O_4 в углеводородной (керосин, минеральное масло), среде, стабилизированные олеиновой кислотой. Исходный образец магнитной жидкости МЖ-1 был синтезирован в Проблемной научно-исследовательской лаборатории прикладной феррогидродинамики Ивановского государственного энергетического университета. Образцы МЖ-2 и МЖ-3 были получены путем разбавления исходного образца МЖ-1 до концентрации твердой фазы 6% и 4% соответственно.

В качестве источника магнитного поля используется осесимметричная магнитная система МСО на базе сборки с редкоземельными магнитами NdFeB (неодим-железо-бор).

С помощью обработки в программе LabView был получен массив данных частоты колебаний столбика МЖ в зависимости от его размера для всех трех образцов.

На основании данных была определена величина намагниченности МЖ, с использованием формулы, предложенной в работе [1]:

$$M_x = \frac{\pi^3 v^2 \rho b d^2 + b d \sqrt{\pi^7 v^3 \eta \rho}}{\mu_0 \frac{\pi d^2}{2} \left(\frac{\partial H_x}{\partial z} \right)_{z=b/2}}$$

Полученные по разработанной методике результаты сопоставимы со значениями намагниченности, получаемой баллистическим методом.

Разработанная и представленная в данной работе методика, используемая для изучения степени постоянства упругомагнитных параметров во времени, предполагает создание нового абсолютного метода определения намагниченности насыщения и может быть полезной для изучения магнитофореза и процессов агрегирования магнитных наночастиц.

Публикация подготовлена в рамках выполнения государственного задания (номер 0851-2020-0035).

Литература

[1] Polunin V. M., Ryapolov P. A., Platonov V. V., Kuzko A. E. Free vibrations of a magnetic liquid in a strong magnetic field // Acoustic journal. 2016. Vol. 62. No. 3. P. 302-307.

ОСОБЕННОСТИ КАСКАДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ТУРБУЛЕНТНОСТИ НА ФОНЕ СТРАТИФИЦИРОВАННОЙ ПО ПЛОТНОСТИ ЖИДКОСТИ

Шестаков А.В.¹, Степанов Р.А.¹, Фрик П.Г.¹

¹Институт механики сплошных сред УрО РАН
shestakov@icmm.ru, rodion@icmm.ru, frick@icmm.ru

В работе численно исследованы каскадные процессы переноса энергии пульсаций скорости и температуры в трехмерной вынужденной неизотермической турбулентности, развивающейся и существующей на фоне устойчиво стратифицированной по плотности жидкости. Основное внимание уделено условиям, при которых силы Архимеда могут оказывать существенное влияние на динамику каскадных процессов в инерционном интервале масштабов. Данная задача интересна тем, что в рамках такой постановки возможен специфический режим эволюции неизотермической турбулентности, известный как режим Обухова-Болджиано, впервые описанный в работах [1,2]. При реализации данного режима, для спектральной плотности энергии пульсаций скорости и температуры выполняются законы:

$$\begin{aligned} E(k) &= C_1 \varepsilon_T^{2/5} (g\beta)^{4/5} k^{-11/5}, \\ \Theta(k) &= C_2 \varepsilon_T^{4/5} (g\beta)^{-2/5} k^{-7/5}. \end{aligned} \quad (1)$$

Численные расчеты выполнены с использованием каскадной модели трехмерной неизотермической турбулентности, позволяющей моделировать каскадные процессы при значениях чисел Рейнольдса, недостижимых в прямом численном эксперименте. Используемая в работе каскадная модель турбулентности имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{dU_n}{dt} &= W_n(U, U) - \frac{k_n^2 U_n}{Re} + Ri \left(T_n + \alpha_n \frac{|T_n|}{|U_n|} U_n \right) + f_n \\ \frac{dT_n}{dt} &= W_n(U, T) - \frac{k_n^2 T_n}{Re Pr} + G_n U_n. \end{aligned} \quad (2)$$

В системе уравнений (2) U_n, T_n - комплексные переменные, описывающие пульсации скорости и температуры соответственно, $W_n(U_n, T_n)$ - квадратичная форма, моделирующая нелинейное слагаемое в уравнениях Навье-Стокса и уравнении теплопроводности, Ri, Re, Pr - безразмерные параметры задачи - числа Ричардсона, Рейнольдса и Прандтля соответственно. G_n - параметр, описывающий действие крупномасштабного градиента температуры. Параметр α_n определяет сдвиг фаз между пульсациями скорости и температуры. f_n - внешняя сила, возбуждающая турбулентность. Проведенные расчеты показывают, что в вынужденной турбулентности, существующей на фоне стратифицированной по плотности жидкости, силы Архимеда оказывают существенное влияние на динамику каскадных процессов в широком диапазоне масштабов. В результате, каскадные процессы развиваются таким образом, что формируются распределения спектральной плотности энергии пульсаций скорости и температуры, соответствующие режиму Обухова-Болджиано (1).

Литература

- [1] Обухов А.М. О влиянии архимедовых сил на структуру температурного поля в турбулентном потоке – Доклады АН СССР, 1959. – Т. 125. – N. 6. – С. 1246-1248.
[2] Bolgiano R. Turbulent spectra in a stably stratified atmosphere – J. Geophys. Res., 1959. – V.46. – N.12. – P.2226-2229.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕССА ИЗОТЕРМИЧЕСКОГО ТЕЧЕНИЯ В ВИНТОВОМ КАНАЛЕ ЭКСТРУДЕРА С УЧЕТОМ УТЕЧЕК ЧЕРЕЗ ЗАЗОР

Шишкин Д.А., Щербинин А.Г.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь
shishkin_da@bk.ru, agshch@mail.ru

Шнековые экструдеры находят широкое применение при переработке полимерных материалов. Между гребнем нарезки шнека (червяка) и внутренней поверхностью корпуса экструдера существует радиальный зазор, наличие которого приводит к появлению потоков утечек. В процессе эксплуатации экструдеров происходит постепенное увеличение радиального зазора и, как следствие, рост утечек и уменьшение производительности шнековых машин.

Авторы в работе [1] впервые предложили метод учета потока утечек ньютоновской жидкости через зазор для изотермической задачи, рассмотрев течение через плоскость нормальную к оси червяка. Данный подход учета утечек используется при построении практически всех математических моделей, в которых винтовой канал разворачивается на плоскость. В трехмерных математических моделях течения жидкости в винтовом канале поток утечек через зазор учитывается естественным образом. Однако такие модели требуют значительных вычислительных ресурсов.

В работе предлагается, с одной стороны, двухмерная математическая модель изотермического течения жидкости в развернутом канале, в которой реализован алгоритм учета утечек. Для этого выделяется замкнутый объем, в котором заданный поток через поверхность, образованную плоскостью нормальной к оси червяка [1], определяется суммой потока вдоль канала и потока утечек. С другой стороны, строится трехмерная математическая модель изотермического течения в винтовом канале экструдера, реализованная в программном комплексе Ansys CFX. Расчеты проводятся в режиме заданного расхода.

В результате решения обеих задач определяются поля скоростей и давлений в канале экструдера. Сравнение между математическими моделями проводится по перепаду (градиенту) давления в канале, по величине потока утечек для заданных значений расхода, а также по напорно-расходным зависимостям при различных значениях зазора и глубины канала.

Литература

[1] Mohr W.D., Mollouk P.S.//Ind. Chem. 1959.V.№ 6. P. 765.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ТЕЧЕНИЯ НА ПОВЕРХНОСТИ ПУЗЫРЬКА ГАЗА

Шмырова А.И., Шмыров А.В.

Институт механики сплошных сред, Пермь

lutsik@icmm.ru, shmyrov@icmm.ru

Проведено экспериментальное исследование, направленное на выявление и изучение условий, приводящих к развитию неустойчивости течения на поверхности сферического газового включения, омываемого однородным потоком жидкости. Эксперименты осуществлялись на неподвижном в лабораторной системе отсчёта пузырьке газа, подвешенного на торце тонкой иглы, которая располагалась на оси цилиндра, заполненного водой. Визуализация структуры течения на поверхности пузырька осуществлялась в рассеянном свете с помощью полиамидных частиц, осажженных на границе раздела. Визуализация приповерхностного течения проводилась методом подкрашивающих струй и методом лазерного ножа. В серии экспериментов движение жидкости генерировалось путем прокачки высокоочищенной воды в замкнутом контуре с помощью центробежного насоса, что позволяет проводить длительные эксперименты при постоянных управляющих параметрах. В другом случае обтекание пузырька газа осуществлялось путем равномерного перемещения цилиндрического сосуда, заполненного водой, как целого. Такая методика позволяет создать однородный поток жидкости относительно пузырька газа во всём сечении канала. Для дополнительной очистки межфазной поверхности от молекул поверхностно-активных остаточных примесей использовался озонированный газ.

Показано, что вариация таких управляющих параметров, как размер пузырька, скорость потока, степень загрязнения системы влияют на структуру поверхностного течения. Обнаружено, что на поверхности газового включения при некотором критическом значении безразмерного параметра (двумерного аналога числа Рэлея) происходит формирование вихревого течения. Наблюдаемая неустойчивость согласуется с результатами экспериментов, полученных при работе на плоской поверхности [1]. Проведенные исследования помогают сузить диапазон варьируемых параметров в численном эксперименте и внести ясность в природу явлений, протекающих на границе раздела двух фаз и вблизи нее. На наш взгляд в случае свободно всплывающего пузырька газа малого диаметра наблюдаемая неустойчивость может быть ответственна за спиральную траекторию всплытия. Для пузырьков газа диаметром 1-2 мм такой характер движения до сих пор не имеет общепризнанного объяснения, в отличие от пузырьков большего размера, где отклонение от сферической формы оказывает существенное влияние на смену траектории.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ: 19-71-00097.

Литература

[1] Шмырова А.И., Шмыров А.В. Механизмы формирования вихревых структур на границе раздела жидкость-газ в присутствии адсорбционного слоя // Вестник Пермского университета. Физика. 2020. Вып. 3. С. 31-38.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МОДИФИЦИРОВАННОГО ПОЛИМЕРНОГО БАЗИСНОГО МАТЕРИАЛА ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ОРТОПЕДИЧЕСКОЙ СТОМАТОЛОГИИ

Шулятникова О.А.¹, Рогожников Г.И.¹, Порозова С.Е.², Рогожников А.Г.¹

¹Пермский государственный медицинский университет им. академика Е.А. Вагнера, Пермь

²Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь

anasko06@mail.ru, alekstomat@yandex.ru, sw.porozova@yandex.ru, alekstomat@yandex.ru

Приобретенные дефекты челюстно-лицевой области в большинстве случаев требуют ортопедического этапа лечения [1, 2, 3]. При выборе конструкционного материала для изготовления сложно-челюстного протеза необходимо предусмотреть функциональные нагрузки, которые будет испытывать протез при эксплуатации. Наличие дефектов челюстных костей требует от конструкционного материала его повышенных прочностных характеристик [4]. В связи с чем, рассматривается вариант упрочнения полиамидного базисного материала посредством наноразмерных компонентов в виде диоксида титана в минимальных количествах [5, 6, 7].

Целью работы явился экспериментальный поиск возможности повышения прочностных характеристик стоматологических конструкционных материалов полимерной природы. Исследование полиамидного материала проводили на контрольных и экспериментальных образцах, содержащих в своем составе в качестве армирующего компонента наноразмерный диоксид титана в количестве до 1 мас.%. Исследовали прочность на трехточечный изгиб (σ_{max}, МПа) и модуль упругости (Е, МПа) как наиболее информативные параметры оценки прочностных характеристик стоматологических конструкционных материалов, позволяющих учитывать вертикальные и горизонтальные силы, аналогичные тем, что влияют на зубы и конструкционный материал съемных зубных протезов во время функционирования.

Результаты исследования показали увеличение максимального напряжения на 8,4%, а модуля Юнга на 7,2% у образцов с введенным в их состав наноразмерным диоксидом титана до 1 мас.% по сравнению с образцами контрольной группы. Данное исследование имеет практическое значение для ортопедической стоматологии в случаях, когда требуется упрочнение конструкционного базисного материала при изготовлении сложно-челюстных протезов и аппаратов пациентам с приобретенными дефектами челюстных костей, что, в свою очередь, способствует уменьшению риска поломок базиса конструкций при воздействии на него повышенных функциональных нагрузок.

Литература

- [1] Арутюнов А.С., Кицул И.С., Лебеденко И.Ю., Васильев В.Г. и др. Причины возникновения челюстно-лицевых дефектов и потребности больных в ортопедической реабилитации / Российский стоматологический журнал. – 2010. – №6. – С. 42–45.
- [2] Кислых Ф.И., Рогожников Г.И., Кацнельсон М.Д. и др. Лечение больных с дефектами челюстных костей – Москва : Медицинская книга, Нижний Новгород : Изд-во НГМА, 2006. – 196 с.
- [3] Шулятникова О.А. Оптимизация ортопедического этапа лечения в комплексной специализированной помощи пациентам с дефектами челюстно-лицевой области / Российский стоматологический журнал. - 2016. - №2. - С. 94-98.
- [4] Нидзельский М.Я. и др. Дезинтеграция структуры в стоматологических протезах, изготовленных из акриловых пластмасс, в процессе пользования ими по данным электронной микроскопии / Современная стоматология. - 2013. - №2. - С. 88-90.
- [5] Лукьянов С.И. и др. Температурная зависимость модуля Юнга нанотрубок на основе диоксида титана TiO₂: молекулярно-механическое моделирование / Физика твердого тела. – 2015- № 12 (57). - С. 2391-2399.
- [6] Шулятникова О.А., Рогожников Г.И., Порозова С.Е., Гридина В.О. Способ изготовления армированного съемного протеза / патент на изобретение РФ №2631050. - 15.09.2017.
- [7] Шулятникова О.А., Рогожников Г.И., Порозова С.Е., Лохов В.А., Олесова В.Н., Гуров А.А. Пострезекционный протез-обтуратор для верхней челюсти / патент РФ на полезную модель №172668. – 18.07.2017.

МЕТОДИКА ГЕОМЕХАНИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ПОДРАБОТАННОГО СОЛЯНОГО МАССИВА

Шумихина А. Ю.

«ГИ УрО РАН», Пермь

anastasy@mi-perm.ru

Разработана методика геомеханического контроля состояния соляного массива, одним из основных элементов которой является математическое моделирование геомеханических процессов. При математическом моделировании наряду с построением определяющих соотношений, отражающих процесс деформирования подработанного массива, не менее важным является вопрос параметрического обеспечения модели. Под параметрическим обеспечением понимается как наличие достоверной информации о строении рассматриваемого участка массива, так и количественная определенность параметров модели. Для уточнения особенностей строения водозащитной толщи (ВЗТ), как правило, является необходимым проведение комплекса геофизических исследований. Их интерпретация дает возможность сформировать содержательную физико-геологическую модель соляного массива, с последующей ее трансформацией в геомеханическую расчетную схему.

Для определения генезиса геофизических аномалий разработаны решающие правила совместной интерпретации результатов сейсмогеомеханических исследований, установлена согласованность изменения компонент поля напряжений и скоростей сейсмических волн. На первом этапе выполняется предварительный геомеханический расчет для усредненной физико-геологической модели, в которой не учитывается фактор латеральной изменчивости физических свойств горных пород. По результатам этих расчетов анализируется согласованность латерального изменения вертикального напряжения и скоростей упругих волн, зарегистрированных в выделенных элементах разреза. Нарушение соответствия между повышением сжимающих напряжений и увеличением скоростей интерпретируется как наличие участков реализованной техногенной нарушенности. В свою очередь, низкоскоростные зоны, соответствующие участкам незначительного изменения напряжений, рассматриваются как «природно-ослабленные». На основе этого совместного анализа сейсмических и геомеханических данных производится корректировка параметров математической модели и осуществляется повторный расчет, по результатам которого оценивается состояние породного массива.

В рамках данной методики интегральные параметры ползучести подработанного массива оцениваются по данным маркшейдерских наблюдений за сдвижением земной поверхности.

Имеющийся опыт использования данной методики на шахтных полях ВКМКС позволяет осуществлять мониторинг за геомеханической обстановкой на участках со сложным геологическим строением, контролировать образование зон техногенной нарушенности, оценивать опасность их развития и в случае необходимости принимать дополнительные меры охраны ВЗТ.

УПРАВЛЕНИЕ ДЕМПФИРОВАНИЕМ КОЛЕБАНИЙ ЭЛЕКТРОВЯЗКОУПРУГИХ КОНСТРУКЦИЙ ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗЛИЧНЫХ МЕХАНИЗМОВ ДИССИПАЦИИ ЭНЕРГИИ

Юрлова Н.А., Севодина Н.В., Ошмарин Д.А., Юрлов М.А.

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

yurlova@icmm.ru, natsev@icmm.ru, oshmarin@icmm.ru, yurlov@icmm.ru

Для повышения диссипативных свойств конструкций традиционно используют методики, основанные на дополнении исходного объекта элементами, выполненными из вязкоупругих материалов, покрывающих часть или всю поверхность конструкции целиком, либо встраиваемых внутрь многослойного объекта. В силу того, что максимальные демпфирующие свойства вязкоупругих элементов ограничены, для достижения требуемой степени демпфирования конструкции необходимо привлечение дополнительных механизмов диссипации энергии для получения требуемой степени демпфирования колебаний конструкций. Одним из таких дополнительных механизмов диссипации могут являться пьезоэлектрические элементы, соединенные с внешними пассивными электрическими цепями (зашунтированные пьезоэлементы). Использование вязкоупругих элементов в комбинации с зашунтированными пьезоэлементами позволяет обеспечить дополнительную диссипацию энергии, повышая тем самым демпфирующие свойства конструкций в широком частотном диапазоне.

На примере консольно-защемленной пластинки показано влияние на коэффициенты демпфирования колебаний кусочно-однородных вязкоупругих конструкций присоединения пьезоэлементов и подключения к его электродированным поверхностям внешних электрических резистивных и резонансных электрических цепей. Проведены расчеты двух вариантов расположения пьезоэлемента относительно пластинки (у торца и в середине) и двух вариантов взаимного расположения пьезоэлемента и вязкоупругого слоя (с одной стороны пластинки и по разные стороны).

Данные расчеты продемонстрировали необходимость аккуратного подхода к вопросам выбора геометрических характеристик и расположения используемых элементов (пьезоэлемента и вязкоупругого слоя). Показано, что за счет использования различных механизмов диссипации энергии коэффициенты демпфирования самых энергоемких первых двух мод колебаний можно увеличить в различной степени. Наилучшим вариантом демпфирования отдельной моды колебаний является комбинированный подход на основе применения покрытия пластинки вязкоупругим слоем и пьезоэлектрического пьезоэлемента, шунтированного резонансной RL -цепью, при котором удалось повысить коэффициенты демпфирования колебаний пластинки на порядок.

При этом для достижения наибольшей величины коэффициента демпфирования колебаний предпочтительным является вариант расположения пьезоэлемента и вязкоупругого слоя по разные стороны пластинки. С другой стороны, для того, чтобы использовать меньшие по величине элементы резонансной цепи, лучшим вариантом является расположение пьезоэлемента над вязкоупругим слоем.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-01-00158_а.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ МЯГКИХ БИОЛОГИЧЕСКИХ ТКАНЕЙ ПРИ ИНДЕНТИРОВАНИИ

Яковенко А.А.¹, Горячева И.Г.²

¹Институт проблем механики имени А.Ю. Ишлинского РАН, Москва

²НИИ механики МГУ, Москва

anastasiya.yakovenko@phystech.edu, goryache@ipmnet.ru

Малоинвазивные методы хирургии широко распространены в современной медицине. Одним из таких методов является введение иглы в мягкие ткани на заданную глубину для точечного воздействия на определенную область. Для повышения точности позиционирования иглы эти процедуры проводят при помощи специализированного робототехнического оборудования, при разработке которого возникает необходимость построения модели взаимодействия иглы с биологическими тканями.

Для создания моделей взаимодействия инструмента с тканью применяются численные и аналитические подходы. Взаимодействие иглы с мягкими тканями включает в себя несколько стадий: сжатие ткани, прокол ее поверхностных слоев, погружение иглы в ткань на большую глубину, удержание ее на этой глубине и дальнейшее ее извлечение. При этом в процессе взаимодействия в ткани протекают следующие механические процессы: упругое сжатие, разрушение, трещинообразование, большие деформации, релаксация, трение. Учет всех этих факторов приводит к довольно сложной задаче, поэтому при создании аналитических моделей учитываются только некоторые. Например, в работе [1] построена модель внедрения иглы в ткань и удержания ее с учетом вязкоупругих свойств ткани. При этом игла моделировалась цилиндром с плоским основанием, и рассматривалась только одна сила, действующая на основание цилиндра в вертикальном направлении.

В данном исследовании рассмотрен сложный процесс взаимодействия иглы с мягкой тканью, где помимо внедрения и удержания также исследуется стадия извлечения иглы. Игла моделировалась твердым цилиндром со сферическим основанием, а ткань – вязкоупругим слоем. Считалось, что на цилиндр в процессе взаимодействия со стороны ткани в вертикальном направлении действуют две силы: сила, действующая на основание цилиндра, вызванная сжатием ткани в вертикальном направлении, и сила, действующая на боковую поверхность цилиндра, вызванная трением. Для описания механического поведения вязкоупругого слоя при сжатии его в вертикальном направлении использовалась одномерная модель стандартного вязкоупругого тела [2]. Исходя из закона Кулона-Амонтона [3], сила трения равна произведению коэффициента трения на силу обжатия иглы. Для нахождения силы обжатия было сделано предположение, что ткань при сжатии в поперечном направлении также описывается моделью стандартного вязкоупругого тела. Использование одномерных моделей позволило получить аналитическую зависимость приложенной к цилиндру силы от времени (или глубины внедрения) на каждой стадии процесса взаимодействия и выделить основные параметры модели.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 19-58-52004).

Литература

- [1] Горячева И.Г., Досаев М.З., Селюцкий Ю.Д., Яковенко А.А., Hsiao C.-H., Huang C.-Yu., Ju M.-S., Yeh C.-H. Управление внедрением индентора в вязкоупругую ткань с использованием пьезоэлектрического привода // Мехатроника, автоматизация и управление. 2020. Т. 21. № 5. С. 304–311.
- [2] Работнов Ю.Н. Элементы наследственной механики твердых тел. М.: Наука. 1977. 384 с.
- [3] Джонсон К. Механика контактного взаимодействия. М.: Мир. 1989. 510 с.

ЭНЕРГИЯ СВЯЗИ ВОДОРОДА В ОБРАЗЦАХ ВЫСОКОПРОЧНОЙ СТАЛИ.

Яковлев Ю.А.¹

¹Институт Проблем Машиноведения Российской Академии Наук, Санкт-Петербург
yura.yakovlev@gmail.com

Механические и физические свойства высокопрочных сталей переходного мартенситно-аустенитного класса типа стали ВНС-5, в том числе: сплошность, однородность, предел текучести, коэффициент интенсивности напряжений, величина относительного сужения и сопротивление замедленному разрушению при растяжении, зависят от концентрации диффузно-подвижного водорода, который, связан с дефектами структуры этих сталей.

Из сталей семейства ВНС изготавливают метизы изделия высокой прочности. Для определения энергетического спектра водорода в подобных изделиях традиционно применяется Термодесорбционная спектроскопия (ТДС). Описание методики см. [1], где она применялась после дополнительной катодной зарядки в водном растворе H_2SO_4 в течение 30 мин.

Результаты ТДС дают, как правило, две разные группы энергий связи водорода для образцов. Первая группа в диапазоне 0,1 - 0,3 эВ относится к наиболее опасному для механических свойств диффузно-подвижному водороду, что соответствует водороду в решетке на дислокациях и на границах зерен [2].

Полученный по нашей методике дискретный термодиффузионный спектр (ДТДС) представляет из себя зависимость количества выделившегося водорода от температуры экстракции. Основное его отличие от хорошо известного метода определения ТДС заключается в исключении влияния фоновых потоков водорода из экстракционной системы, что делает метод высокочувствительным.

В результате проведенных исследований с использованием методик вакуум-нагрева и дискретных термо-диффузионных спектров определено содержание водорода в образцах метизов из стали ВНС-65. Сопоставление результатов показывает, что выдержка при нормальных условиях в течение года на воздухе существенно уменьшает содержание диффузно-подвижного водорода.

Измерения показали, что энергетические уровни водорода расположены близко друг от друга, что не позволяет однозначно с помощью низкой температуры экстракции экстрагировать водород с низкой энергией связи.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта 20-08-01100 А.

Литература

1. Escobar D. P. et al. Evaluation of hydrogen trapping in high strength steels by thermal desorption spectroscopy //Materials Science and Engineering: A. – 2012. – Т. 551. – С. 50-58.
- 2 Davidson J. L., Lynch S. P., Majumdar A. The relationship between hydrogen-induced cracking resistance, microstructure and toughness in high strength weld metal //Proceedings of hydrogen management in ship steel structure, Melbourne. – 1996. – С. 21-34.

ПРЯМАЯ УПРУГОВЯЗКОПЛАСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ОБРАЗЦА: ВЛИЯНИЕ ВНУТРЕННИХ И ВНЕШНИХ ГРАНИЦ ЗЕРЕН

А.Ю. Янц, А. А. Токарев

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь

maximus5.59@gmail.com, tokarev28.art@gmail.com

В работе предложены основные соотношения прямой упруговязкопластической модели поликристаллического образца [1]. Данная модель была использована для проведения ряда численных экспериментов по деформированию растяжением поликристаллических образцов. Целью данных экспериментов было выявление влияния внешних (свободных) и внутренних (межкристаллитных) границ, размера зерна и размера образца на интегральные зависимости и эволюцию внутренней структуры материала в различных областях образца. Начальная зеренная структура образца (от 500 до 1000) формировалась с использованием программного продукта Nperg, после чего производилось аппроксимация кристаллитов совокупностью конечных элементов (порядка 2000 на зерно) с помощью программного комплекса Gmsh. Для непосредственного решения краевой задачи [2] использовался пакет программ собственной разработки, реализующий алгоритм решения сформулированной в скоростной постановке задачи упруговязкопластичности методом конечных элементов.

Результаты численных экспериментов по растяжению образцов показывают, что наличие свободной поверхности вносит существенную неоднородность в процесс деформирования и оказывает влияние на эволюцию внутренней структуры материала, как непосредственно в приповерхностных областях, так и в объеме образца. Пластические деформации инициируются в приповерхностных слоях образца, проникая с течением процесса в более глубокие слои материала. Неоднородное пластическое деформирование, имеющее место даже в пределах зерен, порождает ротацию и разориентацию подобластей отдельных зерен, инициируемые также в приповерхностных слоях, что при значительных деформациях ведет к фрагментации и дроблению. Показано, что критическим для образца является средний размер зерна, при уменьшении которого растет доля внутренних межзеренных границ и, соответственно, интенсивность упрочнения: для размеров зерен в диапазоне от 13 до 108 мкм подтверждена справедливость закона Холла – Петча.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 20-31-70027) и Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (базовая часть государственного задания ПНИПУ FSNM-2020-0027).

Литература

- [1] Трусов П.В., Швейкин А.И., Нечаева Е.С., Волегов П.С. Многоуровневые модели неупругого деформирования материалов и их применение для описания эволюции внутренней структуры // Физ. мезомех. 2012. №1.
- [2] Поздеев А.А., Трусов П.В., Няшин Ю.И. Большие упругопластические деформации: теория, алгоритмы, приложения. – М.: Наука, 1986. 232 с.

Научное издание

**XXII Зимняя школа по механике сплошных сред,
Пермь, 22 – 26 марта 2021 г.
Тезисы докладов**

Издается в авторской редакции
Техническая подготовка и обработка материалов
Н.А. Юрлова

Объем данных 77Мб

Подписано к использованию 10.03.2021

Размещено в открытом доступе
на сайте <https://conf.icmm.ru/event/2/page/4>

«Институт механики сплошных сред
Уральского отделения Российской академии наук» - филиал
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Пермского федерального исследовательского центра
Уральского отделения Российской академии наук

614013. г. Пермь, ул. Академика Королева, д.1