



IV ВСЕРОССИЙСКИЙ СИМПОЗИУМ

МЕХАНИКА КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И КОНСТРУКЦИЙ

4 декабря – 6 декабря 2012 года

Москва, Ленинградский проспект, 7

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

МОСКВА
2012

**Отделение энергетики, машиностроения, механики и процессов
управления Российской академии наук**

**Научный совет РАН по механике конструкций из композиционных
материалов**

ФГБУН Институт прикладной механики Российской академии наук

**ФГБУ ВПО Московский авиационный институт (Национальный
исследовательский университет)**

МЕХАНИКА КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И КОНСТРУКЦИЙ

**ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ
IV-го Всероссийского симпозиума**

«Механика композиционных материалов и конструкций». Тезисы докладов IV-го Всероссийского симпозиума. Москва, 4 декабря – 6 декабря 2012 г. – Москва, ИПРИМ РАН, 2012 – 146 с.

В сборник материалов симпозиума включены тезисы докладов ученых из ряда институтов РАН, научных и образовательных учреждений. Представлены различные направления механики деформируемого твердого тела, механики жидкости, газа и плазмы, вычислительной механики и др.

Составители:

Карнет Ю.Н., Яновская Ю.Ю., Левин Ю.К., Яновский Ю.Г.

© Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт прикладной механики Российской академии наук, 2012

СОДЕРЖАНИЕ

Секция 1. Прочность гетерогенных материалов, композитов, адаптивных материалов и конструкций	13
Напряженно-деформированное состояние контактного узла с антифрикционной прослойкой из композиционного материала Адамов А.А., Каменских А.А., Труфанов Н.А.....	14
Прочность и трещиностойкость дисперсно-армированных термопластов в условиях холодного климата Бабенко Ф.И., Сухов А.А., Федоров Ю.Ю., Саввинова М.Е.....	15
Температурные ограничения по применению армированных полиэтиленовых труб для газопроводов в условиях низких температур Бабенко Ф.И., Федоров Ю.Ю., Саввина А.В.....	16
Учет влияния анизотропных свойств композитных преград и стохастических процессов при проникании инденторов Багдоев А.Г., Ванцян А.А., Григорян М.С.....	17
Анализ динамики процесса посадки космического корабля с рычажно-тросовым посадочным устройством Бакулин В.Н., Борзых С.В., Воронин В.В.....	18
Анализ деформативности и прочности многослойных композитных панелей несимметричной структуры по толщине с учетом технологических факторов Биткина О.В., Биткина Е.В.....	19
Исследование формоизменения и остаточных напряжений многослойных панелей из несимметричных слоистых композитов с учетом технологических факторов Биткина О.В.....	20
Анализ напряженно-деформированного состояния многослойной полимерной трубы с учетом температурных воздействий Бочкарева С.А., Люкшин Б.А., Реутов Ю.А.....	21
Экспериментальные и расчетные исследования прочности комля лопасти несущего винта Бурцев Б.Н., Тютюнников Н.П.....	22
Теоретические и экспериментальные исследования процессов агломерации наночастиц шунгита Валиев Х.Х., Яновский Ю.Г., Юмашев О.Б., Тютюнников А.А., Беркова М.Д., Карнет Ю.Н., Семенов Н.А., Семенов П.Е.....	23
Структурно-морфологические закономерности получения высокопрочных композиционных материалов на основе политетрафторэтилена Воропаев В.В.....	25
Расчет микроактюатора дискретного действия на основе композиции кремния-оксида кремния Гаврюшин С.С., Подкопаева А.С.....	27

О статистической оценке степени локализации повреждений в многоэлементной механической системе по результатам её нагружения до разрушения	
Гольдштейн Р.В., Онищенко Д.Д.....	28
О результатах решения краевых задач анизотропной вязкоупругости композиционных материалов на основе различных упрощающих гипотез	
Горохов А.Ю., Труфанов Н.А., Чеклецова Л.В.....	29
Поведение фторопластового включения в поверхности трения углепластика	
Горячева И.Г. Шпенев А.Г.....	30
Разработка и применение композиционных материалов, конструкций для систем трубопроводного транспорта в экстремальных условиях	
Гусев Е.Л.....	31
Упруго-пористое полупространство под действием нестационарной нормальной силы	
Данг Куанг Занг, Тарлаковский Д.В.....	33
Коэффициенты концентрации напряжений в слое тканого композита плотняного плетения	
Дедков Д.В., Зайцев А.В., Ташкинов А.А.....	34
Исследование процесса распространения трещины в микроструктуре твердого сплава с порой	
Дворник М.И., Михайленко Е.А.....	36
Локализованные волны деформации в нелинейно-упругой зернистой среде	
Ерофеев В.И., Павлов И.С.....	37
Приложение теории оболочек N-го порядка к задачам устойчивости систем с фазово-структурными переходами	
Жаворонок С.И.....	38
Механизм упруго-пластического формирования структуры полимерных прессовок из порошковых материалов	
Жилин С.Г., Сапченко И.Г., Комаров О.Н.....	39
Механика процессов эксплуатации колец из терморасширенного графита и их пакетов в кранах с уплотнением по штоку	
Зайцев А.В., Исаев О.Ю., Караваев Д.М., Смирнов Д.В., Ханов А.М.....	40
Процессы накопления повреждений и локализованное разрушение однонаправленно армированных волокнистых композитов случайной структуры при многоосном пропорциональном нагружении	
Зайцев А.В., Кислицын А.В., Кокшаров В.С., Соколкин Ю.В.....	42
Теоремы о свойствах случайных полей напряжений и деформаций в высокопористых металлических пенах и биокөмозитах	
Зайцев А.В., Кокшаров В.С., Фукалов А.А.....	44
Влияние β^--облучения на прочностные свойства нанонаполненного поливинилхлорида и полиметилметакрилата	
Колупаев Б.Б., Малиновский Е.В., Сидлецкий В.А.....	46

Исследование механических свойств эластомерных материалов, содержащих добавки углеродных нанотрубок, методом наноиндентирования	
Корнев Ю.В., Яновский Ю.Г., Бойко О.В., Чиркунова С.В., Гусева М.А.....	47
Исследование нестационарных динамических волн в нелинейных вязкоупругих стержневых системах	
Курбанов Н.Т., Бабаджанова В.Г., Юсифли В.Н.....	48
Исследование теплозащиты керамических покрытий охлаждаемых лопаток ГТД при газопламенном нагреве	
Лепешкин А.Р.....	49
О функции Грюнайзера для анизотропных композитов	
Лукьянов А.А.....	50
Нелинейные многоуровневые модели механики деформирования и разрушения композитов	
Макарова Е.Ю., Соколкин Ю.В.....	51
Определение механических свойств полимерного композиционного материала PARABEAM	
Мартыросов М.И., Рабинский Л.Н., Серпичева Е.В.....	52
Вопросы прочности при применении методов сведения решений систем парных интегральных уравнений к уравнению Фредгольма в осесимметричной контактной задаче с вертикальным цилиндрическим зазором	
Минасян А.Ф.....	53
Исследование напряженного состояния в образцах композита с трехмерной ортогональной структурой армирования в условиях эксперимента на сжатие	
Ошева И.Ю., Ташкинов А.А., Шавшуков В.Е.....	54
Влияние степени кристалличности полимерной матрицы на триботехнические свойства композиции	
Панин С.В., Бочкарева С.А., Люкшин Б.А., Люкшин П.А., Корниенко Л.А.....	55
Термофлуктуационная модель роста трещин	
Перельмутер М.Н.....	56
Изучение физико-механических свойств отвержденных эпоксидных композиций, содержащих полисульфоны разного типа	
Солопченко А.В., Яблокова М.Ю., Шорникова О.Н., Кепман А.В.....	57
Использование наноиндентирования для идентификации упругих свойств тонких твердых покрытий	
Торская Е.В., Корнев Ю.В.....	58
Влияние факторов холодного климата на показатели изгибной прочности однонаправленных композитов на основе стекло- и базальтопластиков	
Федоров Ю.Ю., Бабенко Ф.И., Лапий Г.П.....	59
Переходный слой и его характеристики при адгезии твердых тел	
Фроленкова Л.Ю., Шоркин В.С., Якушина С.И.....	60

Диагностика повреждения стержня	
Хахимов А.Г.....	61
Влияние степени дисперсности минерала шунгит на физико-механические показатели эластомерных композиций на основе СКТН-А	
Чиркунова С.В., Корнев Ю.В., Бойко О.В., Яновский Ю.Г.....	63
Моделирование демпфирующих свойств пакета композитных слоев, армированных однонаправленными волокнами	
Шишкин В.М., Левашов А.П.....	64
Удар деформируемой массой по упругой ортотропной цилиндрической оболочке	
Шклярчук Ф.Н.....	65
Сравнение скорости начала фрагментации высокоскоростного ударника на сплошной и дискретной преграде	
Шумихин Т.А.....	66
Структуры наноразмерных наполнителей в среде эластомерных матриц	
Яновский Ю.Г., Юмашев О.Б., Семенов Н.А., Карнет Ю.Н., Козлов Г.В.....	67
 Секция 2. Аэро- гидромеханика, реология структурно-сложных сред	 68
Теоретические модели и законы коалесценции газовых пузырьков в жидкости	
Бошеняттов Б.В.....	69
Моделирование волн типа цунами на гидродинамическом лотке ИПРИМ РАН	
Бошеняттов Б.В., Левин Ю.К., Лисин Д.Г., Попов В.В., Семянистый А.В., Яновский Ю.Г.....	70
О гидродинамическом взаимодействии дисперсных частиц в потоках вязкой жидкости	
Гуськов О.Б.....	71
Основные уравнения гидромеханики сплошных гетерогенных сред с переменной массой	
Исмайлова Ш.Г., Гаджиева Г.Ф., Гахраманов П.Ф., Исмаилов Р.Ш.....	72
Влияние нанонаполнителя и электрического разряда на вязкоупругие свойства ПВХ и ПС	
Колупаев Б.Б., Клепко В.В., Лебедев Е.В., Левчук В.В.....	73
Динамическое нагружение нанонаполненных гибкоцепных полимеров	
Колупаев Б.Б., Кривцов В.В., Максимцев Ю.Р.....	74
Модель процесса осаждения накипи в теплоэнергетических установках с магнитной обработкой воды	
Кошоридзе С.И., Левин Ю.К.....	75
Противонакипная эффективность ввода затравочных кристаллов	
Кошоридзе С.И., Левин Ю.К.....	76
Сравнение эффективности детоксикации биожидкостей методами фильтрации и магнитосорбции	
Кошоридзе С.И., Левин Ю.К.....	77

Численное моделирование течений в импульсной гиперзвуковой аэродинамической трубе	
Левин В.А., Мануйлович И.С., Марков В.В.....	78
Распространение звука низких частот в воде с гелиевыми пузырями	
Левин Ю.К., Попов В.В.....	79
О численном гидродинамическом моделировании равноканального многоуглового прессования аморфного полимерного композита в двухповоротном штампе с подвижной выходной стенкой	
Периг А.В., Голоденко Н.Н.....	80
Нестационарное течение в пористом материале	
Саваторова В.Л., Талонов А.В., Власов А.Н.....	81
Электрореологические свойства суспензий на основе наноразмерных частиц полиимидов	
Семенов Н.А., Сидорова Г.Я., Юмашев О.Б., Гусева М.А., Яновский Ю.Г.....	82
Исследование магнитореологических свойств суспензий на основе магнетита в условиях нестационарного циклического нагружения	
Шалашилин А.Д., Семенов Н.А., Данилин А.Н.....	83
Секция 3. Проблемы горения и детонации сложных сред	85
Математическое моделирование Фингер-эффекта при фильтрационном горении	
Алдушин А.П., Ивлева Т.П.....	86
Разработка модуля расчета плоских детонационных течений в системе ANSYS Fluent	
Бедарев И.А., Федоров А.В., Ульзутуева К.В.....	87
Исследование процессов поджига и стабилизации пламени керосино-воздушной смеси объемным электрическим разрядом	
Великодный В.Ю., Гусева М.А., Дыренков А.В., Попов В.В., Садовин М.А., Семенов П.Е., Яновский Ю.Г.....	88
К теории движения и горения турбулентных струй в сносящем потоке внешней среды	
Воротилин В.П.....	89
Определение условий диффузионного воспламенения водорода	
Головастов С.В., Бочарников В.М., Ленкевич Д.А., Бакланов Д.А., Голуб В.В.	90
Разработка энергоэффективных методов получения детонации в каналах субкритического диаметра	
Голуб В.В., Иванов К.В., Бакланов Д.И., Головастов С.В.....	91
Акустическое управление эффективностью и токсичностью сгорания газовых топлив	
Голуб В.В., Кривокорытов М.С.....	92
Исследование процессов смешения пространственных воздушных потоков со струями, имитирующими генераторные газы в камере дожигания РПД	
Захаров Н.Н., Лисин Д.Г., Шаров М.С.....	93

Взаимодействие волны гетерогенной детонации, распространяющейся в ячеистом режиме, с облаком инертных частиц	
Кратова Ю.В., Федоров А.В.....	94
Стабилизация детонации в сверхзвуковом потоке водородно-воздушной смеси в плоских каналах	
Левин В.А., Журавская Т.А.....	95
Детонация в квадратной камере с подвижными стенками и трехмерных каналах квадратного сечения	
Левин В.А., Мануйлович И.С., Марков В.В.....	96
Ячеистая детонация в трехмерных каналах и открытом пространстве	
Левин В.А., Мануйлович И.С., Марков В.В.....	97
Численное моделирование на основе уравнений Навье-Стокса распространения волн горения в шаровом реакторе и продувок модели тягового устройства с кольцевым соплом	
Левин В.А., Марков В.В., Громов В.Г., Афонина Н.Е., Хмелевский А.Н.....	98
Термодинамика и механизмы реакций сжигания топлив с новыми углеродными добавками. Квантово-механическое исследование	
Никитина Е.А., Яновский Ю.Г., Карнет Ю.Н.....	99
Математическое моделирование процессов горения с использованием бессеточных методов	
Попов В.В., Семянистый А.В., Яновский Ю.Г.....	100
Особенности теплового диффузионного горения многокомпонентных твердотельных смесей	
Сапченко И.Г., Комаров О.Н., Жилин С.Г.....	101
Расчет подавления газовой детонации инертными частицами в двухскоростном двухтемпературном приближении	
Тропин Д.А., Федоров А.В.....	102
Секция 4. Вычислительные методы механики гетерогенных сред	103
Численный анализ предельной деформируемости композитных оболочек вращения при импульсном нагружении	
Абросимов Н.А., Елесин А.В.....	104
Метод оценки максимальных окружных деформаций многослойных неравномерно нагретых оболочек вращения переменной толщины при действии нестационарного одностороннего импульса давления	
Бакулин В.Н., Бугай И.В., Острик А.В.....	105
Методы решения задач численного анализа и оптимального проектирования неоднородных композиционных материалов и элементов конструкций с требуемым и регулируемым комплексом свойств	
Бакулин В.Н., Гусев Е.Л.....	107
О критериях выбора параметров конечно-элементной сетки	
Бакулин В.Н., Инфлянскас В.В.....	108

Метод симметрических многочленов в расчётах характеристической матрицы многослойной среды	
Беляев Ю.Н.....	109
Экструзия композитного материала в условиях волнового воздействия	
Беляева Н.А., Прянишникова Е.А., Столин А.М., Кобзев Д.Е.....	110
Расчет поля напряжений в приконтурной зоне выработки, закрепленной анкерами, методом граничных элементов	
Бобылев Д.Е., Масько Л.В.....	111
О моделировании контактного взаимодействия упругих тел с тонкими покрытиями винклеровского типа	
Бобылёв А.А., Белашова И.С.....	112
Деформирование и разрушение тонкостенных элементов конструкций летательных аппаратов при тепловом и механическом действиях ионизирующего излучения	
Бугай И.В.....	113
Расчет совместного действия излучений и ударной волны на многослойные ортотропные композитные оболочки переменной толщины	
Бугай И.В.....	115
Методика расчета коэффициента теплопроводности нитевидных нанокристаллов при различных температурах	
Вахрушев А.В., Северюхин А.В., Северюхина О.Ю.....	117
Исследование начального этапа процесса формирования нановискеров на активированной подложке методами вычислительной механики гетерогенных сред	
Вахрушев А.В., Северюхин А.В., Северюхина О.Ю.....	118
Моделирование уравнений конвективного переноса тепла в структурно-неоднородных средах методом двухмасштабного усреднения	
Волков-Богородский Д.Б., Власов А.Н.....	119
Интерьерные границы композитов: полимасштабность структуры и свойства силовых полей	
Гергега А. Н.....	120
Математические методы оптимального синтеза физико-механической и геометрической структуры композиционных материалов, конструкций при воздействии волн в вариационной постановке	
Гусев Е.Л.....	122
Применение теории многозначных отображений для исследования предельных возможностей композиционных структур при волновых воздействиях различной физической природы	
Гусев Е.Л.....	123
Структурное моделирование уравнений регрессии процесса азотирования	
Данеев А.В., Русанов В.А., Эглит В.Э.....	125

О согласовании экспериментальных данных и результатах моделирования процесса получения ультрадисперсных порошков на основе оксидов металлов в плазме ВЧИ разряда Данилова О.Т.....	126
Разработка автоматизированного численного метода проектирования композиционных материалов Димитриенко Ю.И., Соколов А.П., Шпакова Ю.В.....	127
Построение математической модели полосы и балки из композиционного материала на основе принципа сжатых отображений Зверьев Е.М.....	129
Моделирование дислокационной структуры композитного сплава Емалетдинов А.К., Талипов Р.Р.....	130
Моделирование кинетики роста пор в композитном сплаве Емалетдинов А.К., Талипов Р.Р.....	131
Моделирование эволюции структуры композитного сплава при термомеханическом нагружении Емалетдинов А.К., Талипов Р.Р.....	132
Моделирование высокотемпературной ползучести композитного сплава Емалетдинов А.К., Талипов Р.Р.....	133
Квантово-механическое моделирование упругих свойств наночастиц карбида титана и карбида вольфрама Заводинский В.Г., Кулик М.А., Гниденко А.А.....	134
Приложение нелокального преобразования Дарбу для получения точных решений уравнения Фоккера-Планка, моделирующего композит с магнитными однодоменными частицами Кудрявцев А.Г.....	135
Одномерная трехуровневая модель нелинейного деформирования сплава с памятью формы при фазовых и структурных превращениях Мишустин И.В.....	136
Квантово-механическое исследование модификации силикатной компоненты шунгита для получения наполнителя полибутадиенстирольной каучуковой матрицы с улучшенными адгезионными и прочностными свойствами Никитина Е.А., Яновский Ю.Г., Карнет Ю.Н.....	137
Применение градиентных моделей для исследования механических и термомеханических процессов, протекающих в тонкослойных композитных структурах Соляев Ю.О., Лурье С.А., Саганов Е.Б., Харченко К.Д.....	138
Новые гиперболические модели в механике гетерогенных сред Суров В.С., Березанский И.В.....	139

Секция 5. Биомеханика

141

Композиция для лечения и профилактики заболеваний пародонта на основе листерина, шунгит-серебрянного нанокompозита и перекиси водорода

Завьялова И.В., Полтавцев А.М., Зарайский Е.И..... 142

Экспресс-диагностика методом ИХА с применением золотых наночастиц потенциальных онкомаркеров - плацентарных белков гликоделина и IGFBP-1

Зарайский Е.И., Полтавцев А.М., Завьялова И.В..... 143

Выявление наиболее диагностически ценных онкомаркеров для массовой скрининговой диагностики населения

Осьмак Г.Ж., Полтавцев А.М., Зарайский Е.И., Завьялова И.В..... 144

Изучение биобезопасности «Геля для обработки рук хирургов «Серебряная органза» на основе шунгит-серебрянного нанокompозита

Полтавцев А.М., Завьялова И.В., Зарайский Е.И..... 145

Определение биобезопасности наноматериалов культуральным методом

Полтавцев А.М., Зарайский Е.И., Завьялова И.В..... 146

Секция 1

Прочность гетерогенных материалов, композитов, адаптивных материалов и конструкций

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ КОНТАКТНОГО УЗЛА С АНТИФРИКЦИОННОЙ ПРОСЛОЙКОЙ ИЗ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

Адамов А.А.¹, Каменских А.А.², Труфанов Н.А.²

¹*ФГБУН Институт механики сплошных сред УрО РАН, г. Пермь, Россия*

²*ФГБОУ ВПО Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Россия*

Композиционные материалы на основе фторопласта имеют широкое применение в качестве антифрикционных прослоек контактных узлов различного назначения, в частности в опорных частях пролетных строений мостов.

Выполнен цикл экспериментальных исследований деформационных характеристик композиционных материалов антифрикционной прослойки. Проведены испытания по определению твердости материалов путем вдавливания шарика диаметром 5 мм. Цилиндрические образцы с диаметром и длиной равными 20 мм исследовались в условиях свободного сжатия, а также стесненного сжатия путем прессования в специальном приспособлении с жесткой стальной обоймой. Все испытания проводились на испытательной машине Zwick Z100SN5A при уровнях деформаций, не превышающих 10%. На основе анализа результатов экспериментов в качестве модели поведения исследованных материалов была выбрана деформационная теория упругопластичности. Средствами программного комплекса ANSYS построена конечно-элементная модель натурных экспериментов и проведена серия численных испытаний. В численных экспериментах реализована трехмерная контактная задача с учетом трения. Установлено, что численный расчет с использованием выбранных определяющих соотношений дает хорошее количественное соответствие результатам эксперимента.

Рассмотрена задача о напряженно-деформированном состоянии сферического контактного узла, включающего: верхнюю плиту с шаровым полированным сегментом, нижнюю плиту со сферическим вырезом и прослойку из антифрикционного композиционного материала (сферическая поверхность скольжения). Такие опорные части с шаровым сегментом используются в мостах, мостовых сооружениях, эстакадах и т.д. Выполнено моделирование условий опирания мостовой конструкции на верхнюю плиту опоры. При нагружении верхней плиты происходит контакт с учетом трения между упругими стальными плитами с упругопластической прослойкой.

Выполнена практическая оценка сходимости полученных результатов в зависимости от количества узловых неизвестных в зоне контакта. Проанализированы условия опирания мостовой конструкции, установлены границы зон сцепления-скольжения (контактных состояний), определены величины и характер распределения контактного давления и контактного касательного напряжения, рассмотрено влияние свойств композиционных материалов антифрикционной прослойки на напряженно-деформированное состояние контактного узла конструкции.

ПРОЧНОСТЬ И ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ ДИСПЕРСНО-АРМИРОВАННЫХ ТЕРМОПЛАСТОВ В УСЛОВИЯХ ХОЛОДНОГО КЛИМАТА

Бабенко Ф.И., Сухов А.А., Федоров Ю.Ю., Саввинова М.Е.

ФГБУН Институт проблем нефти и газа СО РАН, г. Якутск, Россия

Усиление термопластов волокнистыми наполнителями является основным направлением получения конструкционных (инженерных) композитов на основе термопластов. Несмотря на наличие определенного объема информации по влиянию факторов окружающей среды на свойства дисперсно-армированных термопластов, включая ПА6-211-ДС, в различных климатических зонах, информация для зоны холодного климата весьма ограничена, а данные по изменению (сохраняемости) низкотемпературных показателей свойств практически отсутствуют.

Целью работы было выявление и интерпретация, на основе результатов исследования климатической стойкости ПА6-211-ДС, характерных особенностей проявления эффектов старения, которые присущи дисперсно-армированным полимерным композитам и обуславливают изменения важнейших показателей механических свойств материалов, включая низкотемпературные.

Результаты исследований кратковременной прочности и трещиностойкости стеклопластика ПА6-211-ДС при старении в условиях холодного климата и температуры испытаний 293К и 213К. Выбраны и обоснованы параметры оценки трещиностойкости материала: предел трещиностойкости и вязкость разрушения (критический коэффициент интенсивности напряжений) при температурах испытаний 293К и 213К, соответственно. Сформулирован механизм старения, заключающийся в деградации адгезионной составляющей прочности связи на границе раздела компонентов, образовании участков отслоения и появления фрикционной составляющей, вклад которой зависит от температуры испытаний образцов и объясняет сравнительно малую чувствительность низкотемпературных показателей прочности образцов, экспонированных в условиях неотпливаемого склада. При этом отмечено, что изменения показателей трещиностойкости композита могут явиться информативными контрольными параметрами сравнительной оценки изменения адгезионной составляющей прочности связи волокно-матрица в дисперсно-армированном материале. Указанное замечание требует проведения дополнительных исследований.

Выявленные характерные особенности являются, по мнению авторов, общими для дисперсно-армированных композитов на основе термопластов.

ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ОГРАНИЧЕНИЯ ПО ПРИМЕНЕНИЮ АРМИРОВАННЫХ ПОЛИЭТИЛЕНОВЫХ ТРУБ ДЛЯ ГАЗОПРОВОДОВ В УСЛОВИЯХ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР

Бабенко Ф.И., Федоров Ю.Ю., Саввина А.В.

ФГБУН Институт проблем нефти и газа СО РАН, г. Якутск, Россия

Осуществлена оценка механического поведения армированных синтетическими нитями полиэтиленовых труб, в конструкции которых предусмотрен адгезионный слой, связывающий армирующую и полиэтиленовые оболочки трубы. Представлены результаты квазистатических испытаний на прочность при растяжении модельных образцов в диапазоне низких климатических температур и скоростей испытаний 25-1000 мм/мин.

Действующие на настоящее время нормативно-технические документы предусматривают ряд температурных ограничений на применение полиэтиленовых труб при строительстве подземных газопроводов, в частности, определяющим служит требование о недопустимости охлаждения стенки трубы газопровода в условиях эксплуатации ниже минус 15°C (СП 42-103-2003).

Ранее, в квазистатических испытаниях на прочность при растяжении (скорость испытаний 25 мм/мин) модельных образцов армированных полиэтиленовых труб (АПТ) производства ЗАО «Сибгазппарат» в диапазоне климатических температур, нами выявлен, при температуре –15°C, вязко-хрупкий переход (ВХП) в механизме разрушения образцов. В настоящей работе те же испытания проведены в расширенном скоростном диапазоне. Установлена зависимость температуры ВХП от скорости испытаний, которая при скорости 1000 мм/мин достигает значения 0°C.

Интерпретирован механизм разрушения модельного образца АПТ, заключающийся в растрескивании технологического слоя (либо границы раздела), адгезионно связанного со слоями ПЭ80 (внутренняя и внешняя оболочки АПТ), способность которых к торможению трещины и определяет переход от вязкого разрушения к хрупкому при понижении температуры испытаний. Переход от вязкого разрушения к хрупкому определяется ВХП в механизме разрушения полимерных (ПЭ80) слоев АПТ, а именно переходом в состояние плоской деформации в вершине разрушающей трещины.

Представляется, что полученный результат подчеркивает необходимость дальнейшего уточнения и согласования существующих регламентных требований по применению труб и эксплуатации полиэтиленовых трубопроводов в регионах холодного климата.

УЧЕТ ВЛИЯНИЯ АНИЗОТРОПНЫХ СВОЙСТВ КОМПОЗИТНЫХ ПРЕГРАД И СТОХАСТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ПРОНИКАНИИ ИНДЕНТОРОВ

Багдоев А.Г., Ванцян А.А., Григорян М.С.

Институт механики Национальной академии наук Армении, г. Ереван, Армения

В представленном докладе рассматриваются теоретические и экспериментальные результаты, полученные авторами в ходе многолетних исследований задач проникания твердых тонких тел в деформируемые среды при наличии существенной анизотропии в области пластичности, имеющей место вблизи тела позади фронта разрушения, и области упругости среды впереди этого фронта. Показано теоретически и проверено экспериментально, что в случае, когда предел текучести трансверсально-изотропной пластической среды по радиусу вдвое больше предела текучести по оси проникания, имеет место эффект значительного увеличения напряжения, действующего со стороны среды на тело и уменьшения глубины проникания. Образец композитной слоистой среды был составлен авторами путем наложения многих пластинок из двух материалов - стали и свинца. При этом имеет место указанное отношение пределов текучести по радиусу и оси пластической среды и подтверждается в ходе опыта вышеуказанное значительное уменьшение глубины проникания за счет анизотропии.

Остальная часть доклада посвящена современной проблеме учета микроразрушений среды при проникании тела вблизи него с образованием микропор. Определены, как это сделано ранее в работах авторов для обычной пластической среды, кинематические параметры с учетом пористости. В дифференциальное уравнение нуклеации и роста пор Чу-Нидельмана-Гарсона сделаны упрощения вблизи критического значения пористости, что позволило оставить в указанном уравнении только кинематические параметры.

В слагаемом, соответствующем нуклеации пор, содержащем нормальное гауссовское выражение для плотности вероятности, при изучении рассматриваемой нестационарной задачи проникания, рассмотрение ведется в рамках стохастического процесса в окрестности средней кривой с зависящими от времени математическим ожиданием и дисперсией. Тогда получается обобщение указанного значения плотности вероятности в виде процесса Башелье. Далее, в соответствии с развитым авторами методом применения нелинейной волновой динамики при изучении случайных процессов, в линейное диффузионное уравнение для плотности вероятности Фоккера-Планка, решением которого является указанный линейный процесс, добавлено вблизи средней кривой процесса нелинейное слагаемое, и приводится решение указанного уравнения, дающее уточненное нелинейное значение плотности вероятности и самой вероятности процесса вблизи области резкой нуклеации, создания пор, где имеют место сильные изменения параметров и вероятностей процессов, где необходимо учитывать нелинейность.

Для разных значений коэффициентов нелинейности по полученным простым интегралам в решении нетрудно произвести численный расчет, сравнить с имеющимися экспериментальными данными и проверить применимость теории.

АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ПРОЦЕССА ПОСАДКИ КОСМИЧЕСКОГО КОРАБЛЯ С РЫЧАЖНО-ТРОСОВЫМ ПОСАДОЧНЫМ УСТРОЙСТВОМ

Бакулин В.Н.¹, Борzych С.В.², Воронин В.В.²

¹*ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва, Россия*

²*ОАО РКК "Энергия" им. С.П.Королева, г. Королев, Московская обл., Россия*

Рассматривается расчетная модель для анализа динамики движения космического аппарата (КА), начиная с момента первого контакта его посадочного устройства (ПУ) с посадочной поверхностью до полной остановки. Данный этап является одной из ключевых фаз его функционирования, поскольку отказ ПУ (полный либо частичный) практически однозначно приводит к возникновению аварийной ситуации. Рассеивание значительной остаточной кинетической энергии, которой обладает КА перед касанием с посадочной поверхностью, осуществляется опорами ПУ [1]. Посадочное устройство включает в себя четыре одинаковые по конструкции посадочные опоры с равномерным азимутальным расположением их через 90°.

Движение КА с механическим ПУ моделируются системой тел, состоящей из центрального тела (корпуса КА) и амортизаторов, один конец которых крепится к корпусу КА, а другой – к тарели. Ограничителем углового движения стоек-амортизаторов посадочной опоры служат тросы из высокопрочного материала, закрепленных одним концом на корпусе КА, а другим на стойке в шарнирном узле крепления с тарелью. Тросы также являются элементами рассеивания энергии, однако их вклад сказывается только при растяжении.

Амортизатор выполнен в виде двухзвенной телескопической стойки и состоит из штока и цилиндра; внутри последнего находится энергопоглотитель (например, сминаемые соты). Амортизаторы и тросы ПУ крепятся к корпусу КА в районе силовых элементов конструкции КА.

Тела рассматриваются как свободные, а действие смежных тел заменяется соответствующими силами реакций связей и моментами. С целью определения реакций связей записываются специальные уравнения связей, позволяющие определить силы и моменты реакций связей в точках взаимодействия корпуса КА и элементов ПУ. Для каждого тела записываются уравнения движения центров масс (в инерциальной системе координат) и вращения относительно центров масс (в связанных системах координат тел).

Необходимо отметить, что при анализе процесса посадки с целью выбора типа и конкретных характеристик посадочного устройства необходимо учитывать, что требуется не только обеспечить гашение остаточной кинетической энергии аппарата, но и выполнить ряд требований, а именно: не превышение перегрузкой некоторых предельных значений (для выживания экипажа, сохранности аппаратуры); обеспечение определенного минимального клиренса для обеспечения многократности использования конструкции КА; отсутствие опрокидывания; обеспечение такой ориентации в момент полной остановки, при которой возможно продолжение миссии.

Литература:

1. Бакулин В.Н., Воронин В.В., Борzych С.В. Выбор оптимальных параметров механического посадочного устройства пилотируемого транспортного корабля / Тезисы докладов Всероссийской конференции «Механика наноструктурированных материалов и систем», 13-15 декабря 2011 г. – М.: ИПРИМ РАН, 2011. – С.11-12.

АНАЛИЗ ДЕФОРМАТИВНОСТИ И ПРОЧНОСТИ МНОГОСЛОЙНЫХ КОМПОЗИТНЫХ ПАНЕЛЕЙ НЕСИММЕТРИЧНОЙ СТРУКТУРЫ ПО ТОЛЩИНЕ С УЧЕТОМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ

Биткина О.В., Биткина Е.В.

*Филиал ФГБОУ ВПО Самарский Государственный технический университет,
г. Сызрань, Россия*

Теоретический анализ напряженно-деформированного состояния размеростабильных композитных панелей, с учетом технологических погрешностей при изготовлении, позволяет создать эталон деформирования рабочей поверхности в условиях нагружения механическими и тепловыми нагрузками.

В настоящей работе рассматриваются вопросы деформативности и прочности многослойных прямоугольных панелей, изготовленных из композиционных материалов (КМ) и обладающих анизотропией вследствие несимметрии свойств пакета КМ по толщине, обусловленной наличием технологических погрешностей. Принимаются во внимание технологические факторы, имеющие место при изготовлении: остаточные температурные напряжения и предварительное натяжение волокон. Панель находится под действием распределенной нагрузки $q(x,y)$ и температурного поля $\Delta T = const$. Продольные края панели шарнирно оперты, поперечные кромки закреплены произвольным образом: заделка, скользящая заделка, шарнир и свободный край. Граничные условия по поперечным кромкам допускают как симметричное, так и несимметричное закрепление.

При формулировании математической модели гипотеза Кирхгофа распространяется на все тело анизотропной среды в рамках связанных плоской задачи и задачи изгиба пластин. Разрешающим уравнением является линейное дифференциальное уравнение восьмого порядка в частных производных относительно обобщенной функции перемещений, в котором пропадают коэффициенты, стоящие при нечетных производных, если структура композиционного материала ортотропна. Для исследования параметров используется традиционный способ построения общего интеграла в виде разложения его в ряды по системе тригонометрических функций. Оценка прочности слоев производится на основании критерия Гольденבלата-Копнова для однонаправленного слоя КМ.

По разработанному пакету программ на языке FORTRAN был проведен параметрический анализ композитных углепластиковых панелей, находящихся под действием равномерно распределенной нагрузки $q(x,y)$ и температурного поля. Приведен анализ влияния на формостабильность панелей технологических погрешностей: разориентация слоев при укладке, изменение объемного содержания компонентов КМ по толщине, последовательность укладки слоев КМ. Проанализировано влияние технологического натяжения на формоизменение слоистых композитных панелей.

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ И ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ МНОГОСЛОЙНЫХ ПАНЕЛЕЙ ИЗ НЕСИММЕТРИЧНЫХ СЛОИСТЫХ КОМПОЗИТОВ С УЧЕТОМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ

Биткина О.В.

*Филиал ФГБОУ ВПО Самарский Государственный технический университет,
г. Сызрань, Россия*

Рассматриваются вопросы формоизменения и уровень образующихся остаточных температурных технологических напряжений, возникающих при охлаждении многослойных композитных панелей, изготовленных из высокомодульных и высокопрочных композиционных материалов (КМ) [1]. Композитные панели обладают анизотропией вследствие несимметрии свойств структуры пакета КМ по толщине, обусловленной погрешностями технологического процесса – наличием углов разориентации в слоях, изменением объемного содержания компонент в слое. Учитывается предварительное натяжение волокон.

Решение связанных плоской задачи и задачи изгиба осуществляется в рамках анизотропной модели путем распространения гипотез технических пластин на все тело анизотропной среды [2]. Оценка прочности слоев производится на основании критерия Гольденблата – Копнова для однонаправленного слоя КМ. По разработанному пакету программ на языке FORTRAN был проведен параметрический анализ и экспериментальные исследования панелей из углепластика КМУ – 4Л для трех укладок с продольно-поперечными слоями ($0^0/90^0$), с косыми ($\pm 45^0$), и с продольно-поперечными и косыми ($0^0/\pm 45^0/90^0$) слоями. Экспериментально получено три вида формоизменения: седлообразная, закрутка («пропеллер») и сочетание седлообразной с закруткой, что подтверждает теоретическое положение о связанности задачи [2]. Получены зависимости влияния углов разориентации в слоях, толщины панели и изменения объемного содержания компонентов в слое композита на величину коробления. Рассмотрены нулевые линии кривизн, соответствующие определенному уровню натяжения волокон и объемному содержанию слоев, при которых величина коробления равна нулю. Для композитных панелей, являющихся размеростабильными элементами космических конструкций, были определены и назначены пределы технологических погрешностей при изготовлении. Приведенные численные примеры дают хорошее согласие с экспериментальными данными.

Литература:

1. Молодцов Г.А. Остаточные напряжения в слоистых анизотропных пластинках // Механика композиционных материалов. – 1979. – Вып.4. – С.730-733.
2. Образцов И.Ф., Васильев В.В., Бунаков В.А. Оптимальное армирование оболочек вращения из композиционных материалов. – М.: Машиностроение, 1977. – 144 с.

АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МНОГОСЛОЙНОЙ ПОЛИМЕРНОЙ ТРУБЫ С УЧЕТОМ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

Бочкарева С.А.¹, Люкшин Б.А.¹, Реутов Ю.А.²

¹*ФГБУН Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск, Россия*

²*Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия*

Показана перспективность применения многослойных полимерных труб при строительстве трубопроводов различного назначения, в том числе для предприятий нефтехимической и нефтегазовой промышленности. Актуальность задачи оценки напряженно-деформированного состояния (НДС) трубопроводов из полимерных материалов численными методами следует из того, что распространенные аналитические подходы (в частности, решение задачи Ламе) к анализу многослойных труб со сложной реологией материалов слоев с учетом температурных воздействий неприменимы.

Связанная задача термоупругости разбивается на две. Первая из них – расчеты распределения температуры по толщине стенки трехслойной трубы при заданных на внутренней и внешней стенках значениях температуры (задача Дирихле). Вторая задача заключается в определении параметров НДС трубы при действии внутреннего давления с учетом полученного распределения температуры. Численная реализация задач о распределении температуры и определения параметров НДС трубы проводится методом конечных элементов (МКЭ). Произведен расчет НДС трехслойной армированной полимерной трубы, испытывающей напряжения, вызванные температурным изменением и действием внутреннего давления. При решении учитывается распределение температуры по толщине трубы в виде зависимости свойств полимерных композитных слоев от степени нагрева.

Приведено описание разработанного алгоритма численной реализации задачи. Для разбиения расчетной области используются треугольные конечные элементы с шестью компонентами узловых перемещений. Предполагается, что на границах раздела слоев адгезия идеальна. Проверка программы осуществлялась сравнением результатов, полученных при расчете НДС однослойной полиэтиленовой трубы методом конечных элементов, с известными аналитическими решениями задачи Ламе. Результаты численного и аналитического решений показали достаточно хорошее совпадение в пределах 3%-5% по напряжениям и 1-3 % по перемещениям.

Получены распределения эквивалентных напряжений и перемещений по толщине трубы. Распределение эквивалентных напряжений по толщине стенки многослойной армированной полимерной трубы показывает, что наибольшие значения напряжений имеет средний слой из армирующей ленты. Он воспринимает большую часть нагрузки и таким образом полностью выполняет задачу упрочнения трубы.

Предложенный метод оценки деформационно-прочностных свойств многослойных полимерных труб может использоваться при доработке нормативной документации по проектированию трубопроводных систем из полимерных материалов с учетом современных требований, проверке прочности и устойчивости трубопроводов для различных материалов, уровней давления, воздействии осевых, изгибных нагрузок и других эксплуатационных факторов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И РАСЧЕТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЧНОСТИ КОМЛЯ ЛОПАСТИ НЕСУЩЕГО ВИНТА

Бурцев Б.Н.¹, Тютюнников Н.П.²

¹ОАО «Камов», г. Москва, Россия

²ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва, Россия

Стендовые испытания по разрушению комлевой части композитной лопасти несущего винта вертолета выявили характерные особенности напряженно-деформированного состояния. Построена конечно-элементная модель конструкции. Назначение модели: качественное объяснение экспериментальных результатов, а также обеспечение возможности проработки альтернативных вариантов конструкции без их реального изготовления.

Лопасть выполнена из многослойного композитного материала из листов с различной ориентацией. Поведение композитного материала в модели полагается линейным вплоть до разрушающих нагрузок. В целом расчетная модель комля все-таки является нелинейной в результате учета специфических условий контакта композитного материала лопасти и металлических втулок узлов крепления.

В результате расчетов получены распределения напряжений в листах композитного материала с различной ориентацией. Определены положения концентраторов напряжений. Выявлены наиболее вероятные сценарии разрушения комля.

Соответствие расчетных и экспериментальных результатов позволяют сделать вывод о достаточной адекватности расчетной модели и использовать ее для прогнозирования свойств различных вариантов конструкции при ее изменении. На основании результатов расчетов сформулированы рекомендации по соотношению листов различной ориентации в композитном пакете.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ АГЛОМЕРАЦИИ НАНОЧАСТИЦ ШУНГИТА

Валиев Х.Х., Яновский Ю.Г., Юмашев О.Б., Тютюнников А.А., Беркова М.Д.,
Карнет Ю.Н., Семенов Н.А., Семенов П.Е.

ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва, Россия

В результате комплексных исследований, проведенных в ИПРИМ РАН, была установлена перспективность использования наноразмерного шунгита как эффективного наполнителя эластомеров [1]. С целью дальнейшего увеличения усиливающей способности этого нанонаполнителя в разнообразных композиционных материалах нами предприняты теоретические и экспериментальные исследования процессов агломерации наночастиц шунгита на стадии их приготовления. Процесс агломеризации силикатных частиц (силикатной компоненты шунгита) исследовался методами квантовой химии с целью выявления влияния на него помола в шаровой мельнице в среде различных спиртовых растворителей. Рассчитаны энергии водородной связи при взаимодействии силикатной частицы с соответствующими спиртами. Показана возможность модификации силикатной компоненты шунгита для получения наполнителей эластомеров с улучшенными адгезионными и прочностными свойствами. Построены модели модифицированных силикатных частиц путем замены части поверхностных гидроксидов силикатных частиц алифатическими группами спиртов. Рассчитаны их оптимальные структуры и соответствующие энергии. В экспериментальной части работы исследовался порошкообразный шунгит (ООО НПК «Карбон - Шунгит», Карелия, Россия) как исходный микроразмерный, так наноразмерный, полученный дополнительной физико-химической обработкой в среде различных спиртов на планетарной шаровой мельнице РМ -100 (Retsch, Германия).

Исследование структуры поверхности полученных микро и наночастиц шунгита проводилось с помощью атомно-силового микроскопа (АСМ) easyScan (Nanosurf, Швейцария). Защита АСМ от внешних возбуждений обеспечивалась с помощью динамического антивибрационного столика TS-150 (Fabrik am Weiher, Швейцария). Структура этих частиц изучалась также с помощью бесконтактного сканирующего оптического интерференционного микроскопа New View 5022 (ZYGO Inc., США). Обработка АСМ и оптических изображений осуществлялась с использованием современной вычислительной программы SPIP™ (Image Metrology, Denmark). В качестве подложки для высаживания микро и наночастиц шунгита использовался высокоориентированный пиролитический графит ВОПГ (ZYH GRHS/1,2) производства NT-MDT (г. Зеленоград, Россия). Отобранная микропипеткой капля суспензии наночастиц шунгита в соответствующих растворителях, наносилась на подготовленную поверхность ВОПГ, высушивалась на воздухе до полного удаления растворителя и применялась для исследований в АСМ и в ZYGO.

Изучены распределения наночастиц шунгита по размерам и фрактальные размерности агрегатов, образующихся при высаживании на ВОПГ из различных растворителей. Проведены дополнительные исследования частиц и агрегатов шунгита в различных суспензиях на аналитической дисковой центрифуге GPS Disk Centrifuge DC 24000 (CPS Instruments Inc, США). Полученные результаты коррелируют с данными АСМ и ZYGO. Обсуждается связь экспериментальных данных с результатами теоретических квантово – химических расчетов. Выводы работы важны для дальнейшего улучшения прочностных свойств наноструктурированных шунгитом композитных материалов с конечной целью практического применения в промышленности.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант №11-01-00932).

Литература:

1. Yanovsky Yu.G., Valiev H.H., Kornev Yu.V., Karnet Yu.N., Boiko O.V., Kosichkina K.P., Yumashev O.B. The role of the scale factor in estimation of the mechanical properties of composite materials with nanofillers // Int. Journal of Nanomechanics, Science and Technology. – 2010. – Vol.1. – Iss.3. – P.187-210.

СТРУКТУРНО-МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОПРОЧНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА

Воропаев В.В.

*УО "Гродненский государственный университет им. Янки Купалы", г. Гродно,
Беларусь*

При наличии достаточно широкой номенклатуры машиностроительных материалов на основе политетрафторэтилена особое место занимают составы, в которых в качестве многофункционального модификатора использованы углеродсодержащие компоненты, прежде всего, углеродные волокна. Однако при выраженных достоинствах материалов типа Флубон, Флувис, Суперфлувис по сравнению с аналогами, содержащими в качестве функциональных модификаторов дискретные частицы минералов (цеолитов, глины), углеродсодержащих частиц (УДАГ, технического углерода, фуллеренов, кокса), дисперсных фрагментов волокон (стеклянных, базальтовых, оксалоновых), не в полной мере реализованы потенциальные возможности, обусловленные составом, структурой и характеристиками как политетрафторэтилена, так и высокопрочного модификатора – углеродного волокна. Не устранен структурный парадокс, проявляющийся в снижении параметров деформационно-прочностных и триботехнических характеристик при увеличении доли УВ в композиционном материале.

Очевидным является существенный вклад морфологического фактора частиц политетрафторэтилена и модификатора в параметры характеристик композиций, полученных на их основе при традиционной технологии фторкомпозитов, основанной на последовательных стадиях смешивания компонентов, холодного прессования заготовок и их спекания (монокристаллизации), так как в этом случае существенно влияние межчастичного трения на формирование дефектов структуры композита. Различия в морфологии поверхностного слоя модифицирующих частиц предопределяет отличие в кинетике формирования граничного слоя на стадии холодного прессования заготовок. Поэтому даже при относительно высоких значениях давления прессования не проявляется в полной мере эффект хладотекучести матричных частиц политетрафторэтилена, который определяет кинетику заполнения микронеровностей поверхностного слоя частиц наполнителя и образования структуры граничного слоя с минимальным количеством дефектов.

Следовательно, совершенствование технологии, обеспечивающей получение высокопрочных композиционных материалов на основе фторопласта, наполненного дискретными углеродными волокнами, должно основываться на следующих принципах:

- 1) сближение габитуса частиц модификатора и матрицы для увеличения гомогенности композита;
- 2) процесс смешения компонентов композиционного материала должен быть направлен на разрушение исходных кластерных структур модификатора во избежание образования локальных областей с их повышенным содержанием;
- 3) условия образования адгезионной связи между матрицей и фрагментами армирующего волокна должны быть направлены на снижение вязкостных характеристик матричного полимера;
- 4) условия термообработки заготовок должны учитывать различия в теплофизических характеристиках политетрафторэтилена и углеродного волокна;
- 5) в технологии производства заготовок из композиционного материала на основе

политетрафторэтилена должна быть предусмотрена операция, позволяющая уменьшить их дефектность после термообработки.

Работа выполнена при поддержке БРФФИ, грант № T12M-152.

РАСЧЕТ МИКРОАКТЮАТОРА ДИСКРЕТНОГО ДЕЙСТВИЯ НА ОСНОВЕ КОМПОЗИЦИИ КРЕМНИЯ-ОКСИДА КРЕМНИЯ

Гаврюшин С.С., Подкопаева А.С.

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

В настоящее время требуется создание новой элементной базы для приборов нового поколения, микроэлектромеханических систем (МЭМС) и микрооптоэлектромеханических систем (МОЭМС). Актуальной становится разработка элементов из кремния, а также элементов, реализующих дискретную характеристику (со скачками и перескоками). Примером такого элемента может служить термобиметаллический микроактюатор. Деформация двухслойного микроактюатора из кремния и оксида кремния обусловлена разницей температурных коэффициентов линейного расширения слоев.

Предлагаемая методика расчета и проектирования элементов управляемой упругой деформации опирается на идею мультипараметрического подхода при математическом моделировании на ЭВМ процессов нелинейного деформирования. При этом используется стратегия последовательного решения однопараметрических нелинейных задач, принадлежащих многопараметрическому семейству, в которое погружена анализируемая задача. Численный алгоритм использует метод продолжения решения по параметру в сочетании с приемом *смены подпространства управляющих параметров*, предложенным Гаврюшиным С.С. [1-4].

Перспективность подхода иллюстрируется конкретными примерами анализа и синтеза новых типов механических конструкций и устройств.

Литература:

1. Гаврюшин С.С. Численное моделирование и анализ процессов нелинейного деформирования гибких оболочек // Механика твердого тела. – 1994. – №1. – С.109-119.
2. Гаврюшин С.С. Численное моделирование больших прогибов осесимметричного биметаллического купола при термосиловом нагружении / Труды МГТУ №566, «Математическое моделирование сложных технических систем». – Изд-во МГТУ, 1995. – С.49-69.
3. Гаврюшин С.С. Разработка методов расчета и проектирования упругих оболочечных конструкций приборных устройств: Дис. на соиск. учен. степ. д.т.н. – Москва, 1994. – 302 с.
4. Гаврюшин С.С. Алгоритмы исследования больших прогибов гибких оболочек методами продолжения и их численная реализация / Труды XVI Межд. конф. по теории оболочек и пластин. – Н.-Новгород, 1993. – С.80-89.
5. Пономарев С.Д., Андреева Л.Е. Расчет упругих элементов машин и приборов. – М.: Машиностроение, 1980. – 327с.
6. Андреева Л.Е. Упругие элементы приборов. – М.: Машиностроение, 1981. – 392 с.
7. Феодосьев В.И. Осесимметричная эластика сферической оболочки // Прикл. математика и механика. – 1969. – Т.33. – №2. – С.280-286.
8. Феодосьев В.И. К расчету хлопающей мембраны // Прикл. математика и механика. – 1946. – Т.10. – №2. – С.295-306.
9. Бидерман В.Л. Механика тонкостенных конструкций. – М.: Машиностроение, 1977. – 488 с.

О СТАТИСТИЧЕСКОЙ ОЦЕНКЕ СТЕПЕНИ ЛОКАЛИЗАЦИИ ПОВРЕЖДЕНИЙ В МНОГОЭЛЕМЕНТНОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЕЁ НАГРУЖЕНИЯ ДО РАЗРУШЕНИЯ

Гольдштейн Р.В.¹, Онищенко Д.Д.²

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

²*ООО «Газпром добыча шельф», г. Москва, Россия*

При анализе проблем прочности многоэлементных систем различной природы (в частности, гетерогенных конструкций и композитных материалов) со случайными значениями прочности элементов встаёт важный вопрос: каким образом осуществлять моделирование передачи нагрузки от разрушенного элемента на работоспособные в рамках квазистатической постановки задачи о нагружении. В настоящей работе описан новый подход к этому вопросу. Предлагается выделить несколько ключевых типов многоэлементных систем, различающихся правилом перераспределения нагрузок при разрушении отдельных элементов. Неформальной характеристикой каждого из типов является степень локализации воздействия от разрушения одного элемента. В некотором смысле полярными ситуациями можно назвать, с одной стороны, классический пучок Даниэлса [1], где нагрузка на разрушенный элемент равномерно переносится на все работоспособные, и бинарное иерархическое дерево [2], где соседний с разрушенным элемент принимает на себя всю дополнительную нагрузку. Имеется также ряд «промежуточных» моделей [3].

Для каждого из указанных типов моделей проведён аналитический и эмпирический анализ статистики пакетов, т.е. актов одновременного разрушения нескольких элементов системы при неизменном значении нагрузки. Последовательности пакетов, сопровождающих разрушение, удобны с точки зрения их фиксации по ходу развития процесса; кроме того, статистические свойства этих последовательностей сильно различаются в зависимости от типа системы. Некоторые из таких свойств хорошо известны [4], другие получены авторами впервые. При наличии этих результатов появляется возможность применять следующую методику: для конкретной системы с неизвестным законом перераспределения нагрузки статистически оценивать достоверность гипотезы о её принадлежности к тому или иному из перечисленных типов. На основании этого можно делать выводы о внутреннем логическом и геометрическом устройстве систем, аналогичных данной, и оценивать их прочность.

Среди возможных направлений дальнейшей деятельности можно указать учёт соображений подобия при использовании описанной методики для уникальных иерархических систем, когда становятся неприменимы разрушающие методы анализа прочности.

Литература:

1. Daniels H.E. // Proc. Roy. Soc. London. A. – 1945. – Vol.183. – P.405.
2. Newman W.I., Gabrielov A.M. // Int. J. Fract. – 1991. – Vol.50. – N1. – P.1-14.
3. Hemmer P.C., Hansen A., Pradhan S. // Lect. Notes Phys. – 2007. – Vol.705. – P.27-55.
4. Kloster M., Hansen A., Hemmer P.C. // Phys. Rev. E. – 1997. – Vol.56. – P.2615.

О РЕЗУЛЬТАТАХ РЕШЕНИЯ КРАЕВЫХ ЗАДАЧ АНИЗОТРОПНОЙ ВЯЗКОУПРУГОСТИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ РАЗЛИЧНЫХ УПРОЩАЮЩИХ ГИПОТЕЗ

Горохов А.Ю., Труфанов Н.А., Чеклецова Л.В.

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
г. Пермь, Россия*

Рассматриваются постановки квазистатических краевых задач линейной вязкоупругости анизотропных материалов. Без упрощающих гипотез о характере связи между вязкоупругими характеристиками материала в постановке задачи, в общем случае, содержится несколько независимых вязкоупругих операторов (многооператорная задача). Такая ситуация является характерной при рассмотрении задач деформирования композиционных материалов и конструкций из них, содержащих как различные по свойствам компоненты (волокна, связующие), так и возможно различные по свойствам материалы в составе одной конструкции (органо-, стеклопластики, эластомеры, полиэтилен, и т.д.).

В данной работе обсуждаются подходы и даны результаты решения многооператорных задач, иллюстрирующих закономерности эволюции напряженного состояния в вязкоупругих композиционных конструкциях. На примере задачи о растяжении постоянными усилиями бесконечной ортогонально армированной вязкоупругой пластинки с круглым включением (абсолютно жестким, упругим и случай отверстия) произведён сравнительный анализ решений многооператорной задачи различными методами, которые широко применяются и используют введение упрощающих гипотез о характере связи между вязкоупругими характеристиками материала. За основу для сравнения принято решение, полученное численным методом пошагового интегрирования на последовательности сгущающихся сеток [1].

Рассмотрены широко распространенные варианты упрощения многооператорных задач: 1) гипотеза, что вязкоупругие свойства композитов проявляются лишь при сдвиге, сводящая задачу к однооператорной; 2) предположение, что все вязкоупругие характеристики материала возможно описать на основе одного ядра; 3) предположение, что все вязкоупругие операторы материала являются квазиконстантными [1]. Для решения краевых задач с использованием данных гипотез применены, соответственно, вариант метода аппроксимаций, вариант метода канонических операторов и метод квазиконстантных операторов. Произведён анализ практической сходимости всех использованных численных алгоритмов. Исследовано изменение во времени компонент тензора напряжений на контуре включения для пластинок из стеклопластика, углепластика и органопластика.

Приводятся примеры качественно и количественно неверного описания закономерностей эволюции напряжений при использовании первых двух упрощающих предположений. Даны оценки вычислительных затрат для получения решения методом пошагового интегрирования и метода квазиконстантных операторов, применение которых приводит к хорошему количественному соответствию результатов. На примере расчета эволюции напряжений в болтовом соединении двух пластин иллюстрируется явление перераспределения напряжений в вязкоупругих композиционных конструкциях.

Литература:

1. Адамов А.А. и др. Методы прикладной вязкоупругости – Екатеринбург: УрО РАН, 2003. – 411 с.

ПОВЕДЕНИЕ ФТОРОПЛАСТОВОГО ВКЛЮЧЕНИЯ В ПОВЕРХНОСТИ ТРЕНИЯ УГЛЕПЛАСТИКА

Горячева И.Г. Шпенев А.Г.

ФГБУН Институт проблем механики РАН им. А.Ю. Ишлинского, г. Москва, Россия

Композиты на основе пластиковой матрицы и углеродного волокна являются перспективными материалами для изготовления подшипников и других трибосопряжений, работающих в режиме сухого трения или с водяной смазкой. В первом случае для компенсации повышенного износа и коэффициента трения может применяться технология модификации поверхности углепластика вставками фторопласта. Определение оптимальных размеров и расположения вставок является серьёзной проблемой при конструировании узлов с использованием такой технологии. С целью решения этой проблемы в данной работе поставлена и решена износоконтактная задача о цилиндрическом изотропном включении в поверхности анизотропного полупространства. Проведено сравнение полученной теоретической модели с результатами испытаний проводившихся в ИПМех РАН на материалах ЦНИИ КМ «Прометей». Определена зависимость оптимальных размеров вставки от параметров контакта и свойств материалов.

РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ, КОНСТРУКЦИЙ ДЛЯ СИСТЕМ ТРУБОПРОВОДНОГО ТРАНСПОРТА В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ

Гусев Е.Л.

ФГБУН Институт проблем нефти и газа СО РАН, г. Якутск, Россия

Методами математического и компьютерного моделирования проведено исследование прямых и обратных задач трубопроводного транспорта при воздействии экстремальных факторов внешней среды. В последние десятилетия значительное внимание уделяется проблемам повышения эффективности, интенсификации систем трубопроводного транспорта, что непосредственно связано с повышением их прочности, надежности, ресурса. Современные подходы к решению данных проблем связаны с развитием методов математического и компьютерного моделирования на основе адекватных моделей функционирования трубопроводного транспорта при воздействии экстремальных факторов внешней среды, и принятия на этой основе оптимальных решений. Одним из перспективных направлений повышения эффективности функционирования трубопроводных систем в условиях большой их протяженности, многообразия климатических и геофизических условий эксплуатации, является применение при их проектировании и эксплуатации полимерных и композиционных материалов. В последние десятилетия, в связи с разработкой новых композиционных материалов с широким разнообразием физико-механических и химических свойств возникает проблема разработки физической и геометрической структуры трубопроводной системы, обеспечивающей наиболее эффективный режим транспорта в условиях экстремальных факторов внешней среды. В рамках сформулированной вариационной постановки, к которой могут быть сведены задачи оптимального проектирования физической и геометрической структуры трубопроводных систем при воздействии экстремальных факторов внешней среды, проведено численное и компьютерное моделирование процессов функционирования трубопроводного транспорта. Исследуемая вариационная постановка связана с проблемой направленного выбора физической и геометрической структуры, как самой трубопроводной системы, так и физической и геометрической структуры внешних и внутренних композиционных покрытий, обеспечивающей наиболее эффективный режим функционирования трубопроводной системы в условиях неблагоприятных сочетаний экстремальных факторов внешней среды. Вводимая система критериев качества $R_0, R_1, \dots, R_k$ формулирует комплекс требований, обеспечивающих наиболее эффективный режим функционирования трубопроводной системы в условиях экстремальных факторов внешней среды.

Разработанные вариационные постановки многокритериальных задач оптимизации трубопроводного транспорта, методы их решения позволяют осуществлять эффективное управление режимами функционирования трубопроводного транспорта на основе оптимального выбора физической и геометрической структуры трубопроводных систем. Это открывает новые потенциальные возможности достижения наиболее эффективных режимов транспорта на стадии функционирования трубопроводной системы в условиях действия экстремальных факторов внешней среды.

Литература:

1. Гусев Е.Л. Качественные закономерности взаимосвязи параметров в оптимальных структурах в задачах оптимального синтеза неоднородных структур из дискретного набора материалов при волновых воздействиях // Доклады РАН. – 1996. – Т.346. – №3. – С.324-326.
2. Гусев Е.Л. Качественные закономерности структуры оптимальных решений в задачах оптимального синтеза многослойных конструкций при воздействии упругих волн // Доклады РАН. – 1998. – Т.368. – №1. – С.53-56.
3. Гусев Е.Л. Методы численного расчета и оптимального проектирования систем трубопроводного транспорта при воздействии экстремальных факторов внешней среды / Сб. статей XI Международной научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные исследования, разработка и применение высоких технологий в промышленности». – Санкт-Петербург: ПТИ, 2011. – Т.1. – С.334-338.
4. Термогидродинамика систем транспорта. – М.: Наука, 1988.

УПРУГО-ПОРИСТОЕ ПОЛУПРОСТРАНСТВО ПОД ДЕЙСТВИЕМ НЕСТАЦИОНАРНОЙ НОРМАЛЬНОЙ СИЛЫ

Данг Куанг Занг, Тарлаковский Д.В.

ФГБУ ВПО Московский авиационный институт (НИИУ), г. Москва, Россия

Предполагается, что свойства материала полупространства $z \geq 0$ описываются моделью Био. Соответствующая начально-краевая задача включает в себя записанные в цилиндрической системе координат r, z, θ ($-\pi < \theta \leq \pi$) гиперболические уравнения относительно трех потенциалов перемещений [1], выражения касательных u, U и нормальных w, W перемещений скелета и жидкости через потенциалы, связь физических компонент тензора напряжений скелета $\sigma_{\alpha\beta}$ ($\alpha, \beta = r, z, \theta$) и давления σ в жидкости с перемещениями, нулевые начальные условия, условия ограниченности компонент напряженно-деформированного состояния, а также краевые условия на граничной плоскости

$$\sigma_{rz}|_{z=0} = 0, \quad \sigma_{zz}|_{z=0} = (1 - \beta_0)P(\tau)\delta(x, y), \quad \sigma|_{z=0} = \beta_0 P(\tau)\delta(x, y), \quad (1)$$

где β_0 - пористость среды; τ время; $P(\tau)$ - нормальная сила; $Oxyz$ прямоугольная декартова система координат; $\delta(x, y)$ - дельта-функция Дирака.

Перемещения и напряжения как решения указанной начально-краевой задачи с учетом осевой симметрии задачи и свойств дельта-функции записываются следующим образом (звездочка означает свертку по времени; приводится равенство только для нормального перемещения)

$$w(r, z, \tau) = P(\tau) * \Gamma_{wP}(r, z, \tau), \quad r = \sqrt{x^2 + y^2}.$$

Здесь $\Gamma_{wP}(r, z, \tau)$ - поверхностная функция влияния, т.е. нормальное перемещение, являющееся решением начально-краевой задачи, в которой граничные условия (1) заменяются равенствами

$$\sigma_{rz}|_{z=0} = 0, \quad \sigma_{zz}|_{z=0} = (1 - \beta_0)\delta(x, y, \tau), \quad \sigma|_{z=0} = \beta_0\delta(x, y, \tau). \quad (2)$$

Для определения функций влияния используются преобразования Лапласа по времени и Ханкеля по r . Их оригиналы находятся последовательным обращением преобразований аналогично тому, как это сделано в [4].

Показано, что при $Q \rightarrow 0$, $\rho_{12} \rightarrow 0$ (Q и ρ_{12} - величина сцепления и коэффициент динамической связи между твердыми и жидкими компонентами) построенное решение переходит в классическое решение задачи Лэмба для упругого полупространства.

Приводятся примеры расчетов функций влияния и задач для различных законов изменения по времени нормальной силы.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (код проекта 12-08-00934).

Литература:

1. Данг Занг Куанг, Тарлаковский Д.В. Осесимметричные нестационарные колебания упруго-пористого полупространства под действием поверхностного возмущения / Труды IX Всероссийской научной конференции «Нелинейные колебания механических систем». – Нижний Новгород: Издательский дом «Наш дом», 2012. – С.314-319.
2. Горшков А.Г., Тарлаковский Д.В. Динамические контактные задачи с подвижными границами. – М.: Физматлит, 1995. – 352 с.

КОЭФФИЦИЕНТЫ КОНЦЕНТРАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ В СЛОЕ ТКАНОГО КОМПОЗИТА ПОЛОТНЯНОГО ПЛЕТЕНИЯ

Дедков Д.В., Зайцев А.В., Ташкинов А.А.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Россия

Создание элементов конструкций из композитов, армирующий каркас которых состоит из слоев ткани полотняного плетения, является одним из приоритетных направлений развития техники и технологий. Преимуществами этих материалов является высокая теплостойкость, малая плотность и стойкость к тепловому удару. Кроме того, эти материалы обладают высокими прочностными характеристиками при обычной и повышенной температурах.

При производстве тканых композитов неизбежны технологические дефекты, снижающие эксплуатационные свойства изделий. К числу типичных дефектов относятся возникающие при прошивке слоев разрывы нитей основы или утка, а также внутренние поры, которые возникают в областях, расположенных вблизи участков волокон с наибольшей кривизной, и обнаруживаются только на этапе выходного ультразвукового контроля изделия. Эти области труднодоступны для проникновения полимерного связующего даже при условии вакуумирования или пропитки под давлением). Кроме того, гарантированное обеспечение наличия в этих участках поликристаллической матрицы (углеродной, осаждаемой из газовой фазы или получаемой при карбонизации полимеров), матрицы на основе терморасширенного графита или керамики также затруднено.

Разработана двухуровневая модель тканого композита с искривленными волокнами и поликристаллической матрицей, которая на основе численного решения краевых задач о произвольном нагружении слоя материала в своей плоскости позволила определить коэффициенты концентрации напряжений, вызванные наличием локальных технологических несовершенств: внутренняя закрытая пора, отсутствие нити утка, разрыв нити утка, одновременный разрыв нитей основы и утка (без и с дополнительной пропиткой и карбонизацией связующего в области дефекта). Построение геометрической модели слоя тканого композита осуществлялось при помощи платформы SALOME, которая представляет собой набор пре- и постпроцессинга, объединяет различные модули, применяемые в приложениях: от численного моделирования в CAEP до параллельных вычислений, используется как база для проекта NURESIM (European Platform for NUClear REactor SIMulations), предназначенного для полномасштабного моделирования реакторов. Исследовано совместное влияние условий контакта искривленных волокон ткани полотняного плетения (отсутствие прямого контакта из-за гарантированного слоя матрицы или контакт с кулоновским трением) и наличия локальных технологических дефектов на характер распределения напряжений. Полученные численные решения краевых задач методом конечных элементов позволили установить, что наибольший вклад в коэффициенты концентрации вносят касательные составляющая тензора напряжений. Поэтому для повышения способности материалом сопротивляться внешнему силовому воздействию рекомендовано предусмотреть в технологическом процессе операции, обеспечивающие проникновение связующего в полости технологических локальных дефектов, а также дополнительную пропитку связующим, доуплотнение и карбонизацию, досаждение поликристаллической матрицы из газовой фазы в случае, если в результате ультразвукового контроля готового изделия обнаруживается внутренняя пористость. Как показали результаты вычислительных экспериментов,

указанные операции позволяют снизить в три–пять раз коэффициенты концентрации напряжений даже если не удастся исключить локальный контакт искривленных нитей ткани. В противном случае возможно развитие дефектов и последующее лавинообразное локализованное разрушение материала матрицы по механизмам сдвигов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ–Урал №11–01–96033).

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТРЕЩИНЫ В МИКРОСТРУКТУРЕ ТВЕРДОГО СПЛАВА С ПОРОЙ

Дворник М.И., Михайленко Е.А.

*ФГБУН Институт материаловедения Хабаровского научного центра ДВО РАН,
г. Хабаровск, Россия*

Изделия из WC-Co твердых сплавов используются в качестве режущего инструмента, благодаря сочетанию твердости и прочности. На прочность твердых сплавов, которая является важнейшей характеристикой, решающее влияние оказывает размер и конфигурация критического дефекта. Широкий разброс значений прочности сплавов определенного состава и структуры объясняется влиянием размера и конфигурации критического дефекта [1]. Влияние критического дефекта на прочность сплавов изучено недостаточно, актуальной является задача теоретического изучения процесса продвижения трещины в материале.

Целью работы является исследование влияния параметров микроструктуры на прочность твердого сплава посредством моделирования процесса продвижения трещины через модельную микроструктуру с порой. Энергетический критерий продвижения трещины был применен для карбидных зерен ($G_1^{WC} \geq G_{1C}^{WC}$) и кобальтовой фазы ($G_1^{Co} \geq G_{1C}^{Co}$). Скорости высвобождения энергии G_1^{Co} и G_1^{WC} определяли на основе распределения напряжений и смещений, используя результаты моделирования. На основе литературных экспериментальных данных были определены критические скорости высвобождения энергии WC (G_{1C}^{WC}) и Co (G_{1C}^{Co}).

Моделирование методом конечных элементов процесса распространения трещины от поры показало, что:

Скорости высвобождения энергии при продвижении трещины через WC и Co фазу твердого сплава значительно отклоняются (до 2 раз) от линейной зависимости, полученной для модели разрушения однородного материала.

Для всех изученных микроструктур напряжения, необходимые для прохождения трещины через контакт WC-WC, ниже, чем напряжения, необходимые для продвижения трещины через прослойку Co, максимальные напряжения в Co соответствуют прочности моделируемого сплава.

Прочность твердых сплавов увеличивается при одновременном уменьшении размеров исходной поры и диаметра зерна.

Литература:

1. Hisashi Suzuki, Kozi Hayashi The Strength of WC-Co Cemented Carbide in Relation to Structural Defects // Transactions of the Japan Institute of Metals. – 1975. – Vol.16 – N6. – P.353-360.

ЛОКАЛИЗОВАННЫЕ ВОЛНЫ ДЕФОРМАЦИИ В НЕЛИНЕЙНО-УПРУГОЙ ЗЕРНИСТОЙ СРЕДЕ

Ерофеев В.И., Павлов И.С.

Нижегородский филиал Института машиноведения РАН, г. Нижний Новгород, Россия

Разработана нелинейная математическая модель двумерной зернистой среды, представляющей собой квадратную решетку из упруго взаимодействующих круглых частиц, обладающих продольной, поперечной и ротационной степенями свободы. В низкочастотном диапазоне ротационной степенью свободы можно пренебречь, и полученная трехмодовая модель вырождается в двухмодовую. По найденным аналитическим зависимостям коэффициентов нелинейностей обеих моделей от параметров микроструктуры произведены численные оценки этих коэффициентов [1]. Двухмодовая система методом многих масштабов приводится к эволюционному уравнению Кадомцева-Петвиашвили относительно сдвиговой деформации, имеющему решение в виде солитона. Для ряда кристаллов с кубической симметрией определено, является ли солитон устойчивым и какова его полярность [2]. В соответствии с критерием Лайтхилла найдены области модуляционной неустойчивости (самомодуляции) сдвиговой волны деформации при условии наличия в материале статической продольной деформации, а также изучены виды волновых пакетов в случае модуляционной неустойчивости [3]. Приведены результаты численного моделирования неупругого взаимодействия и расщепления солитонов в одномерной зернистой среде

Литература:

1. Павлов И.С. Об оценке коэффициентов нелинейностей зернистой среды методом структурного моделирования // Вестник ННГУ: Математическое моделирование и оптимальное управление. – 2012. – №6.
2. Ерофеев В.И., Павлов И.С. Локализованные волны деформации в двумерной кристаллической среде с неплотной упаковкой частиц // Проблемы прочности и пластичности: Межвуз. сборник. – Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского госуниверситета, 2012. – Вып.74.
3. Ерофеев В.И., Кажаяев В.В., Павлов И.С. Самомодуляция сдвиговых волн деформации, распространяющихся в одномерной зернистой среде // Нелинейный мир. – 2012. – Т.10. – №9.

ПРИЛОЖЕНИЕ ТЕОРИИ ОБОЛОЧЕК N-ГО ПОРЯДКА К ЗАДАЧАМ УСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМ С ФАЗОВО-СТРУКТУРНЫМИ ПЕРЕХОДАМИ

Жаворонок С.И.

ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва, Россия

Исследуется потеря устойчивости прямоугольной пластины-полосы из сплава с эффектом памяти формы при равномерном одноосном сжатии в режиме мартенситной неупругости. Экспериментальное определение критических сил потери устойчивости плоской формы равновесия проводится на разрывной машине GOTESH AI -7000 в режиме жесткого (кинематического) нагружения при постоянной скорости сближения активного и пассивного захватов. Образцы выполнены из пластины толщиной 1,3 мм и шириной 10 мм при различных длинах рабочего участка. Краевые условия соответствуют жесткому защемлению пластины в захватах машины. Нагружение со скоростью порядка 0,1 мм/мин позволяет избежать интенсивного выделения латентного тепла, так что процесс нагружения может приближенно считаться изотермическим. При кинематическом нагружении возрастание прогиба пластины в процессе закритического деформирования является монотонным. Перемена формы равновесного состояния «хлопком», характерная для силового нагружения и приводящая динамическому процессу с интенсивным выделением латентного тепла, исключается, тем самым обеспечивается изотермичность.

В процессе кинематического нагружения фиксируется диаграмма деформирования в координатах «время нагружения – прогиб» с двумя участками, обладающими линейной асимптотикой. Точка пересечения асимптот рассматривается как точка перемены формы равновесного состояния с плоской на искривленную. Нагрузка, соответствующая точке бифуркации, определяется по показаниям динамометра разрывной машины. По экспериментальным данным, полученным для различных длин пластины, построена зависимость критической нагрузки от длины пластины.

Теоретическое решение задачи построено на основе приближенной трехмерной теории пластин N-го порядка, приближенно учитывающей трехмерный характер напряженного состояния в пластине. Построены линеаризованные уравнения устойчивости пластины для СПФ, находящегося в состоянии мартенситной неупругости. Определяющие уравнения записаны в форме, предложенной А. А. Мовчаном и учитывающие существование пороговых напряжений. На основе прямой записи определяющих соотношений построены уравнения устойчивости второго порядка; на основе прямой формы определяющих соотношений получены системы уравнений первого порядка. Используются упрощающие постановку задачи об устойчивости гипотезы фиксированной нагрузки и повсеместного дополнительного структурного перехода. Получены решения задачи в низших приближениях теории пластин, получены кривые зависимости критической нагрузки от длины сжимаемой пластины и проведен сравнительный анализ теоретических и экспериментальных результатов. Исследовано поведение пластин малой длины и соответствие результатов, полученных на основе теорий различного порядка, экспериментальным данным.

МЕХАНИЗМ УПРУГО-ПЛАСТИЧЕСКОГО ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ПОЛИМЕРНЫХ ПРЕССОВОК ИЗ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Жилин С.Г., Сапченко И.Г., Комаров О.Н.

Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН, г. Комсомольск-на-Амуре, Россия

Для получения точных отливок в промышленности используют метод литья по выплавляемым моделям (ЛВМ) [1]. Повышение размерно-геометрической точности (РГТ) полимерных выплавляемых моделей (ВМ) возможно запрессовкой порошка модельного материала в полость пресс-формы [2].

Основная задача при получении полимерных прессовок из многокомпонентных порошков заключается в обеспечении равномерности распределения плотности в их объемах. На распределение плотности в таких ВМ влияет фракционный состав компонентов. Наличие упругих сил в материале прессовки, оказывающих влияние на РГТ после снятия усилия прессования, определяет необходимость их релаксации и разработки общих критериев управления качеством прессованных ВМ, получаемых из различных многокомпонентных порошков.

В работе рассматривается механизм упругопластического формирования структур полимерных прессовок из порошковых модельных материалов.

Экспериментально установлен механизм пластического течения материала прессовки, факторы, влияющие на распределение плотностей в структуре последней.

На основании проведенных исследований сформулированы рекомендации для практической реализации процесса получения полимерных ВМ холодным прессованием порошковых модельных материалов, что позволяет повысить РГТ последних и, как следствие, получаемых отливок.

Литература:

1. Литье по выплавляемым моделям / Под. общ. ред. В.А. Озерова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1994. – 448 с.
2. Сапченко И.Г., Жилин С.Г., Комаров О.Н. Усовершенствование технологии получения точных металлоизделий в литье по выплавляемым моделям // Заготовительные производства в машиностроении. – 2009. – №4. – С.9-12.

МЕХАНИКА ПРОЦЕССОВ ЭКСПЛУАТАЦИИ КОЛЕЦ ИЗ ТЕРМОРАСШИРЕННОГО ГРАФИТА И ИХ ПАКЕТОВ В КРАНАХ С УПЛОТНЕНИЕМ ПО ШТОКУ

Зайцев А.В.¹, Исаев О.Ю.², Караваев Д.М.¹, Смирнов Д.В.², Ханов А.М.¹

¹*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Россия*

²*ООО «Силур», г. Пермь, Россия*

Терморасширенный графит (ТРГ) – уникальный наноструктурированный материал, который вне зависимости от условий эксплуатации (повышенные температуры, термоциклирование, время контакта с агрессивными средами) обладает высокой термо-химической стойкостью, низким коэффициентом трения, высокими упругими свойствами. Уплотнительные кольца (УК) из ТРГ надежны, не требуют дополнительной герметизации при эксплуатации, работают при температурах до 560°C и давлениях до 40,0 МПа в кранах с уплотнениями по штоку.

В работе исследовались режимы работы («приработка», квазистационарный с и без износа) изготавливаемых крупносерийными партиями УК из ТРГ, которые используются в кранах с уплотнениями по штоку. Предполагалось, что УК является толстостенным, ограниченным по высоте линейно упругим однородным трансверсально-изотропным цилиндром, зафиксированным в сальниковой камере нажимной втулкой (во всех точках наружной поверхности исключены радиальные, осевые и окружные перемещения). На одной из торцевых поверхностей было задано давление герметизации со стороны нажимной втулки, а на другой - рабочее давление. На внутренней боковой поверхности были заданы перемещения в осевом направлении, что моделировало возвратно-поступательное движение штока в условиях «приработки» в направлении нажимной втулки и в противоположную сторону. Квазистационарный режим работы уплотнения предполагал отсутствие или наличие износа ТРГ, который моделировался заданием на поверхности контакта со штоком законов трения в виде условия пропорциональности радиальных и касательных напряжений или линейного закона изменения внутреннего радиуса цилиндра в зависимости от контактного давления и скорости движения штока. Для описанных выше условий на внутренней боковой поверхности толстостенного цилиндра были получены аналитические решения краевых задач и определены напряжения, деформации и перемещения в поперечных сечениях УК.

Разработанная модель начального режима работы УК позволила получить новые численные решения краевых задач для отдельных колец и их пакетов методом конечных элементов, провести оценку начальной прочности по совокупности критериев с учетом различных механизмов разрушения, исследовать закономерности распределения независимых инвариантов тензора напряжений в точках поперечных сечений УК, входящих в пакет, при различных температурах и давлениях рабочей среды, различной толщине и количестве УК в сальниковой камере, различных режимах возвратно-поступательного (движение в сторону нажимной втулки и в противоположном направлении) и вращательного движения штока, а также различных условиях на поверхностях контакта (трение, идеальное сопряжение или скольжение). Полученные данные о местах расположения областей, в которых начинается разрушение ТРГ по различным механизмам, согласуются с результатами, наблюдаемыми при эксплуатации УК.

Полученное аналитическое решение задачи об износе УК при возвратно-поступательном движении штока позволило подтвердить сохранение всех

эксплуатационных качеств УК до 10000 циклов работы запорной арматуры. При формулировке этого вывода были использованы результаты экспериментального определения трибологических характеристик ТРГ. Определены оптимальные давления герметизации, обоснованы рекомендации по внесению изменений в существующие конструкции пакетов УК, разработаны основы для создания методик уточненного анализа начальной прочности.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ–Урал № 11–01–96033).

ПРОЦЕССЫ НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ И ЛОКАЛИЗОВАННОЕ РАЗРУШЕНИЕ ОДНОНАПРАВЛЕННО АРМИРОВАННЫХ ВОЛОКНИСТЫХ КОМПОЗИТОВ СЛУЧАЙНОЙ СТРУКТУРЫ ПРИ МНОГООСНОМ ПРОПОРЦИОНАЛЬНОМ НАГРУЖЕНИИ

Зайцев А.В., Кислицын А.В., Кокшаров В.С., Соколкин Ю.В.

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь,
Россия*

Многослойные композитные конструкции проектируются таким образом, чтобы основная силовая нагрузка воспринималась волокнами, а связующее перераспределяло напряжения, обеспечивая взаимодействие между армирующими элементами. Каждый монослой находится в условиях сложного напряженно-деформированного состояния под действием осевых и сдвиговых нагрузок в продольных и поперечной плоскостях. Закономерности механического поведения монослоев могут быть определены при многоосных испытаниях образцов из однонаправленно армированных композитов с детальным анализом их микроструктуры на различных стадиях деформирования. Проведение подобных исследований требует уникального экспериментального оборудования и проводится в настоящее время только для наиболее простых схем нагружения. Поэтому разработка математических моделей микро- и макроразрушения однонаправленно армированных волокнистых композитов случайной структуры при комбинированном трехосном квазистатическом нагружении и сдвиге является актуальной задачей.

Разработана нелинейная двухуровневая модель неупругого деформирования и структурного разрушения однонаправленно армированных композитов случайной структуры, учитывающая совместное влияние различных условий нагружения в поперечной плоскости, однородного растяжения (сжатия) в направлении армирования и продольного сдвига, позволяющая описать частичную потерю и восстановление несущей способности элементами структуры при выполнении совокупности критериев разрушения. В представленной модели волокна предполагались линейно упругими, изотропными и неразрушаемыми, а матрица – изотропной, упруго-хрупкой. При численном решении краевых задач для представительных макрообъемов композитов (определены для первоначально неповрежденного материала при наличии идеального контакта на межфазных поверхностях) методом конечных элементов реализована процедура автоматического выбора шага нагружения, которая позволяет зарегистрировать каждый акт изменения деформационных свойств элементами структуры.

Определены масштабы неоднородности полей напряжений и деформаций в неповрежденном композите, отражающие многочастичное взаимодействие в ансамбле волокон и оказывающие решающее влияние на начальный этап образования дефектов. Для различных схем комбинированного трехосного пропорционального нагружения и сдвига определены закономерности эволюции дефектов в матрице, проанализировано влияние закона распределения диаметров волокон и «скрытых» параметров порядка стохастических структур на сценарии развития процесса разрушения. Вместе с тем, было обнаружено, что вид закона распределения (одномодальный симметричный или несимметричный) не влияет на эффективные упругие модули материала. Проанализированы условия регистрации макроразрушения однонаправленно армированного композита, как результата потери устойчивости процесса накопления повреждений. Показано качественное совпадение характера макроразрушения модельных композитов в вычислительных экспериментах с результатами

механического испытания на продольный сдвиг стеклопластика на основе эпоксидной матрицы. Обнаружен не зависящий от типа закона распределения диаметров волокон эффект «порционного» разрушения участков матрицы при гидростатическом сжатии.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ № 11-01-00910).

ТЕОРЕМЫ О СВОЙСТВАХ СЛУЧАЙНЫХ ПОЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ В ВЫСОКОПОРИСТЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЕНАХ И БИОКОМОЗИТАХ

Зайцев А.В., Кокшаров В.С., Фукалов А.А.

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь,
Россия*

Высокопористые материалы и биоккомпозиты (пены, металлические губки, трабекулярная костная ткань), обладают стохастической структурой, проявляющейся в случайности характерных размеров, формы и взаимного расположения пор в объеме. При построении приближенных решений стохастически нелинейных краевых задач и определения статистических характеристик полей напряжений и деформаций, используются различные гипотезы о характере многочастичного взаимодействия в ансамбле пор. В работах [1,2] предложен новый метод аналитического построения условных и безусловных многоточечных моментных функций случайных полей напряжений и деформаций в однонаправленно армированных волокнистых и дисперсно-упрочненных композитов матричного типа, основанный на доказанных теоремах о геометрическом смысле условных вероятностей. Этот метод может быть использован для построения моментных функций случайных полей напряжений и деформаций высокопористых материалов и биоккомпозитов. В рамках полидисперсных моделей для композитов с круглыми в поперечном сечении туннельными и сферическими пора́ми (2D и 3D высокопористые материалы) из решения вспомогательных геометрических задач определены меры пересечений подобластей матрицы, построены зависимости этих мер и их производных от расстояния между центрами, получены соотношения для условных и безусловных моментных функций, сформулирована и доказана следующая теорема об общих свойствах случайных полей напряжений и деформаций.

Теорема 1. Производные условных и безусловных моментных функций второго порядка случайных полей напряжений и деформаций в 2D и 3D высокопористых композитах в точках, соответствующих нулевому значению аргумента, отрицательны, их значения не зависят от направления, в котором ведется построение этих функций, и координационного числа случайной структуры, а величина обратно пропорциональна суммарному периметру (площади) межфазных границ пора - матрица.

Теорема 2. Случайные поля напряжений и деформаций в 2D и 3D высокопористых композитах локально изотропны в приближении «малых расстояний».

Следствиями из этой теоремы являются выводы о том, что если распределенные внутри представительных объемов поры имеют одинаковый радиус, то искомые производные обратно пропорциональны этому радиусу; о существенном влиянии на значения производных фракционного состава, предопределяемого типом закона распределения характерных размеров пустот. Кроме того, эти производные могут рассматриваться в качестве одного из возможных условий для верификации и отбраковки существующих и разрабатываемых моделей, используемых при построении приближенных решений стохастических краевых задач механики для высокопористых металлических пен и биоккомпозитов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ № 11–01–00910).

Литература:

1. *Зайцев А.В., Кислицын А.В., Кокиаров В.С.* Общие закономерности структуры, случайных полей напряжений и деформаций в волокнистых и дисперсно-упрочненных композитах // Вестн. ННГУ им. Н.И. Лобачевского. – 2011. – №4. – Ч.4. – С.1485-1487.
2. *Зайцев А.В., Кокиаров В.С., Соколкин Ю.В.* Производные моментных функций второго порядка случайных полей напряжений и деформаций в однонаправлено армированных и дисперсно-упрочненных композитах / Неравновесные процессы в сплошных средах (НПСС–2009): Мат. Всероссийск. конф. молодых ученых. – Пермь: Изд-во ПГУ, 2009. – С.103-106.

ВЛИЯНИЕ β^- -ОБЛУЧЕНИЯ НА ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА НАНОПОЛНЕННОГО ПОЛИВИНИЛХЛОРИДА И ПОЛИМЕТИЛМЕТАКРИЛАТА

Колупаев Б.Б., Малиновский Е.В., Сидлецкий В.А.

Ровенский государственный гуманитарный университет, г. Ровно, Украина

Исследования изменения механической прочности гетерогенных полимерных систем (ГПС), подверженных действию радиационного облучения, чрезвычайно важны для выяснения их сроков службы как элементов конструкций. Особенно перспективными выступают системы на основе поливинилхлорида (ПВХ) и полиметилметакрилата (ПММА), содержащие в качестве наполнителя нанодисперсные порошки графита, каолина, бентонита. Изучены: ПВХ марки KSR-67, C-6359, C-70 (P-10-Y), Л-5; ПММА – Plexiglas GS Clear OF-00; наполнители ЗАО «Герком», прошедшие последующее УЗ-диспергирование при гидравлическом взрыве; источник β^- -излучения – ${}_{91}\text{Pa}^{234}$ – энергии $W=2,18$ МэВ.

Установлено, что β^- -облучение более интенсивно влияет на величину динамического сдвига ПВХ-систем, чем ПММА-композиций. При содержании наполнителя в диапазоне $3,0 \leq \varphi \leq 20,0$ об.% и облучении материала β^- -частицами энергии $(1 \div 6)$ W в течение $(1 \div 3)$ часов наблюдается область насыщения величины модуля упругости материала. Установлена взаимосвязь между дозой облучения, скоростью дозирования, структурой сетки и эффективной плотностью, микро- и макропористостью, водопоглощением материала. Под действием кавитации, полученной в коллоидном растворе нанонаполнителя, осуществлено заполнение дефектных областей с последующим термоотжигом композита. Показано, что таким образом можно улучшить эксплуатационные механические свойства облученного композиционного материала. При этом нанодисперсный наполнитель способствует рассеиванию энергии, накопленной вследствие динамической нагрузки на образец, что позволяет использовать композиты при ударном нагружении. Отмечен эффект нелинейного увеличения динамических механических характеристик материала в области $0,1$ Гр с последующей линейной их зависимостью в диапазоне поглощенной дозы $(0,3 \div 0,9)$ Гр на частоте 60 Гц.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЭЛАСТОМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ, СОДЕРЖАЩИХ ДОБАВКИ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК, МЕТОДОМ НАНОИНДЕНТИРОВАНИЯ

Корнев Ю.В., Яновский Ю.Г., Бойко О.В., Чиркунова С.В., Гусева М.А.

ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва, Россия

Недавние успехи в области нанотехнологий показали эффективность новых наноразмерных частиц (нанонаполнителей) в усилении полимерных материалов. И как следствие этого, усиленные наночастицами композиты вызвали большой интерес, особенно в связи с тем, что улучшение механических характеристик может быть достигнуто при нетипично низких концентрациях наполнителя.

Основными нанонаполнителями являются слоистые силикаты, терморасширенный графит, полиэдральные олигомерные силсесквиоксаны, одностенные и многостенные углеродные нанотрубки.

Целью работы является исследование методом наноиндентирования влияния малых концентраций многостенных углеродных нанотрубок (до 0,7 масс.ч.) на механические свойства как ненаполненных, так и наполненных минералом шунгит резиновых смесей и вулканизатов на основе бутадиен-стирольного каучука марки СКС-30АРК.

В качестве исходных образцов были выбраны углеродные нанотрубки, синтезированные методом CVD в ИПРИМ РАН с применением катализаторов Fe/Al₂O₃ и Co/Al₂O₃. В результате проведения реакции на данных катализаторах получается порошок чёрного цвета. Его агломераты микрометровых размеров имеют структуру переплетённых пучков многостенных углеродных нанотрубок длиной более 2 мкм со средним наружным диаметром 20 нм.

В первой серии были изготовлены смеси с углеродными нанотрубками (очищенные разными способами), которые вводились в ненаполненные эластомерные матрицы на основе СКС-30АРК в количестве 0,3 масс.ч. на 100,0 масс.ч каучука, и с наноразмерным шунгитовым порошком в таком же количестве, а также ненаполненная смесь.

Во второй серии нанотрубки вводились в количестве 0,1; 0,3; 0,5; 0,7 масс.ч. на 100,0 масс.ч. каучука в матрицу, наполненную 65 масс.ч. тонкодисперсного шунгитового порошка ТШП.

Показано, что при добавлении многостенных углеродных нанотрубок в ненаполненные композиции на основе каучука СКС-30АРК, важную роль при формировании как технологических, так и физико-механических свойств играет химический состав катализатора, на котором были получены углеродные нанотрубки, и метод их очистки на одной из стадий синтеза.

Установлено, что эффекты от добавления многостенных углеродных нанотрубок (до 0,7 м.ч.) в композиции, где в качестве основного наполнителя применяется ТШП существенно меньше, чем при их добавлении в ненаполненные композиции на основе каучука СКС-30 АРК, т.к., видимо, основной наполнитель существенно превосходит по концентрации (65 м.ч.) добавки нанотрубок.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ 11–01–00932а).

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ ВОЛН В НЕЛИНЕЙНЫХ ВЯЗКОУПРУГИХ СТЕРЖНЕВЫХ СИСТЕМАХ

Курбанов Н.Т., Бабаджанова В.Г., Юсифли В.Н.

Сумгаитский Государственный Университет, г. Сумгаит, Азербайджан

В современной технике широко используются конструкции, выполненные из различного рода композиционных материалов. В связи с этим для получения более реальной картины напряженно-деформированного состояния элементов конструкции возникает необходимость проводить исследования в нелинейной постановке задачи при учете вязкоупругих свойств материала.

В данной работе рассматривается задача о распространение нестационарных волн в нелинейных вязкоупругих стержневых системах, состоящих из двух частей: конечной $x \in [0, l]$ и полубесконечной $x \in [l; +\infty)$. При $t < 0$ считаем, что система находится в покое, а в момент времени $t = 0$ воздействие реализуется с торца $x = 0$. Математически задача сводится к решению системы дифференциальных уравнений

$$\frac{\partial \sigma^{(i)}}{\partial x} = \rho^{(i)} \frac{\partial^2 U^{(i)}(x, t)}{\partial t^2} \quad (1)$$

При граничных и контактных условиях

$$\sigma^{(1)}(0, t) = f(t) \quad (2)$$

$$\sigma^{(1)}(l, t) = \sigma^{(2)}(l, t); \quad U^{(1)}(l, t) = U^{(2)}(l, t) \quad (3)$$

$$U^{(2)}(x, t) \rightarrow 0 \quad \text{при } x \rightarrow \infty \quad (4)$$

Начальные условия имеют вид

$$U^{(i)}(x, 0) = 0, \quad \frac{\partial U^{(i)}(x, 0)}{\partial t} = 0 \quad (5)$$

где $\sigma^{(i)}(x, t)$ – напряжения, $U^{(i)}(x, t)$ – перемещение, $\rho^{(i)}$ – плотность материалов, $E^{(i)}$ – модуль упругости, l – длина конечного стержня, $i = 1, 2$. Здесь при $i = 1$ все соотношение относится к первому стержню, а при $i = 2$ – второму. $f(t)$ – заданная функция. Определяющее соотношение принимаем в виде

$$\sigma^{(i)} = E^{(i)} \left[e^{(i)} - \varepsilon \int_0^t \Gamma_1^i(t - \tau) e^{(i)} d\tau - \varepsilon \int_0^t \Gamma_1^i(t - \tau) e^{(i)} \varphi(e^{(i)}) d\tau \right]$$

где ε – постоянный малый параметр, $e^{(i)} = \frac{\partial U^{(i)}}{\partial x}$ – деформации, $\Gamma^{(i)}(t)$ и $\Gamma_1^{(i)}(t)$ – известные функции, характеризующие свойства материалов стержней.

Поставленная задача решается методом малого параметра и преобразованием Лапласа.

Анализ решения показывает, что второе, третье и т.д. приближения зависят от вида функции $\Gamma_1(t)$.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОЗАЩИТЫ КЕРАМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ ОХЛАЖДАЕМЫХ ЛОПАТОК ГТД ПРИ ГАЗОПЛАМЕННОМ НАГРЕВЕ

Лепешкин А.Р.

*ФГУП Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова,
г. Москва, Россия*

Для обеспечения конкурентоспособности авиадвигателей приходится повышать температуру газа перед турбиной свыше 1700 К. Сохранить работоспособность деталей высокотемпературного газового тракта при этом возможно лишь при совершенствовании их теплозащиты.

Наиболее эффективная защита материала детали от теплового потока с помощью ТЗП происходит в случае использования керамических покрытий на основе диоксида циркония ZrO_2 . Однако весьма проблематичны вопросы долговечности, поскольку сопротивление разрушению этих покрытий при растяжении очень низкое, а в условиях эксплуатации в покрытиях возникают напряжения от воздействия центробежных сил и знакопеременные термические напряжения при термоциклическом нагружении.

Эффективность теплозащиты покрытий и их долговечность зависит не только от теплофизических свойств, химического состава, но и от технологии нанесения покрытия.

В настоящее время сведения об эффективности теплозащиты деталей с помощью ТЗП при разогреве их в газовом потоке весьма ограничены. Характеристики теплопроводности ТЗП, полученные при использовании различных известных лабораторных методов, противоречивы. В основном предпочтение отдается плазменному ТЗП. Например, при использовании лазерного импульсного разогрева было получено, что теплопроводность плазменных покрытий примерно в 3 раза ниже, чем у электронно-лучевых.

Лазерный импульсный метод нецелесообразно использовать при определении температуры частично прозрачных ТЗП, так как часть лучевого потока разогревает непосредственно металл, на который нанесено ТЗП. Защитный тонкий металлический экран, толщиной 10-15 мкм, наносимый исследователями на поверхность ТЗП со стороны лазера при разогреве, сам начинает испускать лучевой поток. В реальных условиях лопатки турбин и стенки камер сгорания разогреваются газовым потоком.

Разработана методика объективной оценки эффективности теплозащиты металла с помощью покрытий при газопламенном нагреве объекта на разработанной установке. Суть оригинальной методики, защищенной патентом РФ, состоит в том, что через разъемный образец, собираемый из двух половинок, пропускается высокотемпературный газовый поток. Максимальная температура на "холодной" стороне стенки - 900°C. Температура газового потока - 1500°C.

Полученные результаты экспериментального определения снижения температуры стенки из жаропрочных материалов после нанесения ТЗП из $ZrO_2 + 8\%Y_2O_3$ толщиной примерно 120 мкм показывают, что при газопламенном разогреве моделей испытанное покрытие столбчатой структуры лучше защищает металл ($\Delta t_{\max}$ в 1,6 раза больше), чем испытанное плазменное покрытие.

О ФУНКЦИИ ГРЮНАЙЗЕРА ДЛЯ АНИЗОТРОПНЫХ КОМПОЗИТОВ

Лукьянов А.А.

*НОУ ВПО Международного института компьютерных технологий, Липецкий филиал,
г. Липецк, Россия*

Предлагается модификация определения функции Грюнайзера на случай анизотропных композитов. Данная функция используется в уравнении состояния Грюнайзера, описывающая аналитическую связь состояний Гюгонио с другими термодинамическими состояниями за ударной волной в анизотропных композитах. Предлагаемая модификация функции Грюнайзера основывается на обобщенной декомпозиции тензора напряжения [1] и представляет собой физически и математически корректное обобщение уравнения состояния Грюнайзера для изотропных материалов и редуцируется к этому уравнению в случае изотропии [2,3]. Определяющие соотношения для анизотропного композита (используя тензорные обозначения) записываются так [1-3]

$$\sigma_{ij} = -p^* \alpha_{ij} + \tilde{S}_{ij}, \quad p^* = \tilde{p} + \frac{\beta_{ij} \tilde{S}_{ij}}{\alpha_{kl} \beta_{kl}}, \quad \tilde{p} = -\frac{\beta_{ij} \sigma_{ij}}{\alpha_{kl} \beta_{kl}} \quad (1)$$

где σ_{ij} – тензор напряжения, $\tilde{S}_{ij}$ – обобщенный девиатор тензора напряжения, α_{ij} и β_{ij} – материальные тензоры [1-3]. Предлагается следующее обобщение объемной функции Грюнайзера на случай анизотропного материала Γ_B^{an} :

$$\left(\frac{\partial \tilde{p}}{\partial T} \right)_\varepsilon = \frac{\Gamma_B^{\text{an}} c_v}{\nu}, \quad \tilde{p} = -\frac{\beta_{ij} \sigma_{ij}}{\alpha_{ij} \beta_{ij}}, \quad \sigma_{ij} = C_{ijkl}^T \left[\varepsilon_{kl} - \alpha_{kl}^v (T - T_{ij}) \right] \quad (2)$$

где $\tilde{p}$ – давление, описываемое распространенной формой уравнения состояния Грюнайзера с калибровочной кривой Гюгонио [1-3], α_{kl}^v – компоненты тензора термического расширения, C_{ijkl}^T – тензор $4^{\text{го}}$ ранга изотермических упругих постоянных, ε_{kl} – тензор деформации. Проведенные численные расчеты уровней напряжений Гюгонио при ударном нагружении композита хорошо согласуются с экспериментальными данными для выбранного углеродно-волоконистого эпоксидного композита.

Литература:

1. Lukyanov A.A. Constitutive behaviour of anisotropic materials under shock loading // Intern. J. of Plasticity. – 2008. – Vol.24. – N1. – P.140-167.
2. Lukyanov A.A. An equation of state for anisotropic solids under shock loading // The European Physical Journal, B. – 2008. – Vol.64. – N2. – P.159-164.
3. Lukyanov A.A. Anisotropic materials behavior modelling under shock loading // J. of Applied Mechanics. – 2009. – Vol.76. – N6. – P.061012 (1-9).

НЕЛИНЕЙНЫЕ МНОГОУРОВНЕВЫЕ МОДЕЛИ МЕХАНИКИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ КОМПОЗИТОВ

Макарова Е.Ю., Соколкин Ю.В.

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь,
Россия*

Для прогнозирования упругих и прочностных свойств композитов рассматривается современное состояние и дается дальнейшее развитие методов решения стохастических краевых задач механики композитов на основе структурных локально-эргодических моделей микронеоднородной среды. Традиционным методом и методом периодических составляющих построены соответствующие функционалы и разработаны методы вычисления этих функционалов. Получены новые аналитические формулы для расчета эффективных упругих модулей с учетом естественного разброса свойств матрицы. Рассмотрим два предельных случая: пористые структуры; структуры, наполненные жесткими сферическими включениями. Получены аналитические формулы для расчета полей деформирования в квазиизотропных композитах. На основе полученных решений устанавливается важное свойство микронеоднородной среды: если упругие свойства микронеоднородной среды являются локально-эргодическими, то и поля деформирования являются также локально-эргодическими.

Для прогнозирования прочностных свойств композитов рассматривается постановка нелинейных связанных краевых задач микромеханики композитов, учитывающих стадию структурного накопления микрповреждений, когда поля структурных микрповреждений являются локально-эргодическими. С целью описания структурного разрушения и прогнозирования прочностных свойств композитов существенно расширяется база определяющих соотношений: вводится новый материальный носитель – тензор повреждаемости четвертого ранга. Для замыкания поставленной краевой задачи используются разные структурные подходы: 1) деформационная теория накопления структурных повреждений; 2) первая и третья теории прочности, позволяющие получить замкнутую систему уравнений краевой задачи. Традиционным методом и методом периодических составляющих построены новые функционалы связанной стохастической краевой задачи, позволяющие наряду с прогнозированием упругих свойств строить расчетные поверхности прочности реальных композитов.

Исследуются однонаправленно армированные стекло-, угле- ограно- и боропластики как микронеоднородные среды, анизотропные на макроскопическом уровне. Стекланные и борные волокна рассматриваются как однородные изотропные материалы, углеродные и органические волокна как трансверсально-изотропные материалы. Полимерная матрица описывается нелинейной теорией малых упругопластических деформаций. Построены диаграммы деформирования стекло-, угле-, боро- и органопластиков при различных условиях макроскопического нагружения. На основе этих расчетов получены предельные поверхности прочности в плоскости, перпендикулярной армированию.

Работа поддержана РФФИ–Урал, грант № 10-01-96047-р-урал-а.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЛИМЕРНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА PARABEAM

Мартыросов М.И., Рабинский Л.Н., Серпичева Е.В.

ФГБУ ВПО Московский авиационный институт (НИИУ), г. Москва, Россия

Полимерный композиционный материал (ПКМ) PARABEAM (Голландия) представляет собой стеклоткань, состоящую из двух сотканых из Е-стекловолокна пластин, связанных между собой вертикальным ворсом из стекловолокна в сэндвич-структуру. Стеклоткань PARABEAM впитывает смолу (полиэфирную, винилэфирную, эпоксидную или фенольную), стекловолокно в ворсе укрепляется, стеклоткань увеличивается до заданной высоты. Оптимальное соотношение ткань-смола лежит в пределах от 1:0,9 до 1:1,5.

В работе проводится экспериментальное определение основных механических характеристик этого материала на испытательной машине INSTRON (Великобритания).

Теоретическая часть работы посвящается численному анализу прочностных, жесткостных и весовых характеристик слоистых, симметричных по толщине пакетов ПКМ, где в качестве несущих слоев используется углеткань HexPly M21/40%/285T2/AS4C-6K с эпоксидным связующим M21 и углеродным волокном HexTow AS4C 6K GP (поставщик Hexcel Composites, США), а в качестве заполнителя либо соты с шестигранной формой ячеек ПСП-1К-2,5-48 (полимеросотопласт отечественного производства), либо изучаемый PARABEAM с экспериментально определенными механическими характеристиками.

Рассматриваются различные по количеству слоев пакеты (4,8,10,12 и т.д.), а также различные форматы смешанной укладки таких пакетов, например, $+45^\circ/-45^\circ/90^\circ/0^\circ$ /Соты или PARABEAM $/0^\circ/90^\circ/-45^\circ/+45^\circ$.

Укладка слоев производится во всех основных направлениях (0° , $+45^\circ$, -45° , 90°). Проводится сравнительный и параметрический анализ. Рассматриваются следующие критерии разрушения ПКМ: maximum stress, maximum strain, Tsai-Wu, Hoffman, HanKinson, Cowin, Hill, Hashin, Puck, Grant-Sanders, Tsai-Hill, Puppo-Evensen. Предельная нагрузка на пакет определяется такой величиной, при которой в отдельных слоях ПКМ происходит разрушение по одному из используемых критериев.

Конечноэлементная модель создана в программном комплексе NX 7.5 с использованием приложения Advanced Simulation. Применяются конечные элементы типа Laminate. Принято шарнирное закрепление по всему контуру пакета. В качестве нагрузки принимается распределенное аэродинамическое давление по поверхности.

Работа выполнена при финансовой поддержке Совета по грантам Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых и ведущих научных школ (код проекта НШ-2047.2012.8) и гранта РФФИ (код проекта 11-01-00540_а).

**ВОПРОСЫ ПРОЧНОСТИ ПРИ ПРИМЕНЕНИИ МЕТОДОВ СВЕДЕНИЯ
РЕШЕНИЙ СИСТЕМ ПАРНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ
К УРАВНЕНИЮ ФРЕДГОЛЬМА В ОСЕСИММЕТРИЧНОЙ КОНТАКТНОЙ
ЗАДАЧЕ С ВЕРТИКАЛЬНЫМ ЦИЛИНДРИЧЕСКИМ ЗАЗОРОМ**

Минасян А.Ф.

Институт механики Национальной академии наук Армении, г. Ереван, Армения

Рассматривается осесимметричная контактная задача теории упругости для изотропного полупространства, ослабленного цилиндрическим разрезом с радиусом „ a ”, Разрез имеет конечную высоту „ c ” (рис.1). На границе полупространства приложен жесткий круглый штамп с произвольным основанием, радиус которого больше радиуса цилиндрического разреза ($b > a$) (рис.1).

Предполагается, что отсутствует трение между штампом и полупространством вне штампа и в разрезе отсутствуют внешние усилия. На вертикальной поверхности цилиндрического разреза заданы условия полного контакта.

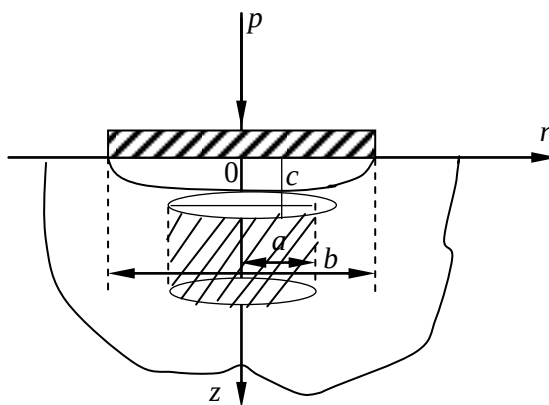


Рис.1.

Дается применение общего метода решения осесимметричной контактной задачи в виде суммы интеграла Фурье и ряда Фурье-Дини для искомой бигармонической функции внутри цилиндра и для полупространства вне цилиндра в виде суммы интегралов Фурье и Вебера.

Задача сводится к интегральному уравнению Фредгольма, выделяется корневая особенность напряжения под штампом. Найдено значение координаты отрыва поверхности от штампа.

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ В ОБРАЗЦАХ КОМПОЗИТА С ТРЕХМЕРНОЙ ОРТОГОНАЛЬНОЙ СТРУКТУРОЙ АРМИРОВАНИЯ В УСЛОВИЯХ ЭКСПЕРИМЕНТА НА СЖАТИЕ

Ошева И.Ю., Ташкинов А.А., Шавшуков В.Е.

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь,
Россия*

В последнее время все большее распространение находят крупноячеистые композиционные материалы, размер армирующей ячейки которых достигает 3-5 мм и более. К таким материалам можно отнести тканые композиты, материалы с ячеистыми заполнителями, а так же композиты, армированные системой трех или более нитей.

Для оценки жесткости и прочности все материалы подвергаются комплексу испытаний. При экспериментальном определении механических характеристик крупноячеистых композитов по стандартным методикам обнаруживается разброс получаемых значений. Кроме того, эксперименты показали, что в натурных конструкциях прочность композитов значительно выше, чем определяемая на стандартных образцах. Поэтому до настоящего времени весьма актуальной является задача совершенствования методов определения механических свойств композиционных материалов.

Целью данной работы являлось исследование факторов, влияющих на поля напряжений в стандартных образцах композиционных материалов с трехмерной ортогональной структурой армирования при испытании на сжатие, а так же разработка рекомендаций для совершенствования методики проведения испытания, которые позволят снизить влияние изучаемых факторов и повысить достоверность экспериментально определяемых механических характеристик.

С помощью вычислительных экспериментов было проанализировано влияние положения армирующего каркаса относительно граней образца, оценено влияние трения между опорными поверхностями образца и испытательной машины на напряженное состояние в материале. Так же было установлено, что заключение торцов в обойму с мягким сплавом приводит к более стабильным значениям прочности.

Работа выполнена при поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (Госконтракт 16.740.11.0508).

ВЛИЯНИЕ СТЕПЕНИ КРИСТАЛЛИЧНОСТИ ПОЛИМЕРНОЙ МАТРИЦЫ НА ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИИ

Панин С.В., Бочкарева С.А., Люкшин Б.А., Люкшин П.А., Корниенко Л.А.

ФГБУН Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск, Россия

Одной из наиболее важных характеристик полимерных материалов, в частности полиолефинов, является степень кристалличности: соотношение доли кристаллической («кристаллитной») и аморфной фаз. Это соотношение определяется технологическими параметрами процесса кристаллизации (скоростью охлаждения, давлением, и пр.), поэтому может варьироваться в определенном диапазоне. Как показывают экспериментальные исследования авторского коллектива, на макроуровне, или на уровне стандартного лабораторного образца, степень кристалличности практически не влияет на его эффективные деформационно-прочностные характеристики. В то же время использование полимерных матриц с разной степенью кристалличности для создания полимерных композиций триботехнического назначения показало, что износостойкость получаемых материалов значительно отличается в пользу композиций с большей степенью кристалличности.

Поскольку с позиции механики сплошных сред материалы обладают практически идентичными эффективными свойствами, данное отличие следует связать с локальными свойствами материала, которые могут отличаться за счет перераспределения параметров напряженно-деформированного состояния (НДС) в полимерной матрице при изменении степени кристалличности.

При внешнем силовом воздействии, отражающем характер нагрузки, действующей на покрытие в узле трения, при проведении расчетов в плоской постановке контролируются экстремальные значения параметров НДС. Это становится возможным, когда задача определения параметров НДС рассматривается в масштабе, позволяющем учесть наличие в расчетной области разных фаз полимерного материала. Рассмотрены примеры анализа параметров НДС полимерной матрицы с разной внутренней геометрией, отвечающей разным уровням кристалличности. В зонах с кристаллической фазой материал рассматривается как анизотропный, аморфная фаза рассматривается как изотропный материал.

Увеличение степени кристалличности приводит к тому, что в расчетной области кристаллическая фаза играет роль своего рода силового каркаса, в результате уменьшаются экстремальные значения деформаций при равной степени нагружения.

Таким образом, если принять, что наиболее информативным критерием разрушения для полимера является его деформационное поведение (известно, что при практически постоянной нагрузке полимеры могут испытывать деформации, значительно отличающиеся по величине), то повышение степени кристалличности, приводящее к уменьшению локальных деформаций в матрице, объясняет резкое уменьшение износа в условиях трибонагружения. Соответствующие экспериментальные данные иллюстрируют и подтверждают сформулированные выводы.

ТЕРМОФЛУКТУАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ РОСТА ТРЕЩИН

Перельмутер М.Н.

ФГБУН Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, г. Москва, Россия

Модель термофлуктуационного разрушения [1] в сочетании с моделью концевой области трещины [2] используется для оценки прочности, трещиностойкости и долговечности композитов. Предполагается что:

1) в начальный момент времени в материале существует область ослабленных связей, которая рассматривается как трещина, берега которой взаимодействуют (трещина с концевой областью);

2) плотность связей в концевой области трещины при действии внешних нагрузок изменяется со временем по термофлуктуационному механизму;

3) условием образования трещины-дефекта (критерием разрушения) является снижение средней плотности связей на соответствующем участке концевой области трещины до некоторого критического значения.

Долговечность τ_B нагруженной межатомной связи определяется выражением [1]

$$\tau_B = \tau_0 e^{\frac{U_0 - A}{kT}},$$

где τ_0 – величина порядка периода тепловых колебаний атомов, k – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура, U_0 – энергия активации распада межатомных связей, $A = V_a \sigma_B$ – произведение активационного объема V_a на напряжение σ_B , действующее на связь. В этом уравнении величина A выражает работу, которую выполняет внешняя сила при разрушении межатомной связи, остальная часть работы совершается за счет тепловых флуктуаций. При этом предполагается, что напряжение распределяется на все связи равномерно и процесс разрушения происходит в материале однородно по всему объему. Фактически процесс разрушения происходит не однородно, а путем зарождения и развития отдельных трещин-дефектов. Ввиду этого, полагаем, что выражение для τ_B является справедливым и для связей в концевой области трещины, но величина A в этом выражении рассматривается как работа по деформированию связей, определяемая с учетом неоднородного распределения усилий по связям и термофлуктуационного изменения плотности связей в концевой области трещины со временем. Вычисление работы по деформированию связей в концевой области трещины выполняется после определения напряжений в связях с использованием закона деформирования связей. Для определения напряжений в концевой области трещины получена система интегро-дифференциальных уравнений, аналогичная системе уравнений (3.2) работы [2]. Условием образования трещины-дефекта свободного от связей является снижение средней плотности связей на соответствующем участке до предельного значения. Время, за которое происходит указанное снижение средней плотности связей, определяет скорость развития дефекта. Модель позволяет оценить характерные временные зависимости прочности и трещиностойкости композитов и нанокompозитов.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (проект №11-08-01243).

Литература:

1. Регель В.Г., Слуцкер А.И., Томашевский Э.Е. Кинетическая природа прочности твердых тел – М.: Наука, 1974. – 560 с.
3. Гольдштейн Р.В. Перельмутер М.Н. Трещина на границе соединения материалов со связями между берегами // Изв. РАН. МТТ. – 2001. – №1. – С.94-112.

ИЗУЧЕНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОТВЕРЖДЕННЫХ ЭПОКСИДНЫХ КОМПОЗИЦИЙ, СОДЕРЖАЩИХ ПОЛИСУЛЬФОНЫ РАЗНОГО ТИПА

Солопченко А.В., Яблокова М.Ю., Шорникова О.Н., Кепман А.В.

*Московский Государственный Университет, Химический факультет, г. Москва,
Россия*

Широко применяемыми связующими для полимерных композиционных материалов являются композиции на основе эпоксидных смол (ЭС). Для повышения комплекса их физико-механических свойств проводят модификацию термопластами, при которой достигаются высокие ударные характеристики при сохранении комплекса прочностных и термических свойств.

В данной работе было изучено, как введение трёх типов полисульфонов с различной функционализацией концевых групп влияет на спектр физико-механических свойства эпоксидных композиций. В качестве объектов исследования были выбраны би- и тетрафункциональная ЭС, отверждаемые латентным аминным отвердителем, и полисульфоны ПСК-1, PESU-OH, PESU-NH₂. Полисульфоны вводились в составы эпоксидных систем в количествах – 7% масс. и 30% масс. от содержания эпоксидного олигомера.

Для полученных материалов согласно рекомендациям стандартов ASTM были определены прочностные характеристики при растяжении, сжатии и изгибе, а также параметры трещиностойкости G_{1c} и K_{1c} . Показано, что введение полисульфона ПСК-1, в отличие от двух других типов полисульфонов, значительно повышает трещиностойкость отвержденных эпоксидных матриц, причем остальные прочностные характеристики остаются на уровне исходной матрицы. Проследить четкие закономерности изменения прочности в зависимости от содержания или типа модификатора не удаётся. Однако, в ходе работы были установлены концентрационные диапазоны содержания полисульфона и тип функционализации концевых групп, где эффект модификации выражен наиболее существенно.

По данным СЭМ видно, что микроструктура отвержденных смесей в зависимости от типа и содержания модификатора а также типа эпоксидной композиции может быть различной. На изображениях образцов с низким содержанием ПСК-1 четко видны глобулы полисульфона, а при больших содержаниях наблюдается протяженная фаза термопласта. Такой тип морфологии описан в литературе и хорошо согласуется с ростом параметров трещиностойкости.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НАНОИНДЕНТИРОВАНИЯ ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ УПРУГИХ СВОЙСТВ ТОНКИХ ТВЕРДЫХ ПОКРЫТИЙ

Торская Е.В.¹, Корнев Ю.В.²

¹ФГБУН Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, г. Москва, Россия

²ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва, Россия

Одним из наиболее распространенных методов модификации поверхностей трения является нанесение на них твердых износостойких покрытий. В то же время увеличение твердости покрытий приводит к концентрации напряжений на границе раздела покрытия с подложкой, что может привести к отслаиванию и разрушению покрытия. Поэтому актуальной является задача моделирования напряженного состояния тел с покрытиями при его фрикционном нагружении. Для подобных расчетов необходимо знать упругие характеристики взаимодействующих тел. В приложении к тонким твердым покрытиям существенным является вопрос об определении упругих свойств материалов, которые могут существенно отличаться от свойств тех же материалов в большом объеме. В этом случае при интерпретации результатов индентирования необходимо учитывать деформацию более мягкой подложки. В данной работе приведены результаты индентирования и расчета модуля упругости ряда покрытий, нанесенных на разные подложки.

Эксперимент по индентированию образцов с покрытиями проводили с помощью измерительного комплекса NanoTest 600 (MicroMaterialsLtd., Англия).

В данном эксперименте применялся алмазный конический индентор с углом при вершине 60° и радиусом закругления 10 мкм. Величина максимальной нагрузки подбиралась так, чтобы деформация в процессе нагружения оставалась упругой. В этом случае для определения модуля упругости покрытия (при известных упругих характеристиках подложки) можно использовать решение задачи о контакте индентора и упругого тела с покрытием. В работе [1] предложен метод определения внедрения и распределения контактного давления, возникающего при контакте упругого гладкого индентора и двухслойного упругого полупространства. Решение обратной задачи (идентификация модуля упругости при известном внедрении) в явном виде невозможно. В то же время возможно решить серию контактных задач с изменяющимся модулем упругости и остановиться на том значении, которое обеспечивает экспериментальное значение внедрения. Массив точек на кривых индентирования позволяет получить и ряд значений модуля упругости, разброс которых невелик при малой погрешности эксперимента и расчетов.

Удовлетворительное совпадение упругих свойств полученных в ходе эксперимента по наноиндентированию и расчётов позволяет использовать полученные значения модуля упругости для дальнейшего расчета напряженного состояния в покрытии при фрикционном нагружении.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 12-08-01171) и гранта Президента РФ по поддержке ведущих научных школ НШ – 2611.2012.1.

Литература:

1. Torskaya E.V., Goryacheva I.G. The effect of interface imperfection and external loading on the axisymmetric contact with a coated solid // Wear. – 2003. – Vol.254. – P.538-545.

ВЛИЯНИЕ ФАКТОРОВ ХОЛОДНОГО КЛИМАТА НА ПОКАЗАТЕЛИ ИЗГИБНОЙ ПРОЧНОСТИ ОДНОНАПРАВЛЕННЫХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ СТЕКЛО- И БАЗАЛЬТОПЛАСТИКОВ

Федоров Ю.Ю., Бабенко Ф.И., Лапий Г.П.

ФГБУН Институт проблем нефти и газа СО РАН, г. Якутск, Россия

Экспериментально исследовано влияние низких температур и пятилетней экспозиции в холодном климате (условия неотапливаемого склада) на изгибные свойства однонаправленных стекло- и базальтопластиковых стержней строительного назначения. В работе исследовали механические свойства промышленных образцов стеклопластиковых стержней двух типов (на основе полиэфирного и эпоксидного связующего) и базальтопластиковых стержней на основе эпоксидного связующего диаметром 5,5 и 5,0 мм производства ООО "Бийский завод стеклопластиков". Стержни изготавливают методом непрерывной протяжки через формующую фильеру однонаправленных волокнистых материалов, предварительно пропитанных полимерным связующим, с последующим отверждением в полимеризаторе. Экспонирование образцов в ненапряженном состоянии в неотапливаемом складе в климатических условиях г. Якутска проводилось в течение 5 лет, испытания - с периодичностью в 1 год.

Сложность испытаний армированных композиционных материалов на растяжение и изгиб состоит в том, что контактные нагрузки от механизмов нагружения влияют на напряженное состояние в зоне разрушения образца. Был выбран метод продольного изгиба, который имеет преимущества по сравнению с трех- и четырехточечными схемами изгиба, поскольку расчетная зона разрушения находится далеко от точек приложения нагрузки к образцу. Еще одним преимуществом этого метода является то, что для продольного изгиба требуется нагрузка, примерно в 50 раз меньшая, чем для растяжения/сжатия образца такого же диаметра.

Показатели свойств определялись методом продольного изгиба стержней в условиях шарнирного закрепления образцов при температуре 20 и минус 60°C, скорости испытаний 5 мм/мин на испытательной машине UTS-20K, с термокриокамерой. Образцы нагружали до разрушения с одновременной записью в компьютер значений текущей нагрузки, времени и сближения концов стержня. Существенность изменения показателей прочности, деформативности и жесткости определяли после каждого съема путем проверки значимости расхождений между средними значениями текущего (конкретное время съема образцов, равное 1,2,3,4,5 года) и исходного показателей свойств. Проведенная статистическая обработка результатов (при уровне значимости 0,05) показала, что после третьего года экспозиции расхождения между средними значениями неслучайны и обусловлены старением материала, а изменения показателя – статистически значимы.

Результаты исследования показали:

- существенное увеличение (до 20%) деформационно-прочностных показателей стекло- и базальтопластиковых стержней при низких климатических температурах;
- 5-летняя экспозиция образцов материалов в ненапряженном состоянии в неотапливаемом складе в климатических условиях г. Якутска показала высокую климатическую стойкость образцов к воздействию факторов холодного климата (снижение показателей свойств не превышает 4%).

ПЕРЕХОДНЫЙ СЛОЙ И ЕГО ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИ АДГЕЗИИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Фроленкова Л.Ю., Шоркин В.С., Якушина С.И.

ФГБОУ ВПО "Госуниверситет - УНПК", г. Орел, Россия

Адгезионный контакт элементов композиционных материалов и конструкций самого разного назначения широко распространен в природе и технике. Моделирование этого явления, количественная оценка параметров и величин, характеризующих его, является актуальной задачей.

В настоящее время существуют самые разные подходы и методы решения проблемы качественного и количественного описания адгезионного контакта как в теоретической и экспериментальной физике, так и в инженерной практике. В данной работе решение проблемы предлагается осуществить методами теории упругости градиентных изотропных материалов, имеющих начальное напряженное состояние. Использовано также представление о нелокальном, дальнodelствующем потенциальном взаимодействии частиц сплошной среды. Это объясняется тем, что понятия, характеризующие адгезию в физике: поверхностная энергия, энергия и сила адгезии, являются термодинамическими. Термодинамика, как и теория упругости, опирается на феноменологический подход, использует представления о сплошности исследуемого материала. Кроме того, реальные материалы часто имеют сложный химический состав и структуру, являются смесями или сплавами, твердыми растворами. Использовать классические методы для анализа их адгезионных свойств означало бы детальный учет их строения, что весьма затруднительно.

В соответствии с представлениями Гиббса [1] граница раздела двух конденсированных фаз представляет собой слой некоторой толщины, который распространяется по обе стороны от поверхности раздела. Свойства материала в этом слое отличаются от объемных свойств обычных гомогенных фаз. По толщине этого слоя происходит резкий, но непрерывный переход от свойств одной объемной фазы к свойствам другой.

В рамках предложенного варианта нелокальной теории рассмотрен способ вычисления распределения по толщине переходного слоя термодинамических характеристик, в частности свободной энергии. Разность суммарного значения свободной энергии соединившихся в адгезионном контакте двух тел и значения той же величины в их разъединенном состоянии представляет собой суммарное значение энергии адгезии.

Одной из гипотез, лежащих в основе рассмотренного варианта нелокальной теории упругости, является предположение о потенциальном взаимодействии элементарных частиц, образующих контактирующие тела, на любом расстоянии (парном, тройном и т.д.). Сумма градиентов этих потенциалов определяет силу адгезионного взаимодействия.

Поверхность адгезионного контакта обладает поврежденностью (несплошностью), обусловленной разной физической природой материалов тел. Показана возможность определить относительную площадь отсутствия адгезии (поврежденности) из условия стационарности энергии упругих деформаций, возникающих при адгезии двух тел.

Литература:

1. Гиббс Дж.В. Термодинамика. Статистическая механика. – М.: Наука, 1982. – 584 с.

ДИАГНОСТИКА ПОВРЕЖДЕНИЯ СТЕРЖНЯ

Хакимов А.Г.

*ФГБУН Институт механики им. Р.Р. Мавлютова Уфимского научного центра РАН,
г. Уфа, Россия*

В случае стержней конечной длины для определения наличия его дефектов может быть использовано изменение спектра собственных частот продольных, крутильных колебаний или изменение частоты собственных изгибных колебаний [1-9]. Метод конечных элементов используется для анализа изгибных колебаний не вращающегося ротора с открытыми трещинами в [10]. В [11] представлен интегральный признак идентификации дефектов в элементах стержневых конструкций, позволяющий определять не только их наличие и местоположение, но и степень поврежденности.

Исследуются собственные продольные, крутильные и изгибные колебания стержня с одним повреждением. Получено, что при расположении повреждения в узле колебаний собственные частоты не зависят от его длины. С возрастанием длины повреждения низшие частоты собственных колебаний уменьшаются. По трем собственным частотам продольных колебаний определяются начальная координата, длина и площадь поперечного сечения стержня в зоне повреждения. По двум собственным частотам крутильных колебаний определяются полярный момент инерции и параметр жесткости поперечного сечения стержня в зоне повреждения. По нижней частоте изгибных колебаний определяется осевой момент инерции поперечного сечения стержня в зоне повреждения.

Литература:

1. Gladwell G.M.L. Inverse problems in vibration. – Dordrecht, Boston, London: Kluwer Academic Publishers, 2004. (Глэдвелл Г.М.Л. Обратные задачи теории колебаний. – М.–Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2008. С.608.)
2. Ильгамов М.А. Диагностика повреждений вертикальной штанги / Труды Института механики УНЦ РАН. – Уфа: «Гилем», 2007. – Вып. 5. – С.201-211.
3. Ватulyan A.O., Солуянов Н.О. Об определении местоположения и размера полости в упругом стержне // Дефектоскопия. – 2005. – №9. – С.44-56.
4. Khakimov A.G. Damage diagnostics in a vertical rod with concentrated masses on the elastic suspender // Intern. J. of Mechanics and Applications. – 2012. – Vol.2. – N5. – P.70-73.
5. Ахметвалиева Э.Н., Ахтямов А.М. Диагностика поперечного надреза вертикальной штанги // Контроль. Диагностика. – 2012. – №8. – С.31-34.
6. Хакимов А.Г. О собственных колебаниях вала с моделью искусственного дефекта // Дефектоскопия. – 2010. – Т.46. – №6. – С.93-98.
7. Сафина Г.Ф. Исследование по крутильным колебаниям вала с дисками // Дефектоскопия. – 2011. – Т.47. – №3. – С.51-65.
8. Хакимов А.Г. О собственных колебаниях вала турбокомпрессора с искусственным дефектом // ИВУЗ. Авиационная техника. – 2011. – №1. – С.71-73.
9. Ильгамов М.А., Хакимов А.Г. Диагностика повреждений балки на шарнирных опорах // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2010. – №2. – С.42-48.
10. Guangming Dong, Jin Chen Vibration analysis and crack identification of a rotor with open cracks // Japan J. of Industrial and Applied Mathematics. – 2011. – Vol.28. – N1. – P.171-182.

11. *Акопьян В.А., Черпаков А.В., Рожков Е.В., Соловьев А.Н.* Интегральный диагностический признак идентификации повреждений в элементах стержневых конструкций // Контроль. Диагностика. – 2012. – №7. – С.50-56.

ВЛИЯНИЕ СТЕПЕНИ ДИСПЕРСНОСТИ МИНЕРАЛА ШУНГИТ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЭЛАСТОМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИЙ НА ОСНОВЕ СКТН-А

Чиркунова С.В., Корнев Ю.В., Бойко О.В., Яновский Ю.Г.

ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва, Россия

Согласно многочисленным исследованиям отечественных и зарубежных учёных, варьирование в определённых пределах механических и прочностных свойств композиционных материалов достигается путём их наполнения дисперсными частицами различной природы (технический углерод, силикаты, органоглины и др.). Существенное влияние при этом оказывают размер частиц наполнителя. Известно, что эффект усиления – улучшение тех или иных механических характеристик напрямую связан с размерами частиц наполнителя, т. е. с их удельной поверхностью.

Целью предлагаемой работы является получение из минерала шунгит активного наполнителя (частиц наноразмеров) для создания эластомерных композитов с высокими эксплуатационными характеристиками.

В качестве исходного продукта был взят минерал шунгит в виде порошка фракции 0-5 мкм и удельной поверхностью 16 м²/г. Для увеличения усиливающей активности шунгита в эластомерных композитах исходную фракцию подвергли измельчению по специально разработанной в ИПРИМ РАН методике. Размер частиц измельченного шунгита составляет порядка 50 нм, удельная поверхность 54 м²/г.

Для исследования влияния степени дисперсности на усиливающую способность минерала шунгит в низкомолекулярных силиконовых композициях на основе СКТН-А (α,ω-бис(гидрокси)полидиметилсилоксан), были приготовлены смеси, наполненные данным наполнителем, взятым в концентрациях (10, 20, 30, 40, 50% масс.). Также, для сравнения, была сделана ненаполненная смесь.

Наблюдается существенное увеличение прочностных и упругих свойств для образцов с измельчённым шунгитом в сравнении с исходным. Причём уменьшение размера частиц приводит также и к увеличению сопротивления раздиру, что особенно актуально для силиконовых композиций. Указанные эффекты в большей степени проявляются для степеней наполнения 40%, что также подтверждает приближение данной концентрации к оптимуму наполнения шунгитом силиконовых композиций. Наибольшее значение прочности в данном эксперименте наблюдается для эластомерных композитов, наполненных шунгитом с частицами наноразмеров в концентрации 40%, и составляет 3,58 МПа, что в 7 раз выше прочности ненаполненного образца.

Максимальное значение сопротивления раздиру было достигнуто при наполнении смеси 40% измельченного шунгита и составило 7,06 кН/м, что примерно в 2 раза выше, чем для смесей, наполненных исходным шунгитом (4,32 кН/м). При 40%-ом наполнении смеси с измельченным шунгитом примерно в 6 раз превышают значение сопротивления раздиру ненаполненной смеси.

Представленные выше результаты говорят о существенном увеличении усиливающего эффекта минерала шунгит в силиконовых композициях на основе СКТН-А с уменьшением размера его частиц.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ 11-01-00932а).

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕМПФИРУЮЩИХ СВОЙСТВ ПАКЕТА КОМПОЗИТНЫХ СЛОЕВ, АРМИРОВАННЫХ ОДНОНАПРАВЛЕННЫМИ ВОЛОКНАМИ

Шишкин В.М., Левашов А.П.

Вятский Государственный Университет, г. Киров, Россия

Композитные материалы кроме высокой удельной прочности и жесткости имеют еще и весьма высокую демпфирующую способность (в 20...40 раз выше, чем у металлов и их сплавов). Наибольшее применение имеют многослойные материалы (пакеты), армированные высокопрочными и высокомодульными однонаправленными волокнами.

Считается, что каждый слой пакета находится в плоском напряженном состоянии. Для моделирования демпфирующих свойств одного композитного слоя используется концепция комплексного модуля упругости и принцип соответствия:

$$\{\sigma_L\}^* = [D]_s^* \{\varepsilon_L\}^*. \quad (1)$$

Здесь $\{\sigma_L\}^* = \{\sigma_1^* \sigma_2^* \tau_{12}^*\}$, $\{\varepsilon_L\}^* = \{\varepsilon_1^* \varepsilon_2^* \gamma_{12}^*\}$ – соответственно комплексные напряжения и комплексные деформации в осях ортотропии слоя; $[D]_s^*$ – комплексный оператор

$$[D]_s^* = \begin{bmatrix} \frac{E_1^*/(1-\mu_{12}^*\mu_{21}^*)}{\mu_{21}^*E_2^*/(1-\mu_{12}^*\mu_{21}^*)} & \frac{\mu_{12}^*E_1^*/(1-\mu_{12}^*\mu_{21}^*)}{E_2^*/(1-\mu_{12}^*\mu_{21}^*)} & 0 \\ 0 & 0 & G_{12}^* \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Комплексные модули упругости E_1^* , E_2^* , G_{12}^* и комплексные коэффициенты Пуассона μ_{12}^* , μ_{21}^* имеют вид

$$\begin{aligned} E_1^* &= E_1(1+i\delta_1/\pi), \quad E_2^* = E_2(1+i\delta_2/\pi), \quad G_{12}^* = G_{12}(1+i\delta_{12}/\pi), \\ \mu_{12}^* &= \mu_{12}(1+i\delta_2/\pi), \quad \mu_{21}^* = \mu_{21}(1+i\delta_1/\pi), \quad (\mu_{12}^*E_1^* = \mu_{21}^*E_2^*). \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь δ_1 , δ_2 , δ_{12} – логарифмические декременты композитного слоя при деформировании его соответственно вдоль волокон, поперек волокон и при сдвиге в плоскости слоя. Линеаризованная по δ_1 и δ_2 мнимая часть $[D]_s^*$ есть матрица демпфирования $[D_g]_s$ слоя при резонансных колебаниях конструкции.

Для вычисления матрицы демпфирования пакета композитных слоев используется выражение

$$[D_g] = \sum_{k=1}^n \bar{h}_k [T_k]^T [D_g]_s [T_k]. \quad (4)$$

Здесь $\bar{h}_k$ – относительная толщина слоя k пакета, $[T_k]$ – матрица связи деформаций $\{\varepsilon_L^{(k)}\}$ в осях ортотропии слоя k с деформациями $\{\varepsilon\}$ всего пакета:

$$\{\varepsilon_L^{(k)}\} = [T_\varepsilon^{(k)}] \{\varepsilon\}. \quad (5)$$

Матрица $[D_g]$ может использоваться для формирования матриц демпфирования многослойных композитных конечных элементов, находящихся в плоском напряженном состоянии при анализе резонансных колебаний тонкостенных композитных конструкций.

УДАР ДЕФОРМИРУЕМОЙ МАССОЙ ПО УПРУГОЙ ОРТОТРОПНОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКЕ

Шклярчук Ф.Н.

ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва, Россия

Рассматривается ортотропная круговая цилиндрическая оболочка (прямоугольная в плане панель) с постоянными параметрами, которая подвергается нормальному удару с заданной начальной скоростью деформируемой массы в центре панели, где располагается начало координат. На криволинейных кромках панель считается свободно опертой, а на боковых прямолинейных кромках – 1) свободно опертой или 2) неподвижно закрепленной по тангенциальным перемещениям и углу поворота в окружном направлении. Во втором случае вместо панели может рассматриваться замкнутая оболочка (если принять, что ширина панели равна длине окружности).

Действие на оболочку ударяющей массы (ударника) заменяется неизвестной нормальной сосредоточенной силой или нормальным давлением, распределенным на малой контактной площадке, представляющими контактную реакцию.

В результате упругого, пластического или хрупкого деформирования ударника (или только его носовой части), а также локального смятия оболочки, его центр тяжести получает дополнительное перемещение, которое определяется на основании уравнений статики и неразрывности линейно или нелинейно в зависимости от контактной реакции. Такие зависимости также могут быть получены экспериментально.

Перемещения оболочки и углы поворота ее нормали при учете поперечных сдвигов представляются в виде двойных тригонометрических рядов: по косинусам для нормальных перемещений и по синусам для тангенциальных перемещений и углов поворота. Пренебрегая инерцией оболочки в тангенциальных направлениях и по углам поворота нормальных элементов, задача после исключения этих перемещений и углов поворота сводится к системе несвязанных уравнений в нормальных координатах. Эти уравнения с учетом модального вязкого демпфирования решаются аналитически точно в виде интегралов Дюамеля в зависимости от контактной реакции. С учетом условий контакта с деформируемым ударником после исключения нормальных координат задача сводится к интегральному уравнению относительно неизвестной контактной реакции. И затем, путем интегрирования по частям - к интегральному уравнению относительно производной контактной реакции по времени.

Полученное интегральное уравнение решается численно шаговым методом с использованием аппроксимации контактной реакции на шаге линейной функцией. При этом внеинтегральные члены с нелинейной зависимостью для контактной реакции на каждом последующем малом шаге линеаризуются.

Выполнены тестовые расчеты со сравнениями и оценками сходимости в зависимости от величины шага и от числа удерживаемых нормальных координат в двойных рядах. Приведены графические результаты расчета динамической реакции цилиндрической панели при ударе деформируемой массой. Оценено влияние различных параметров.

СРАВНЕНИЕ СКОРОСТИ НАЧАЛА ФРАГМЕНТАЦИИ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО УДАРНИКА НА СПЛОШНОЙ И ДИСКРЕТНОЙ ПРЕГРАДЕ

Шумихин Т.А.

ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва, Россия

Проведена серия экспериментов по ударному пробитию тонких дискретных и сплошных преград одинаковой поверхностной плотности алюминиевым ударником в диапазоне скоростей 1.6-3.74 км/с. Цель экспериментов определить скорость начала интенсивной фрагментации ударника после взаимодействия с преградой. Для регистрации действия запреградного облака фрагментов на некотором расстоянии от преграды устанавливалась толстая пластина-свидетель. За скорость начала интенсивной фрагментации принималась скорость, при которой объем кратера, образованного на свидетеле фрагментом ударника наибольшего размера, достигал максимального значения с последующим уменьшением по мере роста начальной скорости ударника. Эксперименты показали, что фрагментация алюминиевого ударника диаметром 6.35 мм на дискретной преграде, состоящей из параллельных стальных струн диаметром 0.6 мм с расстоянием между ними 2 мм, начинается на скорости порядка 3.5 км/с, в то время как на сплошной алюминиевой преграде толщиной 0.33 мм пороговое значение скорости фрагментации лежит в районе 4 км/с. Разрушение ударника на дискретных преградах характеризуется фронтальной фрагментацией с генерацией выбросов материала ударника в направлении его движения. Интенсивность фрагментации определяется интенсивностью внедрения элементов дискретной преграды в ударник. На сплошных преградах фрагментация реализуется за счет ударно-волнового механизма. Различие механизмов разрушения ударника обуславливает различие скоростей, при которых начинается интенсивная фрагментация.

СТРУКТУРЫ НАНОРАЗМЕРНЫХ НАПОЛНИТЕЛЕЙ В СРЕДЕ ЭЛАСТОМЕРНЫХ МАТРИЦ

Яновский Ю.Г., Юмашев О.Б., Семенов Н.А., Карнет Ю.Н., Козлов Г.В.

ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва, Россия

С целью описания механизма усиления полимерных композитов малыми добавками наночастиц (0,1-5,0 масс.%) изучены особенности структурообразования наночастиц на основе углерода (технический углерод, шунгит, графен, углеродные нанотрубки (УНТ)) в среде эластомерных матриц. Экспериментальные оценки геометрических параметров нанообъектов проводили методами электронной просвечивающей, атомно-силовой микроскопии (режим фазового контраста и модуляции силы), оптической интерференционной микроскопии, распределение частиц по размерам оценивали на дисковой аналитической центрифуге. Обработку данных проводили с использованием специализированной компьютерной программы обработки результатов SPIP (Дания). Был проанализирован процесс агрегации и дезагрегации, формирования цепочечных структур, фрактальные особенности поверхности наночастиц, а также условия формирования закрученных (кольцеобразных) структур УНТ. Исследовано влияние геометрических параметров углеродных нанотрубок – их длины, диаметра и радиуса формируемых ими кольцеобразных структур – на комплекс физико-механических свойств композитов. В частности, установлено, что радиус кольцеобразных структур УНТ оказывает определяющее влияние на уровень межфазной адгезии в композитах полимер/УНТ. В рамках фрактального анализа предложены соотношения для оценки параметров кольцеобразных структур.

Для наночастиц наполнителей предложены фрактальные соотношения, построенные на основе обработки результатов натуральных экспериментов, описывающие их агрегацию и взаимосвязь структурных и механических характеристик среды.

Показано резкое уменьшение уровня межфазных взаимодействий с уменьшением радиуса кольцеобразных структур УНТ. Увеличение радиуса кольцеобразных структур УНТ в полимерных композитных матрицах повышает их модуль упругости и снижает вязкость расплава.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ 11-01-00932а).

Секция 2

Аэро-, гидромеханика, реология сред с нанонаполнителями

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И ЗАКОНЫ КОАЛЕСЦЕНЦИИ ГАЗОВЫХ ПУЗЫРЬКОВ В ЖИДКОСТИ

Бошенятов Б.В.

ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва, Россия

Коалесценция пузырьков газа в жидкости является важнейшим фактором, определяющим размер пузырьков, объемную долю газа (газосодержание) и, в конечном счете, – эффективность физико-химических взаимодействий во многих природных и технологических газожидкостных процессах. Однако физические закономерности этого явления до сих пор остаются до конца не понятыми. Достаточно сказать, что для расчета пузырьков газожидкостных реакторов до настоящего времени используется несколько математических моделей, основанных на, так называемом, дренажном механизме утончения жидкой пленки, разделяющей два пузырька перед их окончательным объединением (коалесценцией). Эти модели отличаются друг от друга лишь принятыми допущениями, необходимыми для получения конечного аналитического выражения, которое содержит два-три неизвестных коэффициента. Численные значения этих коэффициентов, при сравнении с различными экспериментальными данными, могут отличаться в несколько раз. В данной работе изложен альтернативный подход описания процесса коалесценции, основанный на предположении, что результат столкновения пузырьков (имеет место коалесценция или нет) определяется безразмерными критериями, вычисленными по параметрам жидкости и пузырьков до их столкновения. При таком подходе отпадает необходимость в дополнительных предположениях (и подгоночных коэффициентах), связанных с механизмом дренажа жидкой пленки. Эксперименты автора, а также других авторов, обработанные в соответствии с принятой гипотезой подтвердили её справедливость. Оказалось, что условия коалесценции пузырьков описываются двумя экспериментальными законами

$$P_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{if } Re > Re_c \text{ and } W < W_c \\ 0, & \text{if } Re < Re_c \text{ or } W > W_c \end{cases} \quad (1)$$

где P_{ij} – вероятность коалесценции пузырьков; $Re_c \approx 30$, $W_c \approx 4$ – критические значения чисел Рейнольдса и Вебера, соответственно.

Точность и область применимости наиболее распространенных моделей коалесценции, включая предложенную автором модель (1) были исследованы методом прямого компьютерного моделирования и сравнением с представительным экспериментом. Все известные модели коалесценции при числах Рейнольдса меньше 30 дают неверный результат. Модель (1), в широком диапазоне чисел Re и W , описывает экспериментальные данные с наибольшей точностью.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛН ТИПА ЦУНАМИ НА ГИДРОДИНАМИЧЕСКОМ ЛОТКЕ И ПРИМ РАИ

Бошенятов Б.В., Левин Ю.К., Лисин Д.Г., Попов В.В., Семянистый А.В., Яновский Ю.Г.

ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва, Россия

Рассмотрены эксперименты, проведенные на гидродинамическом лотке, предназначенном для исследования волн на мелкой воде, в том числе, типа цунами. Приведены технические характеристики установки, даны моделируемые параметры волн типа цунами и результаты испытаний установки, подтверждающие её технические характеристики. Отмечена особенность сформированной волны – наличие осцилляций амплитуды на ее вершине. Разработана математическая модель, адекватно отображающая результаты эксперимента на гидродинамическом лотке. Рассчитано изменение поля скоростей жидкости в ходе формирования и распространения волны, что позволяет детально проследить эволюцию ее формирования. Определена эмпирическая зависимость частоты осцилляций на вершине волны от глубины воды.

О ГИДРОДИНАМИЧЕСКОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ В ПОТОКАХ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ

Гуськов О.Б.

ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва, Россия

Разработан метод приближенного решения проблемы многих тел сферической формы в вязкой жидкости в приближении Стокса. В рамках чисто гидродинамического подхода на основе использования концепции самосогласованного поля классическая граничная задача сведена к формальной процедуре решения бесконечной линейной алгебраической системы уравнений относительно тензорных коэффициентов, входящих в полученное решение для поля скорости и давления жидкости. Для случая разбавленных суспензий, когда отношение размера дисперсных частиц к характерному расстоянию между ними является малым параметром, построена процедура приближенного решения этой системы уравнений. В итоге исходная граничная задача сведена к решению рекуррентной системы уравнений, в которой каждое последующее приближение для всех искомых величин зависит только предыдущих приближений. Полученная система рекуррентных уравнений может быть аналитически решена в любом заданном приближении по малому параметру. Показано, что данная система уравнений содержит в себе все возможные физические постановки задач, и в рамках построенной математической процедуры они отличаются просто разным набором заданных и искомых функций. Практические возможности построенного метода никак не ограничены количеством дисперсных частиц в жидкости.

ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ ГИДРОМЕХАНИКИ СПЛОШНЫХ ГЕТЕРОГЕННЫХ СРЕД С ПЕРЕМЕННОЙ МАССОЙ

Исмаилова Ш.Г., Гаджиева Г.Ф., Гахраманов П.Ф., Исмаилов Р.Ш.

Сумгаитский Государственный Университет, г. Сумгаит, Азербайджан

Для математического описания движения гетерогенных систем с переменной массой использовано осредненное описание движения с введением многоскоростного континуума и взаимопроникающего движения ее составляющих. Исходя из этого и общих физических представлений, определены основные параметры гетерогенных систем, т.е. плотность, скорость, объемная концентрация, внешних массовых и поверхностных сил и др.

Представим себе гетерогенную среду, состоящую из нескольких (по крайней мере, из двух) – несущей (жидкости, газа или пара) и несомой (твердых частиц, пузырей или капель) фаз, массы которых и среды в целом со временем непрерывно изменяются вследствие притока (или оттока) дополнительного количества вещества. Это означает, что к потоку гетерогенной смеси, имеющий вектор скорости $\vec{u}$ в момент времени t , присоединяется (или отсоединяется) элементарная масса со скоростью $\vec{u}_*$. Считается, что вектор скорости $\vec{u}_*$ на некоторую величину отличается от вектора скорости $\vec{u}$ (т.е. $\vec{u} \neq \vec{u}_*$). Так как дополнительная масса может непрерывно присоединяться к фиксированной частице среды с различных направлений, то естественно ввести в рассмотрение поток массы, импульса и энергии, присоединяемых к частице смеси (или отсоединяющихся от нее) за единицу времени на единицу объема. Предполагается также, что внутри среды могут происходить межфазные переходы (массы, тепла и др.). В этих условиях (при математическом описании движения гетерогенной среды с непрерывным изменением физических величин) законы сохранения записываются в виде уравнений баланса, связывающих скорость изменения «полного количества» соответствующей физической величины в некотором объеме с «потоком» этой величины через поверхность, ограничивающую объем, и «источниками», действующими внутри объема. Тогда для i -й фазы гетерогенной среды (в фиксированном бесконечно-малом объеме V , ограниченном поверхностью S) получены следующие балансовые уравнения:

уравнение переноса массы

$$\partial(\rho_i \varphi_i) / \partial t + \nabla(\rho_i \varphi_i u_i) = (-1)^i \chi + q_{*i}, \quad i = 1, 2,$$

уравнение переноса импульса

$$\rho_i \varphi_i [\partial u_i / \partial t + (u_i \nabla) u_i] = \rho_i \varphi_i \vec{F}_i + \nabla(\varphi_i \vec{\sigma}_i) + (-1)^i [\vec{R} + (\vec{u}_\chi - \vec{u}_i) \chi] + (\vec{u}_{*i} - \vec{u}_i) q_{*i}$$

уравнение переноса полной энергии

$$\rho_i \varphi_i [\partial E_i / \partial t + (u_i \nabla) E_i] = \rho_i \varphi_i \vec{F}_i \vec{u}_i + \nabla[\varphi_i (\vec{\sigma}_i \vec{u}_i - \vec{q}_i)] + (-1)^i [\vec{R} \vec{u}_i + Q_i + (E_\chi - E_i) \chi] + (E_{*i} - E_i) q_{*i}$$

где $E_i = e_i + u_i^2 / 2$; $E_{*i} = e_{*i} + u_{*i}^2 / 2$; $E_\chi = e_\chi + u_\chi^2 / 2$; $\rho_i, \varphi_i, \vec{u}_i$ – истинная плотность, объемная концентрация и скорость i -й фазы; q_{*i} – удельная присоединяемая (или отсоединяемая, при этом $q_{*i} < 0$) масса; χ – удельная масса межфазного перехода; $\vec{u}_{*i} \cdot E_{*i}$ – скорость и полная энергия присоединяемых (отсоединяемых) частиц; u_χ, E_χ – скорость и полная энергия фазовых превращений; $\vec{q}_i$ – вектор удельного теплового потока; Q_i – интенсивность межфазного теплообмена; $\vec{R}$ – удельный вектор межфазных сил; $\vec{F}_i, \vec{\sigma}_i$ – удельный вектор внешних массовых и поверхностных сил.

ВЛИЯНИЕ НАНОНАПОЛНИТЕЛЯ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЯДА НА ВЯЗКОУПРУГИЕ СВОЙСТВА ПВХ И ПС

Колупаев Б.Б., Клепко В.В., Лебедев Е.В., Левчук В.В.

Институт химии высокомолекулярных соединений НАН Украины, г. Киев, Украина

Исследовано поведение гетерогенных полимерных систем, полученных на основе поливинилхлорида (ПВХ) и полистирола (ПС), которые содержат в качестве наполнителя нанодисперсные порошки металлов (медь, вольфрам, молибден) и минералов (глины), в динамическом механическом поле ультразвуковой частоты (0,4 МГц). Композиты предварительно подвергались воздействию электрического разряда. При этом решались следующие задачи:

- изучить влияние активных центров поверхности нанонаполнителей различной физикохимической природы на локальную и сегментную подвижность гибкоцепных полимеров;
- исследовать влияние содержания нанодисперсного наполнителя на динамические механические свойства композитов;
- изучить роль временного и температурного факторов в формировании вязкоупругих свойств материала, подверженного воздействию в течении (120÷900) с стабилизированного электрического разряда на переменном токе;
- установление механизмов упрочняющего действия нанодисперсного наполнителя и слабых электрических полей на механические свойства композитов;
- исследование влияния поверхностных и объемных дефектов, образованных под действием электрического разряда, на вязкоупругие свойства материала.

На основе сопоставительного анализа воздействия нанонаполнителя в объеме (0÷1,0) об. %, а также электрического разряда в воздухе в широком временном интервале, с использованием метода ИКС обнаружены структурные изменения полимерной матрицы, нестабильные перекиси, приводящие как к сшивке, так и к деструкции элементов структуры. Установлена область существенного увеличения величины действительной части модуля продольной деформации и сдвига, а также изменения диссипации механической энергии. Показано, что с помощью нанодисперсных металлов и электрического разряда частотой 50 Гц в гибкоцепных полимерах происходит уплотнение материала, а вязкоупругие характеристики имеют характерный максимум, положение которого зависит от содержания (0÷3,0) об. %, типа наполнителя и времени действия (120÷900) с электрического разряда.

ДИНАМИЧЕСКОЕ НАГРУЖЕНИЕ НАНОПОЛНЕННЫХ ГИБКОЦЕПНЫХ ПОЛИМЕРОВ

Колупаев Б.Б., Кривцов В.В., Максимцев Ю.Р.

Ровенский государственный гуманитарный университет, г. Ровно, Украина

Представлены результаты исследования влияния нанодисперсного металлического наполнителя Fe, Mo, W, Cu на динамические механические свойства композитов, полученных на основе ПВХ, ПС, ПММА, как представителей гибкоцепных полимеров. В частотном диапазоне $(20,0 \div 140,0) \text{ с}^{-1}$ оценена температурная зависимость декремента и модулей упругости композита от характера взаимодействия структурных элементов полимерной матрицы с активными центрами нанонаполнителя. Показано, что в случае динамического нагружения композита, перемещение элемента структуры связано с силой сдвигового трения. С помощью гамильтоновой модели определены необходимые и достаточные условия динамического нагружения цепи, обеспечивающие целостность композита. Установлена температурная и концентрационная зависимость величины мономерного коэффициента трения, которая позволяет указать диапазон неразрушающих напряжений эксплуатации материала при $T \leq T_c$ (T_c – температура стеклования). Показано, что с помощью нанодисперсных металлов можно направленно регулировать релаксационный спектр систем, а соответственно и область работоспособности материала в динамическом механическом поле. В исследованном диапазоне частот ПС, ПММА, ПВХ-системы ведут себя «классически» до частоты деформации 60 с^{-1} , а при $(60 < \nu \leq 140) \text{ с}^{-1}$ и содержании наполнителя $0 \leq \varphi \leq 0,1$ об.% увеличиваются прочностные свойства, а также уменьшается удлинение материала. С помощью ИКС установлено два вида взаимодействия между полимерной матрицей и поверхностью наполнителя: образование комплексов и помехи образованию водородных связей. Показано, что по мере повышения температуры системы величина относительного изменения динамического модуля Юнга и сдвига нелинейно возрастает, однако при увеличении содержания нанонаполнителя в системе, равно как и частоты действия внешнего механического поля, – уменьшается. Максимальная величина диссипации энергии механических колебаний систем зависит от степени демпфирования и носит резонансный характер.

МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ОСАЖДЕНИЯ НАКИПИ В ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ С МАГНИТНОЙ ОБРАБОТКОЙ ВОДЫ

Кошоридзе С.И., Левин Ю.К.

ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва, Россия

Уточнены известные результаты расчета характеристик коллоидных наносистем при воздействии магнитного поля. Учтено, что процесс осаждения молекул солей накипи на стенку теплообменника протекает по другим законам, чем их выпадение на частицах взвеси в объеме водного потока. При этом интенсивность процесса массопереноса из раствора на взвесь на четыре порядка больше, чем на стенку, что является важным фактором снижения накипи.

Также учтен размерный эффект, характерный для поведения нанообъектов. Существо указанного эффекта состоит в уменьшении коэффициента поверхностного натяжения на границе твердой и жидкой фаз. Это приводит к увеличению концентрации критических зародышей по экспоненциальному закону и также принимает участие в формировании противонакипного эффекта. Из сравнения результатов расчета с экспериментом оценена величина параметра Толмена, характеризующего толщину переходного слоя для зародышей CaCO_3 в воде, что представляет самостоятельный научный интерес.

ПРОТИВОНАКИПНАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВВОДА ЗАТРАВОЧНЫХ КРИСТАЛЛОВ

Кошоридзе С.И., Левин Ю.К.

ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва, Россия

Для борьбы с накипью на теплопередающих поверхностях при термическом опреснении морской воды и переработки минерализованных сточных вод успешно применяют метод ввода затравочных кристаллов. Исследования, связанные с применением магнитных аппаратов для таких же целей показали, что при определенных условиях эти устройства генерируют затравочные кристаллы накипеобразователя. Следствием этого процесса является снижение накипеобразования в теплообменнике, использующим воду, прошедшую через магнитный аппарат.

В настоящей работе предложена усовершенствованная модель взаимодействия затравочных кристаллов с молекулами растворенных солей накипеобразователя в потоке воды внутри теплообменной трубы. В частности, учтено, что процесс осаждения молекул солей накипи на стенках теплообменника протекает по другим законам, чем их выпадение на частицах затравки в объеме водного потока; эффект снижения накипи исследован в при различных функциях распределения кристалликов по размерам и разным температурах. Работа имеет практический интерес для инженерно-технических работников, применяющих данный способ предотвращения накипи.

СРАВНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДЕТОКСИКАЦИИ БИОЖИДКОСТЕЙ МЕТОДАМИ ФИЛЬТРАЦИИ И МАГНИТОСОРБЦИИ

Кошоридзе С.И., Левин Ю.К.

ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва, Россия

Учтено, что процесс осаждения молекул вредных соединений на поглощающей поверхности пор в объеме пористого фильтра протекает по другим законам, чем захват этих молекул частицами взвешенного сорбента в объеме потока биожидкости. При этом интенсивность процесса массопереноса вредных молекул из раствора на взвешенные частицы магнитного сорбента может при определенных условиях быть существенно больше, чем на поверхность пор в объеме пористого фильтра, что является важным фактором снижения концентрации вредных веществ в потоке биожидкости. Проведено сравнение эффективности 2 методов экстракорпоральной детоксикации:

- с использованием фильтрующих пористых поглотителей,
- с применением взвешенных частиц магнитоуправляемого сорбента.

Показано, что перспективность метода детоксикации биожидкостей с использованием взвешенных частиц магнитоуправляемого сорбента предпочтительна не только отсутствием травмирующего влияния на клеточные структуры, но и принципиально большей эффективностью процесса сорбции молекул вредных соединений.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЙ В ИМПУЛЬСНОЙ ГИПЕРЗВУКОВОЙ АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ ТРУБЕ

Левин В.А., Мануйлович И.С., Марков В.В.

Институт механики МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

Представлены результаты численного моделирования течений в импульсной гиперзвуковой аэродинамической трубе при обтекании воздухом установленных внутри нее тел сложной формы, а также при обтекании и горении твердотопливной шашки. Исследование проводится численным методом, основанным на схеме С.К.Годунова и реализованном в оригинальном программном комплексе. Для выявления основных особенностей течений была рассмотрена идеальная осесимметричная модель, у которой форма и размеры элементов соответствовали реальной установке.

При моделировании реализованы 4 различные конфигурации установки: 1) без установленных внутри нее тел; 2) с установленным по центру осесимметричным телом специальной формы; 3) с осесимметрично установленным круговым цилиндром; 4) с осесимметрично установленной цилиндрической твердо-топливной шашкой.

Во всех конфигурациях получена сложная, сильно нестационарная структура течения с множеством ударных волн, взаимодействующих друг с другом и со стенками аэродинамической трубы, с периодически повторяющимися эффектами кумуляции вблизи оси симметрии. На рис.1 представлено рассчитанное поле температуры на начальной фазе истечения при обтекании заостренного тела сложной формы.

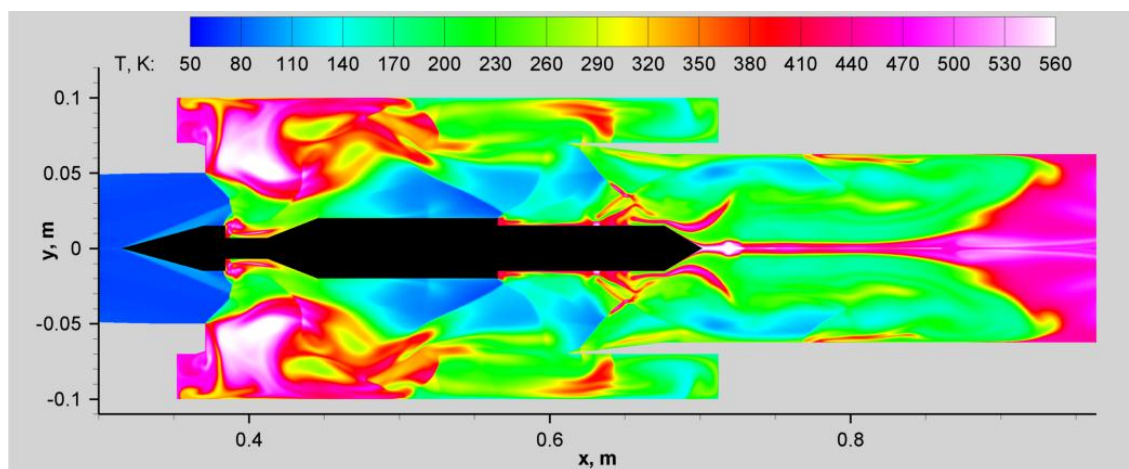


Рис.1. Следы тройных точек на поверхности и внутри круглой трубы, закрытой с одного конца, возникающие при распространении вдоль нее волны детонации.

Расчеты обтекания горящей твердотопливной шашки сверхзвуковым воздушным потоком показали, что через непродолжительное время ударная волна и воздушный поток, приходящие из форкамеры, сначала сильно деформируют область, занимаемую продуктами горения, а затем сильно сносят продукты вниз по потоку.

Все расчеты проводились на суперкомпьютере «Ломоносов» с использованием 470-500 процессорных ядер в параллельном режиме.

Работа поддержана РФФИ (проекты № 11-01-00068-а, № 11-01-1243-офи-м), Министерством Образования и Науки (проект НШ-5911.2012.1, МК-3355.2012.1) и Программами фундаментальных исследований РАН.

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЗВУКА НИЗКИХ ЧАСТОТ В ВОДЕ С ГЕЛИЕВЫМИ ПУЗЫРЯМИ

Левин Ю.К., Попов В.В.

ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва, Россия

Рассмотрены эксперименты, проведенные на гидроакустической трубе ИПРИМ РАН, предназначенной для исследования влияния добавок мелких газовых пузырей в жидкие среды на изменение их гидроакустических свойства, в том числе при микроскопических размерах пузырей. Приведены технические характеристики и результаты испытаний установки на гелиевых и воздушных пузырях, подтверждающие её технические характеристики. Предложена новая математическая модель, основанная на гомогенном описании, адекватно отображающая результаты эксперимента по поглощению звука в микропузырьковых средах при малых значениях объемного газосодержания. Показано, что эффект аномально высокого поглощения звука низких по сравнению с резонансной частотой пузырей в пузырьковых средах, может быть объяснен в рамках гомогенной модели пузырьковых сред аномально высоким значением эффективной объемной (второй) вязкости пузырьковой среды.

О ЧИСЛЕННОМ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ РАВНОКАНАЛЬНОГО МНОГОУГЛОВОГО ПРЕССОВАНИЯ АМОРФНОГО ПОЛИМЕРНОГО КОМПОЗИТА В ДВУХПОВОРОТНОМ ШТАМПЕ С ПОДВИЖНОЙ ВЫХОДНОЙ СТЕНКОЙ

Периг А.В.¹, Голоденко Н.Н.²

¹Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск,
Украина

²Донбасская национальная академия строительства и архитектуры, Макеевка,
Украина

Реологически сложное течение аморфных полимерных композитов при осуществлении равноканального многоугольного прессования (РКМУП) в многоугольных сегаловских штампах широко исследуется с 1998 г. в работах Sue Н.-J., Белошенко В.А., Naït-Abdelaziz М. В вязкостном приближении плоскую задачу моделирования РКУП полимеров можно рассматривать в гидродинамической постановке в рамках численного конечноразностного интегрирования уравнений Навье-Стокса в форме уравнения переноса вихря

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = -\mathbf{Re} \left(\frac{\partial(u\zeta)}{\partial x} + \frac{\partial(v\zeta)}{\partial y} \right) + \left(\frac{\partial^2 \zeta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \zeta}{\partial y^2} \right); \quad \zeta = \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x}, \quad (1)$$

где записаны следующие безразмерные величины: ζ – функция вихря; t – время; u, v – составляющие скорости вязкого потока вдоль осей x и y ; x, y – декартовы координаты; $\mathbf{Re}$ – число Рейнольдса. Результаты численного интегрирования краевой задачи (1) представлены на рис.1. На рис.1а видно, что в случае неподвижной выходной стенки de ($\underline{U}_b=0$) в окрестности т. d наблюдается формирование свободной от маркеров симметричной застойной зоны вязкого течения, которая примыкает к cde . На рис.1б теоретически установлено, что в случае переносного движения подвижной стенки de в направлении потока ($\underline{U}_b \uparrow \underline{U}_0$; $\underline{U}_b > 0$) имеет место потеря симметрии и существенное увеличение застойной зоны течения в т. d , а в случае движения подвижной стенки de навстречу вязкому потоку на рис.1в ($\underline{U}_b \downarrow \underline{U}_0$; $\underline{U}_b < 0$) имеет место минимизация размеров застойной зоны течения в т. d . Т.о. результаты численного гидродинамического моделирования позволяют сформулировать рациональные технологические рекомендации по выбору режимов для РКМУП аморфных и аморфно-кристаллических полимерных композитов, которые обеспечивают минимизацию геометрических размеров застойной зоны вязкого течения в двухповоротном сегаловском штампе с подвижной выходной стенкой de (рис.1).

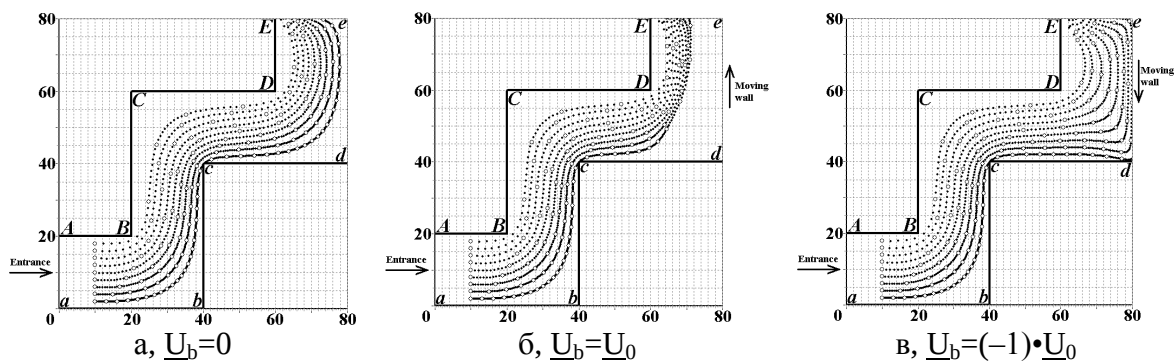


Рис.1. Расчетные линии тока для размерной характерной скорости РКМУП $\underline{U}_0=270$ мкм/с для следующих режимов прессования: стенка de неподвижна (а), стенка de движется в направлении вязкого потока со скоростью $\underline{U}_b=\underline{U}_0$ (б), стенка de движется навстречу потоку со скоростью $\underline{U}_b=(-1)\cdot\underline{U}_0$ (в)

НЕСТАЦИОНАРНОЕ ТЕЧЕНИЕ В ПОРИСТОМ МАТЕРИАЛЕ

Саваторова В.Л.¹, Талонов А.В.¹, Власов А.Н.²

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Россия

²ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва, Россия

В данной работе исследуется процесс фильтрации вязкого сжимаемого баротропного вещества в недеформируемой среде, структура пор в которой предполагается периодической. В постановке задачи используется уравнение движения (1), дополненное уравнением неразрывности (2), граничным условием прилипания (3) и баротропным соотношением (4). В качестве уравнения движения используется обобщение уравнения Бринкмана [1-3] на случай возможного нестационарного течения, принимающее во внимание нелинейные эффекты, связанные с зависимостью коэффициентов вязкости и трения от давления.

$$-\text{grad } p + \mu(p) \Delta \mathbf{v} + (\lambda(p) + 2\mu(p)) \text{grad div } \mathbf{v} - \alpha(p) \mathbf{v} = \rho \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \text{ grad}) \mathbf{v} \right) \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (2)$$

$$\mathbf{v}|_G = 0 \quad (3)$$

$$f(p, \rho) = 0 \quad (4)$$

Для решения уравнений, описывающих просачивание сквозь среду с периодической структурой пор, используется метод асимптотического усреднения Н.А.Бахвалова. Возможность применения метода усреднения обеспечивается выполнением условия пространственного разделения масштабов, согласно которому в гетерогенной среде могут быть выделены такие характерные масштабы: микромасштаб (размер пор l) и макромасштаб (глобальный размер L), что будет справедливым соотношением $\varepsilon \sim l/L < 1$.

Эффективный тензор проницаемости определяется в ходе решения соответствующих задач на ячейке периодичности и их последующего усреднения. Исследуется эффект нелинейности, связанной с зависимостью коэффициентов вязкости и трения от давления. Распределения скорости и давления в нулевом приближении находятся путем решения усредненного макроскопического уравнения. Исследуется влияние на них различных видов баротропных соотношений между плотностью и давлением.

Литература:

1. Brinkman H.C. On the permeability of media consisting of closely packed porous particles // Appl.Scient.Res. A 1. – 1947. – P.81-86.
2. Savatorova V.L., Rajagopal K.R. Homogenization of a generalization of Brinkman's equation for the flow of a fluid with pressure dependent viscosity through a rigid porous solid // ZAMM. – 2011. – Vol.91. – N8. – P.630-648.
3. Саваторова В.Л., Талонов А.В., Власов А.Н. Усреднение уравнений фильтрации Бринкмана в слоистой пористой среде // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2010. – Т.16. – №4. – С.483-502.

ЭЛЕКТРОРЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СУСПЕНЗИЙ НА ОСНОВЕ НАНОРАЗМЕРНЫХ ЧАСТИЦ ПОЛИИМИДОВ

Семенов Н.А., Сидорова Г.Я., Юмашев О.Б., Гусева М.А., Яновский Ю.Г.

ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва, Россия

Электрореологические суспензии (ЭРС) относятся к числу, так называемых, «умных материалов», реологические и механические свойства которых (вязкость, предел текучести, модуль сдвига, и др.) могут резко изменяться под воздействием прикладываемого внешнего электрического поля [1].

Разработка принципов и методологии получения нового поколения электроуправляемых реологических материалов и суспензий с наноразмерной дисперсной фазой на их основе, исследование их электрофизических, физико-химических и реологических свойств, а также моделирование их поведения в условиях близких к практическим задачам является важной и актуальной научной задачей [2].

Впервые получены и охарактеризованы электрореологические свойства нового поколения ЭР суспензий с дисперсной фазой на основе наноразмерных частиц полиимида (рис.1).

Установлено, что ЭРС, полученные на основе наноразмерных частиц полиимидов, обладают мощным электрореологическим откликом в десятки раз превышающим электрореологический эффект ЭРС на основе микроразмерных частиц дисперсной фазы – например, оксида титана и крахмала.

На основе температурных испытаний установлено влияние температуры на изменение реологических и электрореологических свойств ЭР суспензий на основе наноразмерного полиимида в постоянных электрических полях. Отмечена слабая зависимость от температуры, что указывает на низкие диссипативные потери при деформировании.

Литература:

1. Hao T. Electrorheological fluids // Adv. Mater. – 2001. – Vol.13. – P.1847-1852.
2. Yu.G. Yanovsky, E.A. Nikitina, Yu.N. Karnet, S.M. Nikitin Smart materials with electrically controlled properties. Electrorheological suspensions with a nanosized polymeric disperse phase. Part 1. Quantum mechanical modeling of the electrorheological effect // Nanomechanical Science and Technology: An International Journal. – 2011. – Vol.2. – N2. – P.145-166.

ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТОРЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СУСПЕНЗИЙ НА ОСНОВЕ МАГНЕТИТА В УСЛОВИЯХ НЕСТАЦИОНАРНОГО ЦИКЛИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ

Шалашилин А.Д., Семенов Н.А., Данилин А.Н.

ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва, Россия

Исследование реологических свойств вязких сред предполагают установление зависимостей напряжений сдвига (τ), вязкости (η) и иных параметров от скорости сдвига ($\dot{\gamma}$) или времени. Для этого в экспериментах используют различные методы и устройства вискозиметрии, ограничиваясь лишь измерениями параметров в предписанном диапазоне изменения $\dot{\gamma}$. Как правило, этот диапазон соответствует максимально возможным значениям степеней свободы устройства, где предполагается использовать вязкие среды.

В реальных устройствах, где используются вязкие жидкости в качестве рабочего тела, условия эксплуатации являются циклическими и нестационарными. В этом случае в экспериментах необходимо получить серию функциональных зависимостей (например, кривых течения $\tau(\dot{\gamma})$) в результате циклического изменения $\dot{\gamma}$. Каждому циклу соответствует пара кривых, одна из которых описывает процесс «нагрузки» при возрастании $\dot{\gamma}$, другая – процесс «разгрузки» при уменьшении $\dot{\gamma}$. Эти кривые формируют петлю гистерезиса, площадь которой пропорциональна энергии для разрушения структуры вязкой среды [1]. Эксперименты показали, что в результате совершения определенного числа циклов форма гистерезисных кривых может приближаться к некоторой гипотетической петле, характеризующей установление (стабилизацию) процесса.

Начальная точка (точка «старта») каждого цикла определяется предысторией нестационарного процесса. Она может находиться в любой точке пространства изменений исследуемых параметров. В экспериментах показано, что зависимости, например, кривые течения, подобны друг другу в асимптотическом смысле, т.е. асимптотически приближаются с изменением $\dot{\gamma}$ к предельным гистерезисным кривым, которые строятся по экспериментальным данным для максимально возможных или допустимых интервалов изменения параметров. Скорость асимптотического сближения зависит от природы реологической среды или устройства, где происходит процесс или производятся измерения.

В работе исследовались магнито-реологические свойства суспензий (МРС) с дисперсной фазой на основе наноразмерных частиц магнетита. Реологические испытания проводились на реоспектрометре RS-150 (HAAKE, Germany) с использованием системы магнитов (NdFeB), создающих магнитное поле различной напряженности в рабочем объеме узла «плоскость-плоскость».

В результате экспериментов получена серия экспериментальных кривых течения $\tau = \tau(\dot{\gamma})$ в условиях нестационарного циклического нагружения при различных значениях напряженности внешнего магнитного поля.

Для математического описания течения МРС предложен феноменологический подход с использованием кинематического дифференциального уравнения вида [2-4]

$$\frac{d\tau}{d\dot{\gamma}} = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^m C_{ij} \dot{\gamma}^{i-1} \tau^{j-1},$$

где коэффициенты C_{ij} определяются методами приближения, минимизируя невязку аналитического представления $d\tau/d\dot{\gamma}$ в виде правой части уравнения к множеству

значений $d\tau/d\dot{\gamma}$, полученных из экспериментов для предельных циклов. Числа k и m подбираются в результате простых численных экспериментов. Значения этих параметров определяют характер (скорость) асимптотического приближения решения с начальной точкой $(\dot{\gamma}_0, \tau_0)$ во внутренней или внешней окрестностях гистерезиса к кривой предельного цикла.

Для построения последовательностей точек $(\dot{\gamma}_i, (d\tau/d\dot{\gamma})_i)$, по которым будут определяться коэффициенты C_{ij} , можно воспользоваться конечно-разностным выражением $(\tau_i - \tau_{i-1})/(\dot{\gamma}_i - \dot{\gamma}_{i-1})$. Однако таким способом пользоваться нельзя, если экспериментальных точек мало, или если измеряемые величины имеют сильный разброс своих значений. В работе предлагается использовать аналитическую аппроксимацию $\tau(\dot{\gamma})$ по измеренным значениям, например, методом наименьших квадратов. Дифференцирование полученной аппроксимации даёт численно устойчивый набор приближённых значений $(\dot{\gamma}_i, (d\tau/d\dot{\gamma})_i)$.

На основе экспериментально полученных предельных кривых течения МРС представлена реологическая модель, учитывающая нестационарность циклического нагружения при различных значениях напряженности внешнего магнитного поля. Даны различные варианты истории нагружения и точки начала (старта) циклического процесса.

Литература:

1. Шрам Г. Основы практической реологии и реометрии. – М.: «Колосс». 2003. – 312 с.
2. Данилин А.Н., Козлов К.С. Моделирование колебаний многочастотного гасителя вибрации с учётом гистерезиса диссипации энергии / Труды IX Всероссийской научной конференции им. Ю.И. Неймарка «Нелинейные колебания механических систем». – Нижний Новгород, 24-29 сентября 2012 г. – С.320-329.
3. Данилин А.Н., Яновский Ю.Г., Семёнов Н.А., Шалашилин А.Д. Кинематическая модель реологического поведения неньютоновских жидкостей в условиях нестационарного циклического нагружения. // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2012. – Т.18. – №3. – С.369-383.
4. Данилин А.Н., Шалашилин А.Д. Разработка гасителя низкочастотных колебаний с использованием магнитоуправляемых жидкостей / Материалы VII международной конференции по неравновесным процессам в соплах и струях (NPNJ 2010). – МАИ ПРИНТ, 2010. – С.479-480.

Секция 3

Проблемы горения и детонации сложных сред

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИНГЕР-ЭФФЕКТА ПРИ ФИЛЬТРАЦИОННОМ ГОРЕНИИ

Алдушин А.П., Ивлева Т.П.

*ФГБУН Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения РАН,
г. Черноголовка, Россия*

В работе [1] было показано, что плоский фронт выгорания топлива в пористой среде при фильтрации окислителя может быть неустойчивым и принимать конфигурацию фингера, наблюдающегося при вытеснении маловязкой жидкостью сильновязкой жидкости в плоском канале [2].

Данный результат был получен в рамках гидродинамического приближения, пренебрегающего шириной зоны горения по сравнению с шириной канала.

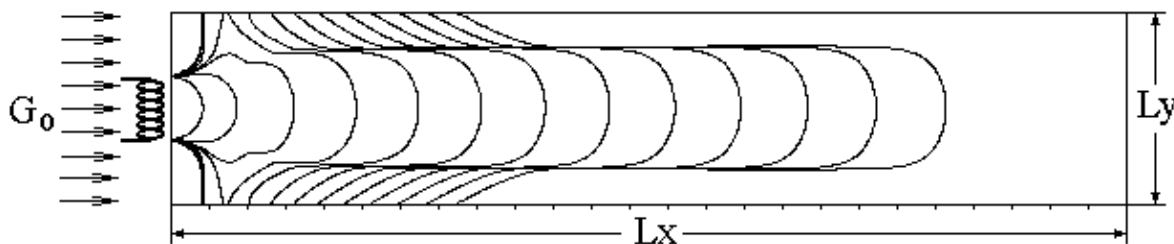
В настоящей работе проведено численное моделирование распространения волны фильтрационного горения в пористой среде с учетом теплодиффузионных и кинетических факторов, определяющих реально конечную ширину зоны горения.

Математическая модель процесса включала уравнения баланса тепла и массы твердых и газообразных реагентов, скорость фильтрации газа определялась по закону Дарси. Задача рассматривалась в плоской геометрии, имитирующей тонкий щелевидный канал, заполненный пористой средой, содержащей топливную компоненту. Рассматривался наиболее важный для практики вариант

подачи окислителя во фронт реакции через продукты сгорания. В качестве граничного условия на входе в канал задавался равномерный по сечению постоянный поток газа G_0 в направлении распространения фронта.

Проведенные расчеты показали, что при определенных условиях плоский фронт горения искривляется и принимает форму фингера. В частности, такой эффект возникает в том случае, когда проницаемость среды увеличивается вследствие выгорания топлива.

На приведенном рисунке показана эволюция фронта горения инициированного центральным источником поджигания.



Литература:

1. Aldushin A.P., Matkowsky B.J. // Comb.Sci.and Tech. – 1998. – Vol.133. – P.293-341.
2. Saffman P.G., Taylor G.I. / Proc. Roy. Soc. – 1958. – A245. – P.312-329.

РАЗРАБОТКА МОДУЛЯ РАСЧЕТА ПЛОСКИХ ДЕТОНАЦИОННЫХ ТЕЧЕНИЙ В СИСТЕМЕ ANSYS FLUENT

Бедарев И.А., Федоров А.В., Ульзутуева К.В.

*ФГБУН Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича
СО РАН, г. Новосибирск, Россия*

На основе детальных и приведенных кинетических механизмов неравновесных химических превращений в рамках прикладного пакета ANSYS Fluent создана математическая технология для описания распространения ячеистой детонации в каналах технических устройств. Цель работы – определение влияния неравновесных химических превращений на передачу размера детонационной ячейки в водород-кислородной смеси с использованием детальных и приведенных кинетических механизмов и получение других количественных характеристик изучаемого явления. В качестве математической модели использована модель неравновесной газовой динамики (уравнения Эйлера, дополненные блоком уравнений неравновесной химической кинетики). Для описания химических превращений в водород-кислородной смеси использовалась как приведенная одностадийная кинетика, позволяющая, тем не менее, описать и воспламенение и горение компонентов, так и детальный кинетический механизм, верифицированный в [1] по временам задержки воспламенения и в [2] по скорости детонационной волны в зависимости от разбавления смеси аргоном. Эта кинетическая схема учитывает 38 прямых и обратных реакций для 8-ми компонентов. Математическая технология верифицирована на основе экспериментальных данных по скорости детонационной волны в зависимости от разбавления смеси аргоном и размеру ячеистой структуры детонационной волны. Показано, что в случае ширины канала равном 30 мм в смеси на 92 % разбавленной аргоном размер ячейки соответствует экспериментальным данным [3]. В двумерной постановке проведен расчет процесса подавления ячеистой детонации инертным пористым фильтром. Полученные в двумерном расчете данные коррелируют с оценками, приведенными в одномерных расчетах.

Литература:

1. Бедарев И.А., Федоров А.В. Сравнительный анализ трех математических моделей воспламенения водорода // Физика горения и взрыва. – 2006. – Т.42, – №1. – С.26-33.
2. Тропин Д.А. Федоров А.В., Бедарев И.А. Математическое моделирование подавления детонации водород-кислородной смеси инертными частицами // Физика горения и взрыва. – 2010. – №3. – Т.46. – С.103-115.
3. Strehlow R.A., Liangminas R., Watson R.H., Eyman J.R. Transverse wave structure in detonations / 11th Symp. Int. Combust. Proc. – 1967. – P.683-692.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПОДЖИГА И СТАБИЛИЗАЦИИ ПЛАМЕНИ КЕРОСИНО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ ОБЪЕМНЫМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ РАЗРЯДОМ

Великодный В.Ю.^{1,2}, Гусева М.А.¹, Дыренков А.В.², Попов В.В.¹, Садовин М.А.¹,
Семенов П.Е.¹, Яновский Ю.Г.¹

¹ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва, Россия

²ФГБУН Объединенный институт высоких температур РАН, г. Москва, Россия

Данная работа посвящена экспериментальному исследованию процессов горения и стабилизации пламени с добавкой в исходное топливо присадок наночастиц – нанотрубок и графена, с использованием высоковольтного электрического разряда для поджига и поддержания пламени.

Углеродные нанотрубки были получены каталитическим пиролизом ацетилена на нанокластерах железа или кобальта в матрице из оксида алюминия. Нанотрубки имеют структуру переплетенных клубков диаметром более 2 мкм со средним внешним диаметром ~20-30 нм.

Графен получен химическим способом, заключающимся в окислении слоев графита с последующим восстановлением и получением нанометровых слоев углеродного продукта. Частицы графена имеют слоистую структуру с размером зерен ~400 нм.

Для данного исследования создана экспериментальная установка с двухконтурной системой подачи топлива. По первому контуру поступает основной поток барботированного топлива. По второму – суспензия керосина и наночастиц. Смешанное топливо распыляется в высокоскоростном газовом потоке. Инициация горения осуществляется с помощью объемного разряда, полученного с помощью конденсаторно-трансформаторного источника питания.

В первой серии экспериментов задействован только первый контур подачи топлива. Обнаружено возникновение объемного электрического разряда в керосино-воздушной среде, идущего через пламя. Зафиксировано уменьшение времени задержки воспламенения и стабилизация пламени.

Во второй серии экспериментов задействованы оба контура системы подачи топлива.

Исследован химический состав пламени с помощью спектральных методов в различных случаях. Сделан анализ результатов.

К ТЕОРИИ ДВИЖЕНИЯ И ГОРЕНИЯ ТУРБУЛЕНТНЫХ СТРУЙ В СНОСЯЩЕМ ПОТОКЕ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ

Воротилин В.П.

ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва, Россия

Теоретически исследованы гидродинамика и процессы горения турбулентных струй горючего газа в сносящем потоке внешней воздушной среды. Исходя из фактов существования четкой границы раздела между турбулентной струей и обтекающего ее внешнего потока окислителя – воздуха предложен механизм крупномасштабного захвата внешней среды и на его основе получено уравнение баланса «турбулентной» жидкости, замкнувшее систему уравнений движения и горения турбулентных струй. Правомерность физических предпосылок теории смешения реагентов на границах турбулентных струй нашла подтверждение при сравнении результатов расчета с имеющимися опытными данными для ряда частных случаев горения турбулентных струй. [1,2]. Рассмотрены различные варианты горения турбулентных струй с учетом ряда усложняющих гидродинамических и физико-химических факторов движения и горения. В частности, учтены эффекты излучения, внешней турбулентности, различных вариантов смешения реагентов и добавок инертных газов. Рассчитаны траектории струй, вытекающих под различными углами в сносящий поток внешнего газа, кривые зависимости параметров движения и горения вдоль траектории струи (средней скорости, температуры и т.д. по сечению струи). В теории отсутствуют эмпирические корреляции и подгоночные константы. Это дает основание утверждать, что выводимые на ее основе закономерности горения должны обладать предсказательной силой и поэтому могут с одной стороны стимулировать осмысленную постановку экспериментальных исследований, а с другой сократить число необходимых опытов для выяснения конкретных особенностей процесса горения.

Литература:

1. *Полежаев Ю.В., Воробьев Б.А., Коровин Г.К.* Экспериментальное исследование длины свободного диффузионного факела горючих газов, разбавленных инертными газами // ИФЖ. – 2010. – Т.83. – №2. – С.298-303.
2. *Hasselbrink E.E., Mungal M.G.* Transverse jets and jet flames. Part 2 // J.Fluid Mech. – 2001. – Vol.443. – P.27-68.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСЛОВИЙ ДИФфуЗИОННОГО ВОСПЛАМЕНЕНИЯ ВОДОРОДА

Головастов С.В., Бочарников В.М., Ленкевич Д.А., Бакланов Д.А., Голуб В.В.

ФГБУН Объединенный институт высоких температур РАН, г. Москва, Россия

Экспериментально изучены особенности диффузионного самовоспламенения водорода при импульсном истечении из камеры высокого давления в канал с воздухом. Импульсное истечение осуществлялось из сосуда высокого давления вследствие разрыва диафрагмы. Водород смешивался на контактной границе с воздухом. При этом необходимая температура воспламенения водорода достигались за счет нагрева воздуха создаваемой ударной волной, возникающей вследствие нестационарного истечения водорода из камеры высокого давления.

Сконструированный специально для данных исследований экспериментальный стенд состоял из сосуда высокого давления 1, наполняемого водородом; канала прямоугольного или круглого сечения 2, наполненного воздухом; системы подачи сжатого водорода 3. Внезапная разгерметизации сосуда высокого давления с последующим импульсным истечением водорода в канал моделировалась распадом произвольного разрыва, происходящим при разрыве медной диафрагмы 4. Экспериментальная X-t-диаграмма распространения ударной волны SW, фронта пламени FF и контактной поверхности CS также представлена на рис.1.

Показано влияние длительности раскрытия диафрагмы на возможность воспламенения струи водорода. Определены задержки воспламенения водорода при истечении в канал. Экспериментально определена зависимость задержки воспламенения от длительности раскрытия диафрагмы. Обнаружена зависимость задержки воспламенения от наличия примеси метана (рис.2).

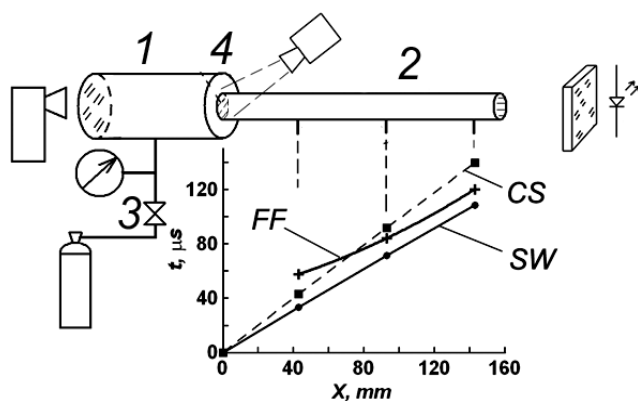


Рис.1. Схема экспериментального стенда и X-t-диаграмма самовоспламенения водорода.

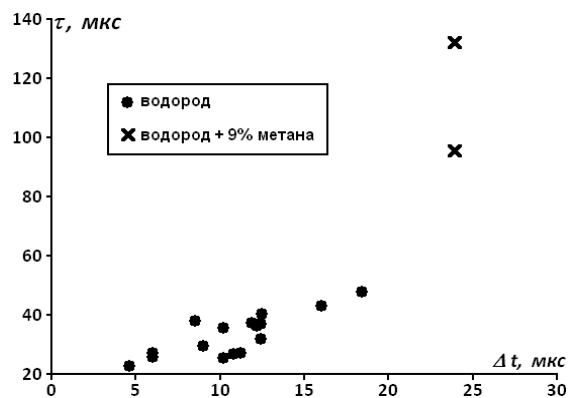


Рис.2. Зависимость задержки воспламенения от длительности раскрытия диафрагмы.

Обнаружены пределы самовоспламенения водорода за ударной волной в перфорированном канале. Обнаружены предельные значения чисел Маха ударной волны, при которых самовоспламенения становится возможным или невозможным. Получена зависимость предельного числа Маха приводящего к воспламенению водорода в зависимости от расположения отверстий в канале.

РАЗРАБОТКА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ МЕТОДОВ ПОЛУЧЕНИЯ ДЕТОНАЦИИ В КАНАЛАХ СУБКРИТИЧЕСКОГО ДИАМЕТРА

Голуб В.В., Иванов К.В., Бакланов Д.И., Головастов С.В.

ФГБУН Объединенный институт высоких температур РАН, г. Москва, Россия

Экспериментально определены механизмы, обеспечивающие переход горения в детонацию (ПГД) в каналах с субкритическим диаметром. Определено влияния времени сгорания газа в форкамере (длительности поршневого эффекта) и начальной скорости пламени на режим ПГД и длину перехода в детонацию в субкритическом канале.

Экспериментально получен переход горения в детонацию и динамика скорости фронта пламени в водородно-воздушной смеси в канале диаметром меньше критического диаметра распространения стационарной детонации Чепмена-Жуге для различных энергий, выделяющейся в форкамере вследствие сгорания горючей смеси.

Обнаружено, что в зависимости от энергии, выделяющейся в форкамере, переход горения в детонацию может происходить по трем различным сценариям. При увеличении энергии в форкамере немонотонный характер ускорения фронта пламени с двумя локальными максимумами меняется на режим с одним локальным максимумом и затем ускорение пламени становится монотонным. Дальнейшее увеличение энергии перестает оказывать влияние на преддетонационное расстояние.

Впервые экспериментально получен переход горения в детонацию и динамика скорости фронта пламени в метано-кислородной смеси в канале с околокритическим диаметром для значений стехиометрического коэффициента больше 0,33.

Определены пороговые энергии режима ПГД с немонотонным ускорением пламени в метано-кислородной смеси с $ER = 0,33$ для форкамер различного диаметра. В зависимости от энергии, выделяющейся в форкамере, переход горения в детонацию происходил по двум различным сценариям. При увеличении энергии в форкамере немонотонный характер ускорения фронта пламени сменялся монотонным, при котором преддетонационное расстояние переставало зависеть от энергии в форкамере.

Получена закономерность влияния времени сгорания горючей смеси в форкамере на режим ПГД в канале диаметром меньше критического диаметра распространения стационарной детонации Чепмена-Жуге.

Предложен критерий для определения эффективности влияния форкамеры на ПГД в субкритических каналах, учитывающий энергосодержание в форкамере ($E_{хим}$); время сгорания смеси в форкамере ($t_{гор}$) и относительное расстояние пройденное фронтом пламени в форкамере (L/D). Входящие в него параметры нормированы на критическую энергию инициирования детонации ($E_{кр}$), которая характеризует детонационную способность смеси, время индукции самовоспламенения ($t_{инд}$), определяющее химическую активность смеси и диаметр форкамеры. Критерий позволяет учесть состав горючей смеси и конструктивные особенности форкамеры чтобы оценивать ее эффективность в различных условиях, а также оптимизировать конструкцию.

АКУСТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТЬЮ И ТОКСИЧНОСТЬЮ СГОРАНИЯ ГАЗОВЫХ ТОПЛИВ

Голуб В.В., Кривокорытов М.С.

ФГБУН Объединенный институт высоких температур РАН, г. Москва, Россия

Известно, что акустическое поле влияет на пламя, создавая неустойчивости и меняя форму пламени. Звуковые волны взаимодействуют с огнем как непосредственно, так и косвенно. Прямое взаимодействие между волнами и огнем происходит в зоне пламени, тогда как косвенное взаимодействие происходит в области потока, независимо от особенностей пламени, и вызывает флуктуацию скорости, колебания или устойчивое течение потока [1]. В результате исследований влияния акустических колебаний на диффузионное горение метана [2], был обнаружен эффект бифуркации пламени.

При диаметре струи горючего газа (метана) 1,25 мм бифуркация наблюдается в широком частотном диапазоне 1,5-4,5 кГц. Также в результате исследований был обнаружен эффект снижения выхода токсичных продуктов горения под действием акустических колебаний. На резонансной частоте воздействия 3,0 кГц и уровне звукового давления 110 dB концентрация сажи снижается на 30%, а концентрация NO_x на 50%.

Бифуркация факела вызвана делением струи нереагирующего метана. Исследованию влияния начальных условий на срезе сопла на структуру течения и устойчивость струй посвящен ряд работ [3]. Однако в этих работах наблюдалось биение струй и развитие вихревых структур под действием звука частотой до 100 Гц, что не дает возможности объяснить природу явления бифуркации, поэтому настоящая работа посвящена визуализации газовых струй под действием звука в широком частотном диапазоне. В связи с этим было предпринято исследование устойчивости течения газовых микроструй под действием звука (рис.1).

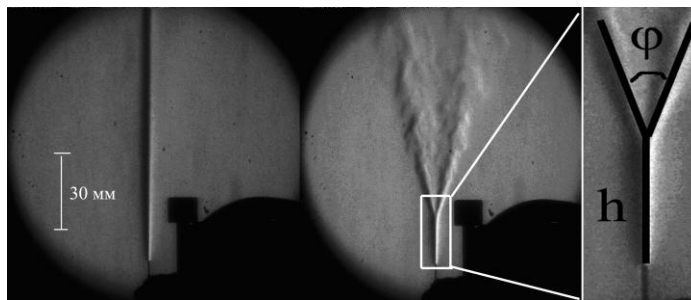


Рис.1. Теневые фотографии струи гелия: слева – в отсутствии звука, справа – под действием звука 1700 Гц, 80 дБ.

Литература:

1. Kwang-Hua Chu Stability of acoustic streaming flows in plane channels // Physical review. E. – 2003. – Vol.68. – P.046305.
2. Masataro Suzuki and et. Fluid-dynamical characteristics of bifurcating jet inside diffusion flame under transverse acoustic excitation / 22nd ICDERS. – Minsk, Belarus, 2009.
3. Грек Г.Р., Козлов В.В., Козлов Г.В., Литвиненко Ю.А. Влияние начальных условий на срезе сопла на структуру течения и устойчивость плоской струи // Вестник НГУ. Серия: Физика. – 2008. – Т.3. – Вып.3. – С.14-33.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СМЕШЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ВОЗДУШНЫХ ПОТОКОВ СО СТРУЯМИ, ИМИТИРУЮЩИМИ ГЕНЕРАТОРНЫЕ ГАЗЫ В КАМЕРЕ ДОЖИГАНИЯ РПД

Захаров Н.Н.^{1,2}, Лисин Д.Г.¹, Шаров М.С.²

¹*ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва, Россия*

²*ФГУП Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова,
г. Москва, Россия*

С использованием вычислительной базы «Флюинт» построена модель смешения газов при пересечении струй, формируемых газогенератором твердого или пастообразного топлива, со струями, поступающими из воздухозаборника.

Просчитаны различные варианты размещения выхлопных дюз газогенератора относительно оси потока воздухозаборника.

Приведены технические характеристики и результаты математического моделирования установки, а также данные испытаний, подтверждающие адекватность построенной математической модели.

Предложены практические рекомендации по реализации нового типа комбинированного силового устройства - СПВРД сверхзвукового летательного аппарата.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВОЛНЫ ГЕТЕРОГЕННОЙ ДЕТОНАЦИИ, РАСПРОСТРАНЯЮЩЕЙСЯ В ЯЧЕИСТОМ РЕЖИМЕ, С ОБЛАКОМ ИНЕРТНЫХ ЧАСТИЦ

Кратова Ю.В., Федоров А.В.

*ФГБУН Институт теоретической и прикладной механики СО РАН, г. Новосибирск,
Россия*

Вопросы распространения режимов гетерогенной детонации в смесях газов и твердых частиц привлекают значительное внимание исследователей. Это обусловлено как вопросами взрыво-пожаробезопасности запыленных промышленных производств, где велика вероятность возникновения неконтролируемых взрывов, так и использованием околопредельных режимов течений реагирующих смесей в различных технических устройствах, использующих рабочие тела подобного типа. Недостаток фундаментальных знаний о физических процессах, обуславливающих возбуждение, распространение и затухание взрывных и детонационных волн (ДВ) в таких средах, а также о режимах их распространения в различных условиях, ограничивает решение прикладных задач и разработку адекватных современным технологическим условиям технических регламентов.

Объектом исследования в данной работе является взаимодействие гетерогенной ячеистой детонационной волны с облаком химически инертных частиц. Рассматривается плоский канал, заполненный однородной стехиометрической монодисперсной смесью кислорода и мелких реагирующих частиц алюминия, а также частично облаком инертных частиц глинозема (Al_2O_3). Слева направо по части канала, свободной от инертных частиц, распространяется волна в режиме развитой ячеистой детонации. В определенный момент времени ДВ достигает облако инертных частиц и начинается ее взаимодействие с ним, что оказывает влияние на параметры последующего течения. Цель исследования – определить картину течения в смеси реагирующей и нереагирующей газовзвеси, выявить влияние параметров инертной компоненты дискретной фазы на режимы распространения детонации.

Анализ полученных результатов, позволил выделить три режима распространения гетерогенной ячеистой детонации при ее подавлении. Показано влияние таких параметров инертного облака, как объемная концентрация и диаметр частиц на режимы распространения и затухания ДВ. Оказалось, что неоднородное распределение частиц в поперечном направлении может играть значительную роль в процессах подавления детонации. Определена критическая длина облака, достаточная для подавления детонационного процесса. Получено, что критическая длина облака, достаточная, для подавления процесса ячеистой детонации, как минимум в два раза превышает аналогичную величину, полученную для детонации Чепмена-Жуге.

СТАБИЛИЗАЦИЯ ДЕТОНАЦИИ В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ ВОДОРОДНО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ В ПЛОСКИХ КАНАЛАХ

Левин В.А.¹, Журавская Т.А.²

¹Дальневосточный Федеральный Университет, г. Владивосток, Россия

²НИИ механики МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

С использованием детальной кинетики химического взаимодействия численно изучены особенности распространения детонационной волны в сверхзвуковом потоке стехиометрической водородно-воздушной смеси в плоских каналах постоянного и переменного сечения с целью определения условий, обеспечивающих стабилизацию детонации.

Исследовано распространение сформированной детонационной волны в стехиометрической водородно-воздушной смеси, поступающей со сверхзвуковой скоростью в канал переменного сечения. Для различных чисел Маха входящего потока M определены геометрические характеристики канала, обеспечивающие стабилизацию в нем детонационного горения (рис.1).

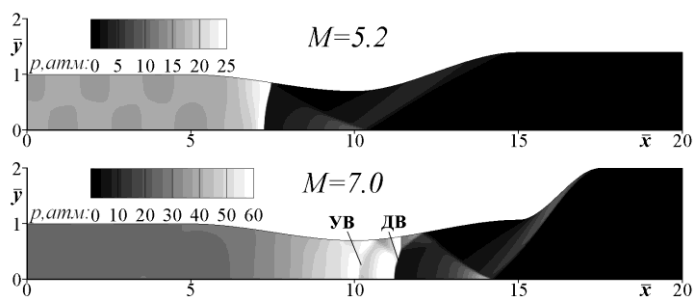


Рис.1. Стабилизация детонации в каналах переменного сечения.

Продолжено изучение стабилизации детонационной волны в сверхзвуковом потоке горючей газовой смеси в плоском канале с параллельными стенками с помощью слабых дополнительных разрядов. Установлена возможность стабилизации детонации разрядами на достаточном удалении от места инициирования волны при скорости потока, существенно превосходящей скорость распространения самоподдерживающейся волны детонации (рис.2). Исследовано влияние числа Маха потока, энергии дополнительных разрядов и их локализации на процесс стабилизации волны детонационного горения.

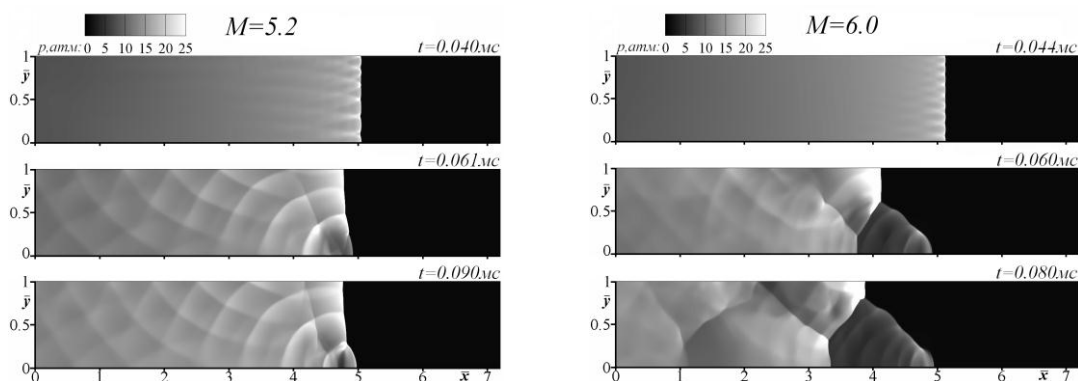


Рис.2. Стабилизация детонации дополнительными разрядами.

Работа поддержана РФФИ (№ 11-01-00068а), Министерством образования и науки РФ (НИИ – 5911.2012.1), программой Президиума РАН. При проведении части исследований был использован суперкомпьютер «Ломоносов» МГУ имени М.В. Ломоносова.

ДЕТОНАЦИЯ В КВАДРАТНОЙ КАМЕРЕ С ПОДВИЖНЫМИ СТЕНКАМИ И ТРЕХМЕРНЫХ КАНАЛАХ КВАДРАТНОГО СЕЧЕНИЯ

Левин В.А., Мануйлович И.С., Марков В.В.

Институт механики МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

Представлены результаты численного моделирования детонации в плоской квадратной камере с подвижными стенками, а также детонации в трехмерных каналах квадратного сечения, продуваемых сверхзвуковыми потоками горючей смеси. Исследование проводится в рамках одностадийной кинетики горения численным методом, основанным на схеме С.К.Годунова, реализованном в оригинальном программном комплексе.

В задаче о формировании детонации в квадратной области с изменяющейся по синусоидальному закону длиной стороны проведено 200 расчетов для различных пар значений амплитуды и периода колебаний. Результаты, полученные в серии расчетов, выявили различные режимы инициирования детонации, разделяемые критическими кривыми. Детонация может не возникать или возникает вдоль всего периметра, в углах или в центре через один или несколько периодов колебаний (в некоторых случаях ≥ 5).

В задаче о формировании детонации в трехмерном канале квадратного сечения переменной площади получены детальные стационарные (рис.1) и нестационарные картины течения с детонацией и без. Получены критические значения газодинамических параметров, разделяющих различные режимы течения. Подтверждена гиперзвуковая аналогия плоских и пространственных течений, позволяющая использовать двумерные решения для оценки параметров трехмерных сверхзвуковых течений. Расчеты трехмерной детонации проводились на суперкомпьютере «Ломоносов».

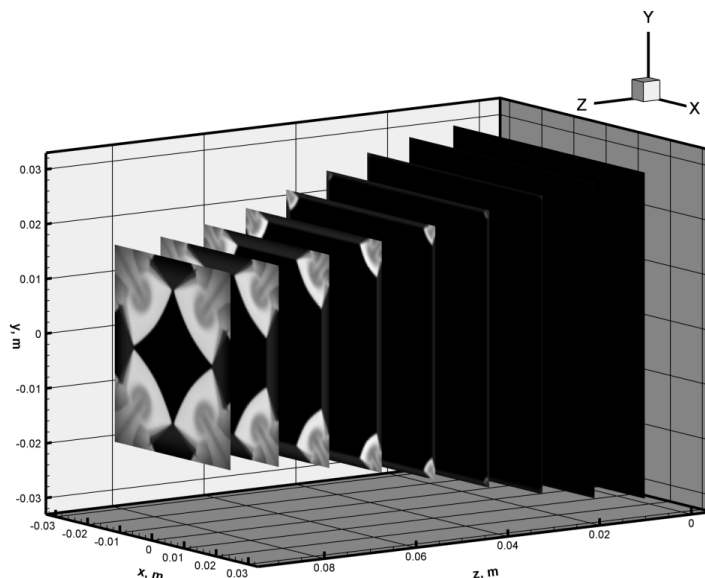


Рис.1. Стационарная детонация около двугранных углов трехмерного канала.

Работа поддержана РФФИ (проекты № 11-01-00068-а, № 11-01-1243-офи-м), Министерством Образования и Науки (проект НШ-5911.2012.1, МК-3355.2012.1) и Программами фундаментальных исследований РАН.

ЯЧЕИСТАЯ ДЕТОНАЦИЯ В ТРЕХМЕРНЫХ КАНАЛАХ И ОТКРЫТОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Левин В.А., Мануйлович И.С., Марков В.В.

Институт механики МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

Ячеистая структура расходящейся цилиндрической волны детонации

Представлены результаты численного моделирования спонтанного формирования двумерной и трехмерной ячеистой структуры детонации в стехиометрической пропановоздушной смеси при прямом инициировании. Исследование проводится в рамках одностадийной кинетики горения численным методом, основанным на схеме С.К.Годунова. Рассмотрены двумерные течения в каналах различной конфигурации: постоянного сечения, в том числе с криволинейными стенками, переменного сечения с расширениями, сужениями и изломами боковых стенок, а также при распространении расходящейся цилиндрической волны детонации. В последнем случае показано хорошее соответствие расчетов с экспериментами Р.И.Солоухина.

Трехмерная ячеистая структура волн детонации в цилиндрических каналах

Представлены и обсуждаются результаты инициирования трехмерной детонации: в канале постоянного квадратного, прямоугольного, круглого и эллиптического сечения. Во всех случаях канал с одного конца закрыт плоской твердой стенкой, а пространство внутри канала заполнено однородной стехиометрической пропановоздушной смесью при комнатных условиях. В начальный момент времени к зоне ширины 3 см вблизи закрытого конца мгновенно подводится энергия, достаточная для инициирования детонации. На начальной фазе течение не зависит от поперечных координат, но в силу неустойчивости детонация приобретает трехмерную ячеистую структуру. Получены детальные картины развития процессов, которые иллюстрируются численными Шлирен-диаграммами и анимациями газодинамических параметров. Рис.1 иллюстрирует зарождение ячеистой детонации внутри круглой трубы, закрытой с одного конца. Представлены следы тройных точек на поверхности и внутри трубы. Расчеты трехмерной ячеистой детонации в трубах различного сечения проводились на суперкомпьютере «Ломоносов».

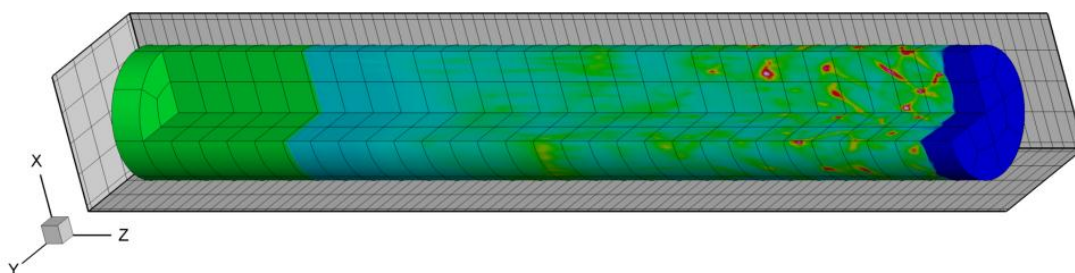


Рис.1. Следы тройных точек на поверхности и внутри круглой трубы, закрытой с одного конца, возникающие при распространении вдоль нее волны детонации.

Работа поддержана РФФИ (проекты № 11-01-00068-а, № 11-01-1243-офи-м), Министерством Образования и Науки (проект НШ-5911.2012.1, МК-3355.2012.1) и Программами фундаментальных исследований РАН.

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НА ОСНОВЕ УРАВНЕНИЙ
НАВЬЕ-СТОКСА РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛН ГОРЕНИЯ В ШАРОВОМ
РЕАКТОРЕ И ПРОДУВОК МОДЕЛИ ТЯГОВОГО УСТРОЙСТВА
С КОЛЬЦЕВЫМ СОПЛОМ**

Левин В.А., Марков В.В., Громов В.Г., Афолина Н.Е., Хмелевский А.Н.

Институт механики МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

Представлены результаты численного исследования на основе уравнений Навье - Стокса воспламенения и горения ацетилено-воздушной смеси в камере сгорания шаровой формы экспериментальной установки и моделирования продувок тягового модуля воздухом комнатной температуры и высокотемпературными продуктами сгорания стехиометрической ацетилено-воздушной смеси.

В процессе работы на основе вычислительного комплекса HighTemp проведена серия тестовых расчетов воспламенения газа и последующего распространения фронта горения по объему реактора в осесимметричном приближении.

В результате исследования для ряда начальных условий получены данные по динамике параметров поля течения в реакторе от момента воспламенения до полного сгорания топливной смеси. Отмечена значительная зависимость количественных результатов расчетов от выбора разностной сетки.

**ТЕРМОДИНАМИКА И МЕХАНИЗМЫ РЕАКЦИЙ СЖИГАНИЯ ТОПЛИВ
С НОВЫМИ УГЛЕРОДНЫМИ ДОБАВКАМИ.
КВАНТОВО-МЕХАНИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ**

Никитина Е.А., Яновский Ю.Г., Карнет Ю.Н.

ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва, Россия

Представлены результаты квантово-механического исследования (NDDO, AM1) термодинамики горения топлива в присутствии различных углеродных добавок. В качестве добавок рассматривались графен, аморфный углерод, углеродные нанотрубки, слоистый графен, а также модифицированный оксид графена и частицы, состоящие из нескольких слоев оксида графена. Исследовано влияние воды на реакцию горения топлив. При горении топлива молекулы воды разлагаются на протоны и гидроксилы, которые участвуют в процессе распада углеводородов, существенно влияя на его термодинамику. Предложены механизмы изучаемых реакций (переходные состояния, термодинамические барьеры реакций, энергетические эффекты реакций).

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БЕССЕТОЧНЫХ МЕТОДОВ

Попов В.В., Семянистый А.В., Яновский Ю.Г.

ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва, Россия

Рассмотрены возможности метода сглаженных частиц (SPH) по моделированию процессов горения в задачах разработки ГПВРД. Предложена модификация метода SPH для моделирования процессов горения, учитывающая изменение уравнения состояния среды в процессе горения. Проведена адаптация существующих программных реализаций метода SPH на использование специализированных многоядерных процессоров NVIDIA с числом ядер свыше 512 (технология CUDA). Проведено тестирование программного кода на упрощенных модельных задачах гидродинамики и верификация экспериментом.

Программное обеспечение позволяет исследовать особенности процесса горения для конкретной геометрии элементов ГПВРД. Использование пакета ParaView с развитым графическим интерфейсом позволяет детально визуализировать результаты расчетов.

ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛООВОГО ДИФфуЗИОННОГО ГОРЕНИЯ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ СМЕСЕЙ

Сапченко И.Г., Комаров О.Н., Жилин С.Г.

Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН, г. Комсомольск-на-Амуре, Россия

Накопление техногенных отходов металлургических и машиностроительных предприятий (ОММП) обуславливает актуальность разработки технологий, направленных на комплексное решение проблемы их переработки.

Возможность получения из ОММП металла достаточно, поэтому процесс является непрогнозируемым и осуществляется в малых объемах [1]. Термитный переплав ОММП позволит сократить себестоимость получаемого металла в 1,2–1,8 раза. В основе процесса лежит экзотермическая окислительно-восстановительная реакция, в ходе которой происходит восстановление железа из ОММП [2]. Исходной шихтой для получения термитного металла служит твердотельная смесь компонентов, представляющая собой композицию порошка алюминия, окалины и наполнителей (стружки черных и цветных металлов, ферросплавов и модификаторов для доведения металла до определенного химического состава). Существенные различия свойств исходных материалов и условий проведения окислительно-восстановительного процесса определяют необходимость исследования методов и разработки универсальных подходов к его осуществлению.

Изучением термохимического процесса теплового диффузионного изобарного взаимодействия между восстановителем и окислителем при условиях химической чистоты компонентов термитной шихты, определенного фракционного и балансового составов компонентов, условий активации реакции горения термитной шихты определено, что наибольший выход расплава металла достигается при использовании равнофракционных материалов с обеспечением определенной площадью их контактного взаимодействия, т.е. при определенной степени уплотнения шихты.

Экспериментально установлено, что дополнительное сообщение тепловой энергии системе взаимодействующих компонентов повышает интенсивность и стабильность окислительно-восстановительной реакции. Объяснением этому явлению может быть увеличение площади контактного взаимодействия реагентов за счет плакирования одного, расплавом другого.

На основании проведенных исследований выявлены закономерности теплового диффузионного горения многокомпонентных твердотельных смесей, влияние их фракционного и компонентного составов, степени уплотнения на прохождение термохимических процессов окислительно-восстановительных реакций.

Разработаны рекомендации по оптимизации параметров многокомпонентных смесей и окислительно-восстановительных реакций процесса с целью получения металла из ОММП низкой себестоимости и высокого качества.

Литература:

1. Новохацкий В.А., Жуков А.А., Макарычев Ю.И. Малоотходная технология производства стальных отливок с экзотермическими прибавками. – М.: Машиностроение, 1986. – 64 с.
2. Сапченко И.Г., Жилин С.Г., Комаров О.Н., Предеин В.В., Абашкин Е.Е. Исследование влияния фракции компонентов алюмотермитной смеси на технологические параметры получения термитных сталей // Заготовительные производства в машиностроении. – 2011. – №6. – С.33-37.

РАСЧЕТ ПОДАВЛЕНИЯ ГАЗОВОЙ ДЕТОНАЦИИ ИНЕРТНЫМИ ЧАСТИЦАМИ В ДВУХСКОРОСТНОМ ДВУХТЕМПЕРАТУРНОМ ПРИБЛИЖЕНИИ

Тропин Д.А., Федоров А.В.

*ФГБУН Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича
СО РАН, г. Новосибирск, Россия*

Исследование детонации привлекает большое внимание на протяжении многих лет в связи с проблемой предотвращения катастрофических взрывов. В данной работе методами численного моделирования исследовалось подавление детонации в смесях водорода и метана с окислителем путем вброса конечноразмерного облака инертных частиц.

В одномерной нестационарной постановке механики гетерогенных сред процесс распространения и подавления детонации в смесях водорода и метана с окислителем и распределенными в пространстве частицами песка описывается уравнениями неравновесной газовой динамики в двухскоростном, двухтемпературном приближении. Для моделирования химических превращений в детонационной волне использовалась модель с детальной кинетикой. При проведении численных расчетов был выбран конечно-разностный метод типа универсального алгоритма для аппроксимации по времени, а для пространственной аппроксимации – TVD-схема третьего порядка точности с расщеплением вектора потоков по Ван Лиру. Так как при детонации горючих газов в области течения присутствуют зоны с большими и малыми градиентами параметров (плотности, температуры, концентрации компонентов и т.д.), для расчета использовался метод адаптивных сеток. В областях быстро меняющегося решения шаг расчетной сетки был в несколько раз меньше, чем в областях с малым изменением параметров.

В сформулированной задаче было исследовано влияние объемной концентрации и диаметра частиц на скорость ДВ, уточнены пределы применимости равновесного и замороженного подходов. Показано, что при малых диаметрах частиц (менее 5мкм) в зависимости скорости ДВ от диаметра частиц реализуется равновесное, а при больших диаметрах частиц (более 100мкм) – замороженное течение, с непрерывным переходом между ними при промежуточных значениях диаметров частиц. Были найдены концентрационные (по объемной концентрации частиц) и геометрические пределы детонации в водород-кислородной смеси, т.е. минимальная длина облака частиц, которая приводит к гашению ДВ.

Проект поддержан грантом РФФИ №11-08-00144 и программы Отделения РАН.

Секция 4

Вычислительные методы механики гетерогенных сред

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ПРЕДЕЛЬНОЙ ДЕФОРМИРУЕМОСТИ КОМПОЗИТНЫХ ОБОЛОЧЕК ВРАЩЕНИЯ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ НАГРУЖЕНИИ

Абросимов Н.А., Елесин А.В.

*НИИ механики Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, г. Нижний
Новгород, Россия*

Одна из основных задач, возникающих при проектировании композитных защитных конструкций, состоит в анализе влияния структуры армирования на их динамическую реакцию в зависимости от реализуемой схемы нагружения конструкции. Однако, до настоящего времени вопросы выбора рациональных структур армирования, позволяющих использовать высокие жесткостные и прочностные характеристики армирующих волокон как за счет варьирования состава наполнителя и связующего, так и формирования соответствующей ориентации армирующих элементов и создания определенного характера их пространственной геометрической укладки, остаются пока мало исследованными.

Рассматривается построение энергетически согласованной разрешающей системы уравнений динамики композитных оболочек вращения, ориентированной на численное решение задач оценки их предельной деформируемости в зависимости от структуры армирования и интенсивности нагружения. Считаем, что оболочка получена перекрестной укладкой достаточно большого числа композитных слоев. При формулировке геометрических соотношений используется метод гипотез для пакета в целом и зависимости простейшего квадратичного варианта нелинейной теории оболочек. Физические соотношения композитной слоистой оболочки устанавливаются на основе метода эффективных модулей и закона Гука с учетом ступенчатого изменения жесткостных характеристик по толщине оболочки. Уравнения движения оболочек вместе с краевыми условиями получены вариационным методом, исходя из принципа возможных перемещений. Численный метод решения сформулированной начально-краевой задачи основывается на явной вариационно-разностной схеме.

Приводятся результаты численного анализа влияния углов армирования и схемы чередования слоев на предельную деформируемость слоистых композитных цилиндрических оболочек при взрывном нагружении различной интенсивности.

МЕТОД ОЦЕНКИ МАКСИМАЛЬНЫХ ОКРУЖНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ МНОГОСЛОЙНЫХ НЕРАВНОМЕРНО НАГРЕТЫХ ОБОЛОЧЕК ВРАЩЕНИЯ ПЕРЕМЕННОЙ ТОЛЩИНЫ ПРИ ДЕЙСТВИИ НЕСТАЦИОНАРНОГО ОДНОСТОРОННЕГО ИМПУЛЬСА ДАВЛЕНИЯ

Бакулин В.Н.¹, Бугай И.В.², Острик А.В.³

¹ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва, Россия

²Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана, г. Москва,
Россия

³ФГБУН Институт проблем химической физики РАН, г. Черноголовка, Московская
обл., Россия

При совместном тепловом и механическом действии ионизирующих излучений (ИИ) на тонкостенные корпуса летательных аппаратов (ЛА) требуется оценка прочности неравномерно нагретых многослойных оболочек вращения переменной толщины к действию нестационарного одностороннего импульса давления.

Как показывают экспериментальные исследования, при механическом действии ИИ окружные деформации существенно превышают продольные и во многих случаях в качестве прочностного критерия может быть принято условие достижения максимальными окружными деформациями некоторого критического уровня. Преобладание окружных деформаций и упомянутый критерий разрушения позволяют в качестве расчетной модели конструкции использовать модель бесконечной упругопластической многослойной цилиндрической оболочки (для центральных сечений конструкции) или модель кольца для сечения вблизи свободного края.

Результаты расчетов максимальных окружных деформаций $\varepsilon_{\max}$ упругих многослойных бесконечных цилиндрических оболочек или колец целесообразно представлять в безразмерном виде, применимом для любых конкретных характеристик конструкции и параметров механического действия ИИ. В рассматриваемом случае воздействия ИИ необходимо, очевидно, учесть изменения жесткостей оболочки B и D при неравномерном прогреве и тепловом разрушении по толщине и угловой координате.

Анализ методами теории размерности показывает, что в двух практически важных предельных случаях искомая функция максимальной окружной деформации от безразмерных параметров принимает вид:

$$\bar{\varepsilon}_{\max} = \varepsilon_{\max} / \bar{I}_p = \bar{\varepsilon}_{\max}(\bar{h}, \bar{\tau}_p, \varphi_p, a, b), \quad (1)$$

$$\bar{h} = \sqrt{\frac{12D_0}{B_0 R^2}}, \quad \bar{I}_p = \frac{I_p \bar{h}}{\sqrt{m_{sh} B_0}}, \quad \bar{\tau}_p = \frac{\tau_p}{R} \sqrt{\frac{B_0}{m_{sh}}},$$

где характеристики нагрузки I_p, τ_p, φ_p задают ее пространственно-временное распределение; B_0, D_0 – жесткости необлученной части конструкции; a, b – безразмерные параметры, характеризующие распределение эквивалентной толщины и деформационных характеристик по угловой координате.

В работе приводятся графические представления функции (1), полученные в результате систематических расчетов по разработанной численной нестационарной модели многослойной оболочки-кольца.

Таким образом, при упругом поведении слоев вплоть до разрушения результаты расчетов удастся в некоторых практически важных случаях представить в безразмерном виде, позволяющем оценивать максимальные окружные деформации тонкостенных конструкций с учетом теплового действия излучений и частиц различной

физической природы. Полученные результаты могут быть полезны при определении рациональных параметров защитных гетерогенных покрытий тонкостенных конструкций ЛА в многовариантных численных исследованиях.

Работа выполняется при поддержке РФФИ (гранты № 11-08-01255, 10-08- 01302).

МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ЧИСЛЕННОГО АНАЛИЗА И ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ НЕОДНОРОДНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ С ТРЕБУЕМЫМ И РЕГУЛИРУЕМЫМ КОМПЛЕКСОМ СВОЙСТВ

Бакулин В.Н.¹, Гусев Е.Л.²

¹*ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва, Россия*

²*ФГБУН Институт проблем нефти и газа СО РАН, г. Якутск, Россия*

В настоящее время при создании изделий различного назначения широкое применение находят композиционные материалы (КМ) и элементы конструкций из КМ. Внедрение КМ с высокими удельными характеристиками (прочностью, жесткостью) и другими необходимыми для ответственных изделий свойствами такими, как радиопрозрачность, коррозионная стойкость, и др., а также возможность регулирования механических и физических характеристик в широких пределах, позволяет создавать многофункциональные высоко эффективные конструкции с заданными параметрами.

На основе математического и компьютерного моделирования проведено исследование задач численного анализа и оптимального проектирования структуры композиционных материалов и элементов конструкций из КМ с требуемым и регулируемым комплексом свойств, имеющих как плоскую, так и криволинейную симметрию.

В вариационной постановке одними из наиболее эффективных методов построения оптимальных решений в задачах оптимизации, модели в которых описываются системами дифференциальных уравнений, являются методы, основанные на принципе максимума Л.С. Понтрягина. Тем не менее, методы, основанные на принципе максимума Л.С. Понтрягина, позволяют строить лишь локально-оптимальные решения, т.е. имеющие локальный характер.

На основе развития теории методов продолжения по параметру, конструктивного анализа дифференциальных уравнений, описывающих динамику композиционных конструкций, разработана эффективная методика нелокальной оптимизации, позволяющая осуществлять эффективное проектирование композиционных материалов и конструкций с требуемым и регулируемым комплексом свойств.

Применение для расчета КМ и конструкций из КМ различных математических методов приводит к определенным трудностям при использовании результатов расчета КМ для исследования напряженно-деформированного состояния (НДС) и деформирования композиционных конструкций. Эти трудности не возникают при применении для расчета КМ и конструкций из КМ одних и тех же математических методов. В представленной работе предлагается подход для построения эффективных конечно-элементных моделей для уточненного исследования НДС КМ и особенно элементов конструкций из КМ.

Работа выполняется при финансовой поддержке РФФИ (грант № 10-08-01301-а).

О КРИТЕРИЯХ ВЫБОРА ПАРАМЕТРОВ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЙ СЕТКИ

Бакулин В.Н., Инфлянскас В.В.

ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва, Россия

Потребности современной инженерной практики и бурное развитие вычислительной техники оказали свое влияние на механику твердого тела. Ограниченность набора точных решений теории упругости и известные недостатки метода конечных разностей привели к широкой разработке метода конечных элементов. Теперь он воплощен в различные пакеты как коммерческих, так и свободно распространяемых прикладных программ. Особенностью современного подхода является то, что пользователь работает с тщательно продуманным интерфейсом, владея лишь минимально необходимой информацией о самой программе. Тем не менее, на практике есть немало случаев ответственных конструкций, когда повышаются требования к точности расчета, особенно локально: в областях приложения сосредоточенных нагрузок и в зонах концентраторов напряжений.

Как известно, основой метода конечных элементов является разбиение конструкции на небольшие фрагменты (дискретизация области) с интерполяцией перемещений (в случае метода перемещений) между узлами многочленами (как правило, при традиционном подходе) низкого порядка и дальнейшей формулировкой задачи механики твердого тела либо вариационным путем, либо по методу Бубнова-Галеркина. В результате получается система линейных алгебраических уравнений высокого порядка. Решение этой системы зависит, в том числе, и от параметров конечно-элементной сетки.

Известны доказательства сходимости конечно-элементного процесса по интегральной среднеквадратичной норме пространства L_2 . Таким образом, норма отклонения дискретного решения от точного может быть выражена функционально через размер конечного элемента [1], что позволяет перейти к обобщенным параметрам – компонентам плотности конечно-элементной сетки. Но фактическая точность решения еще подлежит определению.

Если принять плотность сетки в качестве аргумента, то каждый конечно-элементный расчет является некоторой точкой предельного процесса, который может быть как монотонным, так и немонотонным [2]. Для описания обоих вариантов сходимости предложены экспоненциальные калибровочные функции. Дальнейший анализ проводится различно. В немонотонном (колебательном) случае приближение функции к пределу определяется положением локальных экстремумов, причем особое значение имеет первый максимум модуля исследуемой функции (напряжения или перемещения). В монотонном случае близость функции к предельной характеризуется достижением порогового ее приращения. Для описания локального поведения функции применен аппарат параболической интерполяции.

Анализ сходимости иллюстрируется расчетом круговой цилиндрической композиционной трехслойной оболочки под локальной нагрузкой.

Литература:

2. Стренг Г., Фикс Дж. Теория метода конечных элементов. – М.: Мир, 1977. – 349 с.
3. Бате К., Вилсон Е. Численные методы анализа и метод конечных элементов. – М.: Стройиздат, 1982. – 447 с.

МЕТОД СИММЕТРИЧЕСКИХ МНОГОЧЛЕНОВ В РАСЧЁТАХ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОЙ МАТРИЦЫ МНОГОСЛОЙНОЙ СРЕДЫ

Беляев Ю.Н.

Сыктывкарский государственный университет, г. Сыктывкар, Россия

Многие слоистые среды хорошо аппроксимируются моделью одномерного (по глубине z) изменения параметров. Расчёт напряжённого состояния такой системы в линейном приближении сводится к решению матричного уравнения $\partial_z \Psi = W \Psi$ порядка n , которое будем называть *определяющим*. Здесь символ ∂_z обозначает дифференцирование по координате z ; Ψ - вектор-столбец, который составляют компоненты тензора напряжений, вектора смещения, а также компоненты электромагнитного и теплового полей (при наличии влияния последних на деформацию среды). Значения этой вектор-функции $\Psi(z)$ на противоположных границах слоя, ограниченного плоскостями $z = 0$ и $z = d$, связаны друг с другом характеристической матрицей (ХМ) слоя M порядка n : $\Psi(0) = M \Psi(d)$. Если пластина состоит из N слоёв, первый из которых занимает область $0 \leq z \leq z_1$, второй - $z_1 \leq z \leq z_2, \dots$, N -й слой - $z_{N-1} \leq z \leq z_N = d$, а слои характеризуются матрицами $M_1, M_2, \dots, M_N$, то ХМ всей пластины $M = M_1 \dots M_N$.

ХМ M_i связана с фундаментальной матрицей T_i определяющего уравнения слоя очевидным соотношением: $M_i = T_i^{-1} = \exp[-W_i(z_i - z_{i-1})] = \exp(-W_i d_i)$. Ранее [1-2] для вычисления фундаментальной матрицы был предложен метод симметрических многочленов (МСМ), который не требует для своей реализации нахождения собственных значений матрицы W_i . Это обуславливает более высокую точность вычислений матричной экспоненты по МСМ по сравнению с методом Лагранжа-Сильвестра. Рекуррентный алгоритм расчёта симметрических многочленов делает МСМ более эффективным в сравнении с методом разложения экспоненты в ряд. В данной работе на основе МСМ для вычисления характеристической матрицы M_i развит метод масштабирования матрицы $W_i d_i$, который обеспечивает ещё более высокую надёжность и точность численных расчётов. Получена аналитическая оценка величины масштабирующего множителя в зависимости от порядка матрицы n , величины элементов матрицы W_i , толщины d_i и требуемой точности вычислений. На примере характеристической матрицы термоупругого состояния слоя показан алгоритм вычислений по разработанному методу.

Работа выполнена при поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы (ГК № 02.740.11.0618).

Литература:

1. Беляев Ю.Н. Применение симметрических многочленов в решении задачи Коши / Алгебра и линейная оптимизация. Тезисы Международной конференции. – Екатеринбург, 14-19 мая 2012. – С.20-22.
2. Belyayev Yu.N. Calculations of transfer matrix by means of symmetric polynomials / Days on Diffraction 2012. Proceedings of the International Conference. – Saint Petersburg, Russia, May 28-June 1 2012. – P.36-41.

ЭКСТРУЗИЯ КОМПОЗИТНОГО МАТЕРИАЛА В УСЛОВИЯХ ВОЛНОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Беляева Н.А.¹, Прянишникова Е.А.¹, Столин А.М.², Кобзев Д.Е.³

¹*Сыктывкарский государственный университет, г. Сыктывкар, Россия*

²*ФГБУН Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения РАН,
г. Черноголовка, Россия*

³*Тамбовский государственный технический университет, г. Тамбов, Россия*

Известно, что ультразвуковые, также как и механические колебания, часто используют для интенсификации различных технологических процессов. Однако экспериментальные результаты [1] показывают, что ультразвуковое воздействие на композитный материал приводит к увеличению времени экструзии, а не к его уменьшению. Для подтверждения полученных экспериментальных результатов проведено математическое моделирование процесса твердофазной экструзии с использованием изотермической [2,3] и неизотермической структурной модели экструзии порошкового вязкоупругого структурированного сжимаемого композитного материала [4,5]. Учет влияния звуковой волны на свойства экструдированного материала осуществлен введением в выражение для объемной вязкости эффективного параметра – коэффициента ультразвукового давления, равного отношению давления формования при воздействии ультразвука к давлению без данного воздействия. Аналитический и численный анализ процесса экструзии на основе указанных выше моделей показал: с уменьшением значения волнового коэффициента объемная вязкость материала уменьшается за счет возрастания во времени скорости деформирования, но увеличивается за счет снижения пористости материала. Конкуренция процессов сдвигового деформирования и объёмного уплотнения материала приводит к увеличению времени экструзии материала. Таким образом, исследования дают теоретическое обоснование наблюдаемому экспериментально повышению времени экструзии при ультразвуковом воздействии. Кроме того, ультразвуковое воздействие приводит к снижению пористости материала, уменьшению ее градиентности, что благоприятно скажется на качестве изделий.

Литература:

1. Кобзев Д.Е., Баронин Г.С., Полуктов В.Л. Твердофазная плунжерная экструзия полимерных нанокомпозитов с применением ультразвука // Перспективные материалы. – 2011. – №11. – С. 449-455.
2. Belyaeva N.A., Stolin A.M., Stelmakh L.S. Dynamic of Solid-State Extrusion of Viscoelastic Cross-Linked polymeric Materials // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. – 2008. – Vol.42. – №5. – P.549-556.
3. Беляева Н.А., Прянишникова Е.А. Структурная математическая модель экструзии пористого вязкоупругого композитного материала на основе обобщенной модели Максвелла с учетом влияния звуковой волны / Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2011660240. – 29 февраля 2012 г.
4. Беляева Н.А., Прянишникова Е.А. Структурно-температурная модель экструзии композитного материала // В мире научных открытий. Математика. Механика. Информатика. – 2011. – №1. – С.131-139.
5. Прянишникова Е.А., Беляева Н.А. Структурная неизотермическая математическая модель экструзии сжимаемого композитного материала / Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2010616996. — 19 октября 2010 г.

РАСЧЕТ ПОЛЯ НАПРЯЖЕНИЙ В ПРИКОНТУРНОЙ ЗОНЕ ВЫРАБОТКИ, ЗАКРЕПЛЕННОЙ АНКЕРАМИ, МЕТОДОМ ГРАНИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Бобылев Д.Е., Масько Л.В.

*Криворожский национальный университет, г. Кривой Рог, Днепропетровская обл.,
Украина*

Анкерная крепь, установленная с предварительным натяжением, повышает сопротивление сдвигу слоев и блоков пород друг относительно друга и создает грузонесущую конструкцию в виде породной армированной балки или арки, защемленной между двумя опорами. Несмотря на очевидное преимущество сшитой балки по сравнению с несшитой анкерами, еще не удалось выявить количественное влияние эффекта сшивки отдельных структур на устойчивость закрепленных пород. Это связано с высокой степенью допущений и упрощений в методике расчета и оценки воздействия анкерной крепи на массив. Классическая методика основана на решении плоской задачи теории упругости. Данная модель не учитывает воздействие напряжений возникающих вне плоскости. Для снижения вышеупомянутых ограничений предлагается использовать решения пространственных задач теории упругости. Данный подход позволяет определить параметры напряженного состояния вокруг анкера и оценить взаимное влияние соседних анкеров в любой точке породного массива.

Исследование поля напряжений в закрепленном пространстве позволяет найти области упрочнения и ослабления, определить их зависимость от параметров анкерной крепи. На основе этих данных определяются необходимые, для данных условий параметры крепления. Поскольку механические процессы в породных массивах, как правило, удовлетворяют условиям активной деформации и простого нагружения, то можно рассматривать общую модель нелинейно-упругого массива.

Для оценки влияния системы анкеров на начальное напряженное состояние, обусловленное проведением выработки, необходимо исследовать изменение поля напряжений в приконтурной области массива пород после установки анкерной крепи. Значения напряжений в точках породного массива вокруг штанги находятся посредством статического расчета системы крепь-порода, при помощи решений пространственных задач теории упругости. Воздействие замкового анкера на породный массив моделируется как действие двух сил, равных половине несущей способности анкера – на контуре выработки и в глубине породного массива, в точке закрепления анкерного замка. Значения сил в первом приближении принимаются равными половине несущей способности анкера. Точки приложения сил соответствуют концам активной длины анкеров. Чтобы определить количество взаимовлияющих анкеров первоначально необходимо оценить область влияния одного анкера на напряженное состояние в массиве пород. Найденные значения поля напряжений по всей глубине анкерования позволяют оценить степень изменения напряжений в зависимости от расстояния до анкера. Значения поля напряжений рассчитаны в одной координатной четверти, ввиду его симметрии. Компоненты напряжения обусловленные силами, приложенными к контуру выработки определяется при помощи решения задачи Буссинеска для упругого полупространства.

Расчеты показали, что область влияния анкеров на напряженное состояние, даже с учетом его максимального натяжения, не превышает 1 м. За пределами этой области напряжения, вызываемые анкерами, пренебрежительно малы.

О МОДЕЛИРОВАНИИ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ УПРУГИХ ТЕЛ С ТОНКИМИ ПОКРЫТИЯМИ ВИНКЛЕРОВСКОГО ТИПА

Бобылёв А.А.¹, Белашова И.С.²

¹*Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет»,
г. Днепропетровск, Украина*

²*ФГБУ ВПО Московский авиационный институт (НИИ), г. Москва, Россия*

В настоящее время путь получения новых материалов в основном исчерпан, и ожидать новых составов, которые могли бы значительно превосходить физико-механические свойства известных, не приходится. В связи с этим, в последнее десятилетие наметилась тенденция решать проблемы повышения эксплуатационных характеристик материалов за счёт совершенствования существующих и разработки новых методов поверхностного упрочнения. Поэтому исследования контактного взаимодействия упругих тел с учетом свойств модифицированных поверхностей (покрытий) являются актуальными. Малая толщина покрытия требует разработки специальных методов моделирования контактного взаимодействия.

В настоящей работе рассмотрена задача контактного взаимодействия жесткого штампа и упругого тела конечных размеров с тонким покрытием винклеровского типа. Для решения задачи использован вариационный подход. Получены формулировки задачи в виде вариационного неравенства и эквивалентной ему экстремальной задачи. Дискретизация задач производилась методом конечных элементов. Использовались конечные элементы первого и второго порядков. В результате дискретизации получена задача квадратичного программирования с нелинейными ограничениями в виде равенств и неравенств. Предложено линейное преобразование переменных, позволяющее упростить вид ограничений. Для решения задачи квадратичного программирования разработан вариант метода сопряженных градиентов, учитывающий специфику ограничений задачи.

Вычислительный алгоритм решения контактных задач для упругих тел с покрытиями реализован в виде комплекса прикладных программ. Проведенные вычислительные эксперименты подтвердили эффективность разработанного алгоритма.

Для уменьшения вычислительных затрат разработан многосеточный вариант вычислительного алгоритма на основе дискретной формы метода продолжения по параметру, в качестве которого выбирался характерный линейный размер сетки по пространственным координатам.

Получены решения ряда конкретных задач. Исследовано влияние параметров покрытия на распределение контактного давления и напряженно-деформированное состояние упругих тел конечных размеров. Даны рекомендации по применению разработанного алгоритма для решения практических задач.

ДЕФОРМИРОВАНИЕ И РАЗРУШЕНИЕ ТОНКОСТЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ПРИ ТЕПЛОМ И МЕХАНИЧЕСКОМ ДЕЙСТВИИ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Бугай И.В.

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

Численное моделирование последствий воздействия потоков ионизирующего излучения (ИИ) на тонкостенные несущие элементы конструкций летательных аппаратов (ЛА) включает в себя переносные, теплофизические, термомеханические, газодинамические и прочностные аспекты. В то же время, расчеты зависимости энерговыделения от ИИ, теплового и механического действий ИИ, а также деформирования и разрушения конструкции, могут проводиться отдельно, поскольку перенос ИИ в ЛА можно считать в квазистационарном приближении и независимо от других рассматриваемых процессов. Характерное газодинамическое время формирования механической нагрузки, как правило, много меньше времени деформирования тонкостенной конструкции, а оно, в свою очередь, может быть мало по сравнению с временами распространения границ фазовых переходов и тепловой волны прогрева композитного материала по толщине конструкции. Эти обстоятельства позволяют свести проблему прогнозирования последствий воздействия ИИ на тонкостенную конструкцию к решению четырех, относительно независимых, задач: переносной (расчету энерговыделения при переносе ИИ в многослойном пакете корпуса ЛА); тепловой (расчету температурного профиля и уноса), газодинамической (расчету толщин отколов и пространственно-временных характеристик нагрузки при механическом действии) и прочностной (расчету на динамическую прочность к нестационарной нагрузке прогретой конструкции переменной толщины). Расчет параметров теплового и механического действий проводится в квазиодномерном приближении (толщины конструкций, прогрева, отколов значительно меньше размеров пятна облучения). Деформирование тонкостенной конструкции рассматривается в наиболее общей многомерной постановке.

При расчете энерговыделения используется гибридный подход, при котором перенос фотонов моделируется методом Монте-Карло (методом плотностей столкновений) в гомогенном многокомпонентном материале с усредненными характеристиками, а перераспределение энергии между компонентами гетерогенных покрытий (ГП) вторичными электронами рассчитывается аналитически.

Математическая модель теплового действия ИИ строится на основе двумерного уравнения переноса энергии твердой фазы многослойной преграды с учетом физико-химических превращений и перераспределения энергии газообразными продуктами термодеструкции, которое записывается для каждого слоя в цилиндрической системе координат. Учитываются многократность и многовариантность сочетаний воздействий потоков энергии различной физической природы.

Для определения параметров механического действия ИИ предлагается двумерная неравновесная модель широкодиапазонной элементарной ячейки ГП. Расчет квазистатического выравнивания напряжений в пределах элементарной ячейки основывается на решении уравнений равновесия упругопластической среды, дополненных широкодиапазонными уравнениями состояния.

Для расчета динамической прочности тонкостенных конструкций используется разработанный с участием автора универсальный численный код.

В заключительной части работы приводятся результаты расчетов совместного теплового и механического действий потоков энергии ИИ на композитные элементы тонкостенных конструкций ЛА с защитными ГП.

Работа выполняется при поддержке РФФИ (гранты №11-08-01255, 10-08-01302).

РАСЧЕТ СОВМЕСТНОГО ДЕЙСТВИЯ ИЗЛУЧЕНИЙ И УДАРНОЙ ВОЛНЫ НА МНОГОСЛОЙНЫЕ ОРТОТРОПНЫЕ КОМПОЗИТНЫЕ ОБОЛОЧКИ ПЕРЕМЕННОЙ ТОЛЩИНЫ

Бугай И.В.

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

Исследование последствий механического действия ударной волны (УВ) на несущие элементы конструкций летательных аппаратов (ЛА) представляет большой практический интерес [1,2]. Рядом особенностей, затрудняющих проведение таких исследований, обладает совместное тепловое действие потоков излучений и механическое действие УВ на композитные конструкции. В первую очередь к ним относятся анизотропия теплофизических и механических свойств и относительно низкая термостойкость композитов, приводящая к термодеструкции связующего и прококсовке прогреваемых слоев материала при тепловом действии излучения.

Тепловое действие излучений. Взаимодействие излучения с композитными материалами может вызывать различные физико-химические превращения, набор которых меняется при переходе от одного достаточно узкого класса материалов к другому. Так как теплофизические свойства связующего и наполнителя конструкционных композитов в большинстве случаев отличаются друг от друга, то и характер их теплового разрушения будет существенно различным. Поэтому математическая модель теплового действия потоков энергии должна учитывать структуру материала. Такой моделью, в частности, является модель слоистого композита [3], где имеются два источника слоистости: физический (наполнитель и связующее слоя композитного материала являются разнородными подслоями, имеющими свой характер разрушения; однородный материал расслаивается на подслои при переходе его части в другое фазовое состояние) и конструкционный (пакеты конструкций ЛА состоят из разнородных материалов – слоев). Уравнение переноса энергии твердой фазы с учетом физико-химических превращений и переноса тепла газовым потоком продуктов разложения связующего записывается для каждого подслоя материала и решается численно по неявной схеме.

Механическое действие УВ. Для расчета динамической прочности композитных тонкостенных конструкций ЛА используется численная модель нестационарного деформирования многослойной ортотропной оболочки переменной толщины (изменение толщины обусловлено тепловым уносом при воздействии потоков излучений различной физической природы). Численное решение уравнений движения оболочки проводится с помощью явной конечно-разностной схемы.

В качестве примера приводятся результаты расчетов совместного действия физических факторов различной природы (солнечной радиации (СР), объемно-поглощаемого излучения, светового излучения (СИ) и УВ мощного взрыва) на ортотропную свободно-опертую по контуру панель, изготовленную из высокотемпературного стеклопластика. Результаты расчетов профилей прогиба w нагретой панели для различных моментов времени при прохождении УВ с давлением $p(t, x, y) = \Delta p_{sw} \theta(D_{sw} t - x)$. ($\Delta p_{sw} = 0,09 \text{ атм}$, $D_{sw} = 350 \text{ м/с}$) показывают, что он не превышает 1/5 толщины оболочки, что вполне допустимо для условий функционирования рассматриваемой конструкции.

Работа выполняется при поддержке РФФИ (гранты №11-08-01255, 10-08-01302).

Литература:

1. Кармишин А.В., Скурлатов Э.Д., Старцев В.Г., Фельдштейн В.А. Нестационарная аэроупругость тонкостенных конструкций – М.: Машиностроение, 1982. – 240 с.
2. Физика ядерного взрыва: В 5 т. Т.2. Действие взрыва. – М.:Физматлит, 2010. – 620 с.
3. Острик А.В., Слободчиков С.С. Математическая модель разрушения композитных оболочек высокого давления под действием лучистых потоков энергии // Математическое моделирование. – 1995. – Т.7. – №10. – С.33-46.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ НИТЕВИДНЫХ НАНОКРИСТАЛЛОВ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Вахрушев А.В., Северюхин А.В., Северюхина О.Ю.

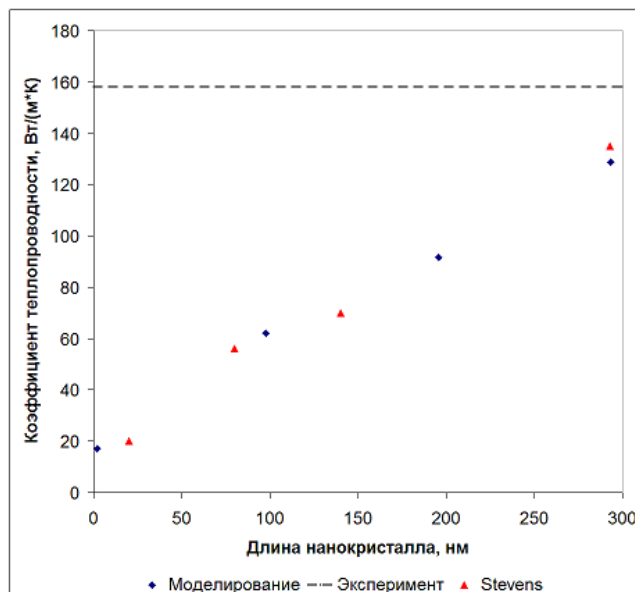
ФГБУН Институт механики УрО РАН, г. Ижевск, Россия

Изучение теплопроводности и температуропроводности, а также теплоемкости наноразмерных структур в зависимости от температуры позволяет определить области практического использования данных материалов, обладающих уникальными характеристиками. В связи с этим, целью настоящей работы являлось построение физических и математических моделей, разработка программы и моделирование процессов теплопроводности в нанокристаллах. В качестве метода моделирования применен аппарат молекулярной динамики. Использован формализм Грина-Кубо (Green-Kubo), который связывает автокорреляционную функцию теплового потока с коэффициентом теплопроводности.

$$k = \lim_{\tau \rightarrow \infty} \lim_{L \rightarrow \infty} \frac{1}{k_B T^2 L^d} \int_0^\tau \langle J(t) J(0) \rangle dt,$$

где k – коэффициент теплопроводности d -мерной системы с линейным размером L , T – температура, k_B – постоянная Больцмана, J – компонента потока тепла.

По данной методике рассчитаны зависимости коэффициента теплопроводности кремния, хрома и других материалов от размера нанокристаллов при различных температурах. Расчеты показали, что с увеличением размеров нанокристалла, коэффициент теплопроводности увеличивается и приближается к экспериментальному его значению для макроматериала. На рисунке, в качестве примера, представлена зависимость коэффициента теплопроводности кремния от длины нанокристалла: теплопроводность чистого кремния при 300К.



Работа выполнена при финансовой поддержке УрО РАН (проект №12-П-12-2010).

ИССЛЕДОВАНИЕ НАЧАЛЬНОГО ЭТАПА ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ НАНОВИСКЕРОВ НА АКТИВИРОВАННОЙ ПОДЛОЖКЕ МЕТОДАМИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ МЕХАНИКИ ГЕТЕРОГЕННЫХ СРЕД

Вахрушев А.В., Северюхин А.В., Северюхина О.Ю.

ФГБУН Институт механики УрО РАН, г. Ижевск, Россия

В наши дни ведутся обширные исследования процессов формирования нановискеров. В процессе выращивания нановискеров часто стоит вопрос в необходимости контролировать их свойства: диаметр, длину, форму, поверхностную плотность, однородность, состав и т.д., путем изменения условий подготовки поверхности и осаждения материала. Решение данной задачи невозможно без проведения теоретических исследований и моделирования ростовых процессов. В России и за рубежом ведутся обширные работы по разработке математических моделей описания процессов образования и роста нановискеров. Научная группа из Новосибирска под руководством академика И.Г.Неизвестных моделирует рост НВ Si на подложке Si(111), используя метод Монте-Карло. Моделирование методом Монте-Карло дает хорошие результаты, однако, недостатком этого метода является большое время вычислений, и он не позволяет увидеть динамику ростового процесса. Квантовая механика, на данном этапе развития техники, не в состоянии просчитать системы с большим количеством атомов. Для объяснения закономерностей ростовых процессов пользуются, в основном, тремя феноменологическими моделями: моделью Гиваргизова-Чернова, моделью Кашиева и элементарной моделью диффузионного роста нановискеров. Данные модели включают ряд феноменологических параметров, для определения которых необходимо проведение сложных и дорогостоящих экспериментов. Именно поэтому задача исследования формирования и роста нановискеров методами математического моделирования, построенными на прямом анализе атомарной структуры, является весьма актуальной.

В данной работе методом молекулярной динамики проведено моделирование начального этапа формирования нитевидных нанокристаллов на поверхности кремния. Процесс роста нановискеров можно разбить на несколько этапов. Для каждого этапа была предложена математическая модель. Представленная математическая модель учитывает компенсирующее влияние разности химических потенциалов различных фаз вещества, кинетического коэффициента кристаллизации, а также величины диффузионного потока осажденных атомов с поверхности подложки в вискер. Проведены комплексные численные исследования, которые показали возможность применения метода молекулярной динамики для моделирования начального этапа роста нитевидных кристаллов. Результаты моделирования показали хорошую согласованность с экспериментальными данными. Установлена связь предложенной модели с имеющимися феноменологическими моделями роста нановискеров. Определен диапазон значений параметров процесса обеспечивающих устойчивый рост нановискеров.

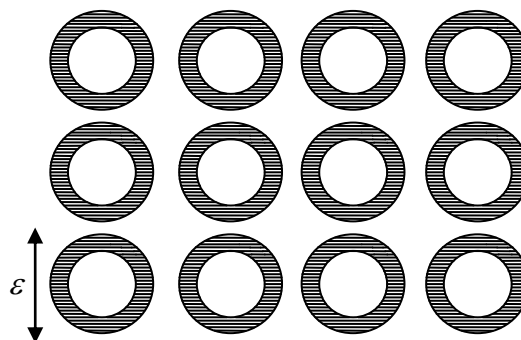
Работа выполнена при финансовой поддержке УрО РАН (проект №12-П-12-2010).

МОДЕЛИРОВАНИЕ УРАВНЕНИЙ КОНВЕКТИВНОГО ПЕРЕНОСА ТЕПЛА В СТРУКТУРНО-НЕОДНОРОДНЫХ СРЕДАХ МЕТОДОМ ДВУХМАСШТАБНОГО УСРЕДНЕНИЯ

Волков-Богородский Д.Б., Власов А.Н.

ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва, Россия

Рассматривается модель распространения тепла в структурно-неоднородных материалах, имеющих внутреннюю микроструктуру, обусловленную наличием периодической системы включений с промежуточным межфазным слоем. При этом предполагается, что в области между включениями осуществляется дополнительный конвективный перенос тепла за счет течения жидкости, подчиняющегося уравнению



фильтрации Бринкмана. Дополнительный межфазный слой выполняет в данной модели одновременно роль “смазки” для течения жидкости, а также теплоизолирующей или теплопроводящей (в разных ситуациях) прокладки для включений. На границе между различными фазами материала ставится контактное условие Биверса-Джозефа для течения жидкости, и идеального контакта для уравнения теплопроводности.

Для моделирования физического процесса используется метод асимптотического усреднения Бахвалова в двухмасштабной среде с характерным внутренним микромасштабом ε . Представлен полный асимптотический анализ течения жидкости в двухмасштабной пористой среде и конвективного распространения тепла в трехфазной модели с промежуточным слоем. Для решения вспомогательных задач на ячейке периодичности был разработан специальный аналитико-численный метод, основанный на аппроксимациях решения функциями формы высокого порядка, точно воспроизводящими все условия сопряжения на границах раздела фаз. Такой метод решения задач на ячейке позволяет с высокой точностью определить глобальные (эффективные) и локальные характеристики неоднородной среды со сложной внутренней микроструктурой.

Литература:

1. Власов А.Н., Волков-Богородский Д.Б., Талонов А.В., Саваторова В.Л. Усреднение нелинейного уравнения теплопроводности при моделировании распространения тепла в материалах со слоистой структурой / Механика наноструктурированных материалов и систем. Сборник трудов Всероссийской конференции. – М.: ИПРИМ РАН, 2011. – Т. II. – С. 77-88.
2. Волков-Богородский Д.Б., Власов А.Н. Асимптотическое усреднение уравнений фильтрации Бринкмана в многофазных средах с периодической структурой // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2012. – Т. 18. – №1. – С. 92-110.

ИНТЕРЬЕРНЫЕ ГРАНИЦЫ КОМПОЗИТОВ: ПОЛИМАСШТАБНОСТЬ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВА СИЛОВЫХ ПОЛЕЙ

Гергега А. Н.

*Одесская Государственная академия строительства и архитектуры, г. Одесса,
Украина*

Материал и его внутренние границы – взаимообусловленные и совместно развивающиеся кластерные системы. Перераспределяя деформации в материале, интерьерные границы эволюционируют, изменяя характерные размеры и осваивая новые масштабы, тем самым, модифицируя материал [1].

Поля деформаций, как известно, существенно зависят от конфигурации неоднородностей. В случае квазилинейных интерьерных границ тензоры деформаций содержат компоненты пропорциональные r^{-1} [2], и, следовательно, на сравнительно больших расстояниях, многократно превышающих межатомные, действие полей может быть существенным.

Предложена модель полимасштабной сети интерьерных границ, описывающая силовые поля фрактальных структур. Аналитически определено силовое поле, создаваемое сетью границ в виде квадрата Серпинского произвольного поколения [3], а также его модификациями, имеющими различную структуру и симметрию; получена визуализация этих полей. Это позволяет, в соответствии с принципом суперпозиции, использовать модели регулярных фракталов для описания полей механических напряжений произвольных сетей внутренних границ.

Методом ренорм-преобразования изучены перколяционные кластеры, возникающие на ковре Серпинского с бесконечной и гибридной разветвленностью [3]. Получены значения перколяционного порога, индексы корреляционной длины и параметра порядка. Другие критические показатели найдены из системы равенств двухпоказательного скейлинга.

Многочисленные вариации сетей поверхностных трещин допускают разнообразные визуальные классификации: в их красивых хаотических рисунках легко угадываются закономерности. При количественном описании трещин часто используется метод, основанный на определении технологической поврежденности. Он позволяет провести корректную оценку состояния материала за исключением ситуаций, когда необходим учет фрактальной структуры внутренних границ [4]. Показано, что в этом случае уместные количественные оценки могут быть найдены при анализе предлагаемых статистических, информационных [5] и физических дескрипторов сетей интерьерных границ.

Литература:

1. Гергега А.Н., Выровой В.Н., Дрик Н.Г. Моделирование внутренних границ как элементов структуры материала / Материалы ВМСППС-2011, Алушта. – М.: Изд. МАИ-ПРИНТ, 2011. – С.57-59.
2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика, т. VII. Теория упругости. – М.: Наука, 1987. – 248 с.
3. Гергега А.Н., Дрик Н.Г., Угольников А.П. Ковер Серпинского с гибридной разветвленностью: перколяционный переход, критические показатели, силовое поле // УФН. – 2012. – Т.182. – Вып.5. – С.555-557.
4. Выровой В.Н., Гергега А.Н., Дрик Н.Г., Суханов В.Г. Комплекс дескрипторов интерьерных границ материалов / Материалы конф. «Моделирование-2012» ИПМЭ им. Г.Е. Пухова. – Киев, 2012. – С.146-149.

5. *Герега А.Н.* Об одном критерии относительной степени упорядоченности изображений // Журнал технической физики. – 2010. – Т.80. – Вып.5. – С.149-150.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОПТИМАЛЬНОГО СИНТЕЗА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКОЙ И ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ, КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ВОЛН В ВАРИАЦИОННОЙ ПОСТАНОВКЕ

Гусев Е.Л.

ФГБУН Институт проблем нефти и газа СО РАН, г. Якутск, Россия

Широкий круг проблем современного приборостроения, возникающих в авиа- и космической технике, связанных со все возрастающим применением композиционных материалов, конструкций приводит к необходимости исследования, как в прикладном, так и в теоретическом аспектах, возможности наиболее эффективного управления энергетическими характеристиками волновых процессов на основе направленного выбора геометрической и физической структуры структурно-неоднородных композиционных систем.

В качестве соответствующих моделей исследованы модели распространения упругих волн в сложнопостроенных структурно-неоднородных средах, в достаточной мере отражающих основные особенности взаимодействия волновых процессов с конструкциями сложных технических систем различного назначения. Рассматриваемые обратные задачи, связанные с взаимодействием волновых процессов с неоднородными структурами, сформулированы и исследованы в вариационной постановке. Методами математического и компьютерного моделирования проведено исследование вариационных постановок задач оптимального синтеза физико-механической и геометрической структуры композиционных материалов и конструкций с требуемым и регулируемым комплексом свойств при волновых воздействиях. Для соответствующих вариационных постановок задач оптимального синтеза разработаны и исследованы необходимые условия оптимальности, связанные с нелокальными вариациями управляющих параметров.

На основе конструктивного анализа необходимых условий оптимальности установлены качественные закономерности взаимосвязи параметров в композиционных структурах, реализующих предельные возможности по достижению требуемого комплекса свойств при волновых воздействиях. Исследуемые перспективные пути связаны с выделением качественной информации о важных закономерностях взаимодействия волновых процессов с композиционными структурами [1-3]. Разработаны эффективные методы исследования предельных возможностей слоисто-неоднородных структур по достижению требуемого комплекса свойств при волновых воздействиях.

Литература:

1. Гусев Е.Л. Качественные закономерности взаимосвязи параметров в оптимальных структурах в задачах оптимального синтеза неоднородных структур из дискретного набора материалов при волновых воздействиях // Доклады РАН. – 1996. – Т.346. – №3. – С.324-326.
2. Гусев Е.Л. Качественные закономерности структуры оптимальных решений в задачах оптимального синтеза многослойных конструкций при воздействии упругих волн // Доклады РАН. – 1998. – Т.368. – №1. – С.53-56.
3. Гусев Е.Л. Конструктивные методы синтеза слоисто-неоднородных структур при воздействии упругих волн // Акустический журнал. – 2008. – Т.54. – №5. – С.1-8.

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ МНОГОЗНАЧНЫХ ОТОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРЕДЕЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ КОМПОЗИЦИОННЫХ СТРУКТУР ПРИ ВОЛНОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ РАЗЛИЧНОЙ ФИЗИЧЕСКОЙ ПРИРОДЫ

Гусев Е.Л.

ФГБУН Институт проблем нефти и газа СО РАН, г. Якутск, Россия

Исследуется вариационная постановка задач оптимального синтеза слоисто-неоднородных композиционных конструкций с требуемым комплексом свойств при волновых воздействиях [1-4]. При исследовании волновых процессов в неоднородных структурах центральной проблемой является проблема направленного конструирования слоисто-неоднородной композиции с заранее заданными энергетическими характеристиками. Данная проблема заключается в таком направленном выборе физико-механической и геометрической структуры композиционной конструкции, при котором ее энергетические характеристики будут предельно близки к требуемым зависимостям. От решения этой проблемы зависят не только эффективность применяемых слоисто-неоднородных композиционных структур, но и расширение возможностей их эффективного использования в новых областях физики и техники.

В качестве показателя эффективности решений в исследуемой вариационной постановке выбрана среднеквадратическая мера близости зависимости энергетического коэффициента пропускания $T(\omega)$ к требуемой зависимости $\tilde{T}(\omega)$ в заданном диапазоне частот $[\omega_{\min}, \omega_{\max}]$

$$J = \int_{\omega_{\min}}^{\omega_{\max}} [T(\omega) - \tilde{T}(\omega)]^2 d\omega \Rightarrow \min \quad (1)$$

где

$$T(\omega) = \Pi_z^{np} / \Pi_z^{nad}, \quad (2)$$

Π_z^{np} , Π_z^{nad} – проекции вектора Пойнтинга на ось z в прошедшей и падающей волнах соответственно. На основе теории многозначных отображений [5,6] разработана методика продолжения решения по параметру. Разработанная методика исследования предельных возможностей, основанная на теории многозначных отображений и методах продолжения по параметру, позволяет осуществлять эффективное конструирование слоисто-неоднородных структур со сложными характеристиками при волновых воздействиях

Литература:

4. Гусев Е.Л. Математические методы синтеза слоистых структур. – Новосибирск: Наука, 1993. – 262 с.
5. Гусев Е.Л. Конструктивные методы синтеза слоисто-неоднородных структур при воздействии упругих волн // Акустический журнал. – 2008. – Т.54. – №5. – С.1-8.
6. Гусев Е.Л. Качественные закономерности взаимосвязи параметров в оптимальных структурах в задачах оптимального синтеза неоднородных структур из дискретного набора материалов при волновых воздействиях // Доклады РАН. – 1996. – Т.346. – №3. – С.324-326.

7. *Гусев Е.Л.* Об априорном сужении допустимого набора материалов в задачах оптимального синтеза неоднородных структур из дискретного набора материалов при волновых воздействиях // Доклады РАН. – 1996. – Т.349. – №3. – С.329-331.
8. *Иванов В.К.* О некорректно поставленных задачах // Математический сборник. – 1963. – Т.61. – №2. – С.211-224.
9. *Лисковец О.А.* Некорректные задачи с замкнутым необратимым оператором // Дифференциальные уравнения. – 1967. – №4. – С.636-646.

СТРУКТУРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УРАВНЕНИЙ РЕГРЕССИИ ПРОЦЕССА АЗОТИРОВАНИЯ

Данеев А.В., Русанов В.А., Эглит В.Э.

*ФГБОУ ВПО Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск,
Россия*

В докладе представлена процедура оптимальной нелинейной аппроксимации при математическом моделировании процесса азотирования обрабатываемой поверхности механической детали в условиях инверсивного электростатического поля в рамках линейно-квадратичного представления уравнений векторной регрессии. Способ основан на квадратичной аппроксимации для отклонений векторного аргумента физико-химических факторов металлообработки от некоторого заданного режима азотизации и предъявляет минимальные требования к экспериментальным данным при идентификации математической модели процесса получения азотированного слоя.

Проведено построение нелинейной математической модели типа «вход-выход» для процесса азотирования в среде электростатического поля и используемой для технологического расчета параметров твердости материала обрабатываемой поверхности силовой детали, ее удельного механического износа, глубины нанесения азотированного слоя. Данная регрессионная модель использует идентифицированные (на базе экспериментальных данных) многомерные квадратичные уравнения, что позволяет адекватно описывать процесс азотирования в широком диапазоне вариаций степени диссоциации аммиака, температуры и длительности процесса, а так же электрического напряжения на паре «анод-катод». Обнаруженные отклонения расчетных (прогнозируемых) значений синтезированного азотированного слоя и экспериментальных данных не носят принципиального характера, вследствие чего в работе предложена эффективная методика оптимального расчета свойств и параметров многофакторного режима азотизации.

Рассмотрен класс стационарных статических многосвязных нелинейных систем типа «вход-выход», описываемых векторно-матричным уравнением регрессии вида

$$Y = c + Au + \text{diag} [u^T B_1 u, \dots, u^T B_n u] + \varepsilon(u); \quad (1)$$

где $Y \in R^n$ – вектор выходных сигналов системы, $u \in R^m$ – вектор задающих воздействий системы, $c \in R^n$, $A \in M_{n,m}(R)$, $B_i \in M_{m,m}(R)$, $B_i^T = B_i$ ($i=1, \dots, n$) и $\text{diag} [\dots]$ – диагональная $p \times m$ -матрица соответствующих билинейных управляющих воздействий $u^T B_i u$. Относительно вектор-функции $\varepsilon(u)$ предполагаем, что структура ее аналитического представления *a priori* неизвестна.

Изложенные в статье идеи можно развить в нескольких направлениях теоретико-прикладных изысканий по совершенствованию предложенных выше алгоритмов, а так же расширению рамок адекватности регрессионных уравнений азотизации за счет дополнительного исследования факторов ее нелинейности:

- на расширение линейно-квадратичной формы уравнений регрессии (1) ее «тейлоровским разложением» более высокого порядка;
- на учет в качестве расширенных координат выходного сигнала регрессионной модели таких физико-механических параметров синтезированного азотированного слоя в среде электростатического поля, как коэффициент сухого трения и хрупкость азотированного покрытия.

О СОГЛАСОВАНИИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ И РЕЗУЛЬТАТАХ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ УЛЬТРАДИСПЕРСНЫХ ПОРОШКОВ НА ОСНОВЕ ОКСИДОВ МЕТАЛЛОВ В ПЛАЗМЕ ВЧ И РАЗРЯДА

Данилова О.Т.

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

Представлена схема модели процесса переработки вещества полидисперсного состава, в высокотемпературном потоке теплоносителя. В качестве обрабатываемого материала использовались циркон-ильменитовое сырье Тарского месторождения и металлосодержащие отходы промышленных производств.

Модель представлена в виде системы уравнений, которые описывают в целом весь процесс плазменной обработки полидисперсного материала через ряд подсистем, характеризующих стадии процесса, что позволяет проводить расчеты значений:

- температуры реакции разложения вещества сложного состава как параметра, характеризующего равновесное состояние исследуемой системы;
- режимов процесса тепло - и массопереноса вещества;
- температуры центра и поверхности частицы заданного диаметра на текущем шаге времени;
- теплоемкости, электропроводности, вязкости, равновесной температуры плазмы;
- баланса мощностей в задаваемом диапазоне температур.

Установлено, что для получения устойчивого режима генерации нескинированного разряда необходимо обеспечить поглощение подводимой ВЧ мощности областью относительно прозрачной для ВЧ поля плазмы. А это возможно лишь за счет увеличения объема этой области, т.е. при фиксированном радиусе разрядной камеры – за счет увеличения длины плазменного столба. Следовательно, необходимо увеличивать длину индуктора, а значит и его индуктивность. Поэтому критерием, устраняющим произвол в выборе реактивных сопротивлений, является условие максимального значения индуктивности анодного контура автогенератора.

Согласно полученным данным для реакции разложения циркона, изменение изобарно-изотермического потенциала $\Delta Z^0 = 0$ происходит при температуре 1943К, что хорошо согласуется с литературными данными.

Анализ полученных результатов позволят предложить ряд рекомендаций по термообработке сухих дисперсных материалов в потоках плазменных теплоносителей. Так, например размер твердых частиц следует ограничить 50÷125 мкм, так как дальнейшее повышение ведет к увеличению времени термообработки и соответственно длины реактора.

Литература:

1. Ландия Н.А. Расчет высокотемпературных теплоемкостей твердых неорганических веществ по стандартной энтропии. – Тбилиси: Изд. АН Груз ССР, 1962.
2. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. – М.: Наука, 1987.

РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЧИСЛЕННОГО МЕТОДА ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Димитриенко Ю.И., Соколов А.П., Шпакова Ю.В.

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

Работа представлена серией фундаментальных и практических исследований, направленных на развитие математических моделей [1], численных методов [2] и создание программных инструментов совместного автоматического решения сопряженных прямых и обратных задач микромеханики композиционных материалов (КМ). Объектом исследования являются упруго-прочностные характеристики периодических КМ [3], включая их компоненты.

В практических задачах часто требуется определять эффективные характеристики КМ при частично неизвестных характеристиках компонент КМ. Многие из этих характеристик не могут быть получены экспериментальным путем, например, модуль Юнга или предел прочности углеродного волокна в поперечном к его оси направлении для тканевого КМ.

Реализация задачи позволяет преодолеть эту проблему и устойчиво получать оценки недостающих характеристик исходных компонент КМ на базе экспериментальных данных о характеристиках самого КМ.

В основе работы лежат: методы многомасштабной асимптотической гомогенизации, методы оптимизации, метод конечных элементов, теория прочности и упругости в механике сплошных сред. Использовались тензорно-полиномиальные критерии прочности [5].

Для решения указанной задачи была разработана специализированная программная вычислительная подсистема в рамках системы конечно-элементного анализа GCD и проведены соответствующие численные исследования моделей КМ (см. рис.1) с последующей их верификацией.

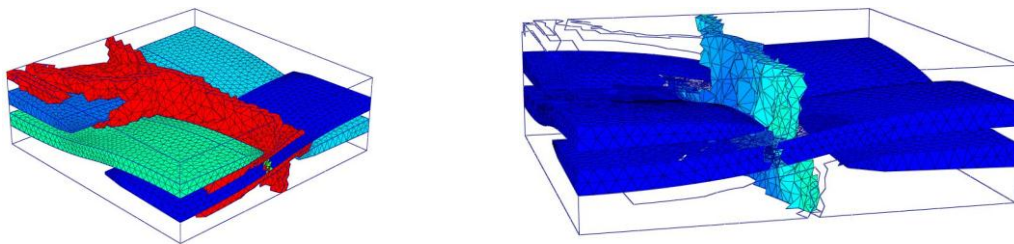


Рис.1. Процесс распространения микротрещины в ячейке периодичности тканевого композиционного материала с плотным типом переплетения.

Исследование было выполнено при поддержке гранта Президента РФ МК-765.2012.8 и проектов Минобрнауки ФЦП 14.B37.21.1869; ФЦП 14.B37.21.0448.

Литература:

1. Dimitrienko Y.I., Sokolov A.P. Elastic properties of composite materials // Mathematical Models and Computer Simulations. – 2010. – Vol.2. – N1. – P.116-130.
2. Димитриенко Ю.И., Соколов А.П. Система автоматизированного прогнозирования свойств композиционных материалов // Информационные технологии. – 2008. – N8. – С.31-38.
3. Бахвалов Н.С., Панасенко Г.П. Осреднение процессов в периодических средах. – М.: Наука, 1984. – 352 с.

4. *Победря Б.Е.* Механика композиционных материалов. – М.: МГУ, 1984. – 336 с.
5. *Малмейстер А.К., Тамуж В.П., Тетерс Г.А.* Сопротивление полимерных и композитных материалов. – Рига: Зинатне, 1980. – 572 с.

ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПОЛОСЫ И БАЛКИ ИЗ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ ПРИНЦИПА СЖАТЫХ ОТОБРАЖЕНИЙ

Зверьяев Е.М.

ФГБУН Институт прикладной математики им М.В. Келдыша РАН, г. Москва, Россия

В качестве исходных общих уравнений взяты уравнения плоской задачи теории упругости для длинной упругой полосы. Модуль упругости и коэффициент Пуассона считаются функциями высоты поперечного сечения полосы. Уравнения приводятся к безразмерному виду, и в них выделяется малый параметр, равный отношению высоты полосы к ее длине. Интегрирование системы из семи уравнений с семью неизвестными производится с помощью метода простых итераций, позволяющего установить вид асимптотических разложений по малому параметру и показатели весовых коэффициентов каждого искомого неизвестного. В качестве величин нулевого приближения выбираются функции поперечного перемещения и напряжение сдвига τ_0 . Полагая эти величины основными, определяем через них последовательно остальные неизвестные в нулевом приближении и w_1 и τ_1 как величины первого приближения. Если функции нулевого приближения выбраны зависящими только от поперечной координаты, решение записывается в квадратурах по поперечной координате. При этом появляются, как произволы интегрирования, функции продольного перемещения u_0 и σ_0 . Для определения новых четырех неизвестных w_0 , τ_0 , u_0 и σ_0 записываются четыре граничных условия на продольных сторонах полосы. Из этих условий получается четыре дифференциальных уравнения в полных производных относительно неизвестных w_0 , τ_0 , u_0 и σ_0 . При этом уравнения относительно неизвестных w_0 , τ_0 выделяются в отдельную подсистему. После нахождения w_0 , τ_0 они входят в оставшиеся два уравнения относительно u_0 , σ_0 как известные члены, определяя величины растяжения-сжатия. Исходные семь неизвестных выражаются через найденные четыре путем прямых действий, без интегрирования. Если продольные края свободны от каких-либо ограничений и некоторым образом загружены (модель балки), в эти четыре уравнения входят 12 коэффициентов жесткости, вычисляемые через квадратуры относительно поперечной координаты. В общем случае эти интегральные характеристики можно вычислить, по крайней мере, численно. Для слоистой полосы интегралы легко вычисляются аналитически. Приведен пример изгиба двухслойной полосы, в котором аналитически вычислены все искомые семь неизвестных задачи.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИСЛОКАЦИОННОЙ СТРУКТУРЫ КОМПОЗИТНОГО СПЛАВА

Емалетдинов А.К., Талипов Р.Р.

Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа, Россия

Современные никелевые жаропрочные сплавы являются многокомпонентными двухфазными монокристаллическими наноструктурными композиционными материалами, состоящими из кубических зерен жаропрочного интерметаллида размером до 0,5 мкм и соединенных тонкими прослойками легированного никеля толщиной до 0,05 мкм. Обе фазовые составляющие имеют изоморфные ГЦК кристаллические решетки с различными периодами, модулями упругости и другими физико-химическими свойствами. При нагреве до рабочих температур порядка 1150К и охлаждении после рабочего процесса происходят кинетические процессы зарождения, взаимного превращения в системе взаимодействующих дефектов различного вида точечных, дислокаций, границ зерен, пор и микротрещин. Несоответствие параметров решетки (мисфит) приводит к накоплению в системе упругой энергии, которая определяется поверхностной межфазной энергией, различием упругих модулей, коэффициента теплового расширения фаз и т.п. Образование сетки дислокаций несоответствия определяется термодинамическим условием минимума упругой энергии системы. Релаксация упругой энергии может осуществляться по механизму Ван дер Мерве путем образования сетки дислокаций несоответствия вблизи межфазной границы. Плотность дислокаций определяется из минимума упругой энергии системы. Реальная структура жаропрочного никелевого сплава состоит из кубических зерен жаропрочного интерметаллида размером до 0,5 мкм и соединенных тонкими прослойками легированного никеля толщиной до 0,05 мкм. Обе фазовые составляющие имеют изоморфные ГЦК кристаллические решетки с различными периодами, модулями упругости и другими физико-химическими свойствами. Рассмотрена упрощенная плоская модель образования дислокационной сетки в жаропрочном никелевом сплаве, которая может быть представлена в виде бесконечной трехслойной пластины, состоящей из двух пластин интерметаллида толщиной h , разделенных тонкой пластиной никеля толщиной d , $d < h$. Проведено численное исследование системы уравнений. Проанализированы упругие поля тензора деформаций и напряжений в пленке и запасенная энергия, определяемая несоответствием решеток. Дислокационная сетка моделируется системой двух бесконечных прямолинейных взаимно ортогональных дислокаций несоответствия с неизвестным расстоянием между дислокациями, определяемым условием минимума упругой энергии. Проанализирована критическая толщина пластины никеля, когда сетка дислокаций несоответствия становится энергетически невыгодной. Исследуется более точная модель сплава содержащего кубические нано зерна. В этом случае релаксация энергии несовпадения происходит путем образования петель дислокаций. Рассмотрена энергия системы при образовании одиночной петли дислокации несовпадения и группы таких петель. Проанализированы энергетические и силовые условия образования петли дислокации. Рассмотрена модель, когда вокруг зерна образуется несколько петель дислокаций, находящихся на неизвестном расстоянии друг от друга, зависящем от параметра несоответствия. Приводятся результаты численного моделирования рассмотренных моделей.

МОДЕЛИРОВАНИЕ КИНЕТИКИ РОСТА ПОР В КОМПОЗИТНОМ СПЛАВЕ

Емалетдинов А.К., Талипов Р.Р.

Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа, Россия

Современные никелевые жаропрочные сплавы являются многокомпонентными двухфазными монокристаллическими наноструктурными композиционными материалами, состоящими из кубических зерен жаропрочного интерметаллида размером до 0,5 мкм и соединенных тонкими прослойками легированного никеля толщиной до 0,05 мкм. Концентрация вакансий меняется в широких пределах в течение рабочего цикла двигателя, и после его остановки избыточная концентрация может приводить к зарождению пор. Избыточная концентрация вакансий определяется рабочей температурой, напряженным состоянием сплава, состоянием границ зерен и др. Периодические процессы зарождения и стекания избыточной концентрации вакансий будут определять кинетику зарождения и роста пор. Рассмотрена модель диффузионного зарождения и роста поры в никелевом жаропрочном сплаве при циклическом термомеханическом нагружении. Структура сплава моделируется бесконечной периодической системой кубических зерен интерметаллида, разделенных тонким слоем никеля. Благодаря размерному несоответствию возникают внутренние напряжения и сетка дислокаций несоответствия. Вследствие различных коэффициентов теплового расширения при термомеханическом нагружении меняется напряженное состояние сплава. Выполнена термодинамическая оценка условий образования поры критического размера. Проведен анализ критического размера пор с учетом влияния межфазной границы, сетки дислокаций несоответствия, концентрации напряжений в никеле, температурных напряжений и др. Показано, что критический размер поры существенно уменьшается при учете перечисленных выше энергетических воздействий. Выполнены численные расчеты критического размера поры при действии различных факторов. Рассмотрена задача кинетики вакансий при циклическом термомеханическом нагружении. В процессе разгрузки возникает избыточная неоднородная неравновесная концентрация вакансий, определяемая тепловыми, силовыми нагрузками, дислокационной структурой и диффузионными процессами потоков химических компонентов сплава, как в границах, так и в зернах интерметаллида, так и в никелевых прослойках. Проведены численные расчеты неоднородной концентрации вакансий в зернах интерметаллидов и никелевой прослойке при действии термомеханической нагрузки и различных значениях параметров. Исчезновение избыточной концентрации вакансий возможно на различных стоках дислокациях, границах, порах. Выполнены численные расчеты кинетики избыточной концентрации вакансий при действии различных стоков и критического размера поры под действием термомеханических нагружений. Рассмотрена кинетика роста поры при поглощении избыточной неравновесной концентрации вакансий. Записано уравнение динамики диффузионного роста поры под действием термомеханических нагружений. Смещение границы поры определяется потоком вакансий. Рассмотрены случаи кинетики изменения размера поры, как от потока вакансий, так и от поглощения их поверхностью поры. Рассмотрено влияние зернограницной диффузии и поглощения дислокационной сетки на скорость роста поры, проведены численные расчеты.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭВОЛЮЦИИ СТРУКТУРЫ КОМПОЗИТНОГО СПЛАВА ПРИ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

Емалетдинов А.К., Талипов Р.Р.

Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа, Россия

Современные никелевые жаропрочные сплавы являются многокомпонентными двухфазными монокристаллическими наноструктурными композиционными материалами, состоящими из кубических зерен жаропрочного интерметаллида размером до 0,5 мкм и соединенных тонкими прослойками легированного никеля толщиной до 0,05 мкм. Термомеханическое нагружение заключается в циклическом повышении температуры, статических и динамических напряжений. Под действием термомеханического нагружения происходит активация диффузионных процессов, в частности меняется состав и форма зерен интерметаллидов а именно рост и коалесценция зерен интерметаллида (образование рафт структуры). Рассмотрены модели изменения формы и колесценция зерен интерметаллида в никелевом жаропрочном сплаве при циклическом термомеханическом нагружении. Структура сплава моделируется бесконечной периодической системой кубических зерен интерметаллида, разделенных тонким слоем никеля. Благодаря размерному несоответствию возникают внутренние напряжения и сетка дислокаций несоответствия. Вследствие различных коэффициентов теплового расширения при термомеханическом нагружении меняется напряженное состояние сплава. Под действием внешних сил возникает движение границ зерен интерметаллида, определяемое потоками вакансий, зернограничной и объемной диффузией, градиентами температуры, напряжений, дислокационной структурой и зернограничными процессами. Рассмотрена задача кинетики вакансий при циклическом термомеханическом нагружении. Проведены численные расчеты неоднородной концентрации вакансий в зернах интерметаллидов и никелевой прослойке при действии термомеханической нагрузки и различных значениях параметров. Записаны термодинамические условия и уравнения, описывающие движение границы зерна. Выполнены численные расчеты кинетики избыточной концентрации вакансий при действии различных стоков и движения границы зерна под действием внешней силы - градиента температуры, напряжений, концентрации вакансий, возникающего под действием термомеханических нагружений. Проведен анализ движения границы зерна при действии зернограничной, объемной и дислокационной диффузии. Рассмотрен процесс коалесценции двух соседних зерен. Вследствие того, что диффузионные потоки на границу зерна пропорциональны косинусу угла между нормалью к данному участку поверхности и направлением внешней силы в однородном силовом поле скорости движения всех границ будут зависеть от угла. Это приводит к изменению формы зерна и коалесценции двух соседних зерен за время, когда движущиеся навстречу друг другу границы встретятся. Записано уравнение динамики диффузионного роста поры под действием термомеханических нагружений. Проанализированы различные случаи подвижности границы зерна, определяемые процессами поглощения потоков вакансий. Рассмотрены случаи подвижности границы и кинетики изменения размера зерна как от диффузионных потоков, так и от поглощения их границей. Рассмотрено влияние зернограничной диффузии и поглощения дислокационной сетки на скорость роста зерна, проведены численные расчеты.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПОЛЗУЧЕСТИ КОМПОЗИТНОГО СПЛАВА

Емалетдинов А.К., Талипов Р.Р.

Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа, Россия

На высокотемпературную ползучесть жаропрочного сплава большое влияние оказывает дислокационная структура сплава, в частности дислокационная сетка, вблизи межфазных границ. В процессе эксплуатации сплав подвергается большим термомеханическим нагрузкам при различных режимах работы. В результате наблюдается ползучесть, зависящая от размера ячеек дислокационной сетки, которая определяет долговечность сплава при эксплуатации. Реальная структура жаропрочного никелевого сплава состоит из кубических зерен кубических зерен жаропрочного интерметаллида размером до 0,5 мкм и соединенных тонкими прослойками легированного никеля толщиной до 0,05 мкм. Обе фазовые составляющие имеют изоморфные ГЦК кристаллические решетки с различными периодами, модулями упругости и другими физико-химическими свойствами. Экспериментально установлено, что скорость высокотемпературной ползучести жаропрочных никелевых сплавов пропорциональна размеру сетки дислокаций несоответствия. В работе проведено численное моделирование влияния дислокационной структуры на скорость высокотемпературной ползучести жаропрочного двухфазного никелевого сплава. Дислокационная сетка моделируется системой двух бесконечных прямолинейных взаимно ортогональных дислокаций несоответствия с заданным размером ячейки. Дислокации содержат включения, которые тормозят их движение. Движение дислокаций является термофлуктуационным, неконсервативным и определяется зарождением и движением перегибов. Рассмотрен случай переползания дислокаций вместе с закрепленными на ней включениями. Записаны выражения и уравнения диффузионной и дислокационной ползучести сплава. Сетка дислокаций несоответствия переползает диффузионными механизмами вместе с границами зерен под действием внешних термоупругих напряжений. Движущей силой переползания являются эффективные напряжения, включающие как внешние, так и дислокационные. Наряду с переползанием дислокаций под действием напряжений возможно их движение, связанное с диффузионными потоками избыточных вакансий. Если в результате действия источников и стоков вакансий в системе поддерживается пересыщение, то дислокации, которые могут являться стоками для избыточных вакансий, испытывают действие обобщенной термодинамической силы, определяемой градиентом химического потенциала вакансий вблизи дислокации. Проанализирована динамика дислокаций и скорость ползучести с учетом потока избыточных вакансий. Показано, что скорость ползучести пропорциональна размеру сетки дислокаций, что коррелирует с экспериментальными данными. Приводятся результаты численного моделирования рассмотренных моделей. Проведен анализ и сопоставление скорости высокотемпературной дислокационной ползучести со скоростью диффузионной зернограницной и объемной ползучести. Проведено сравнение полученных результатов с экспериментальными данными по ползучести жаропрочных никелевых сплавов с различной величиной размера сетки дислокаций.

КВАНТОВО-МЕХАНИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРУГИХ СВОЙСТВ НАНОЧАСТИЦ КАРБИДА ТИТАНА И КАРБИДА ВОЛЬФРАМА

Заводинский В.Г., Кулик М.А., Гниденко А.А.

*ФГБУН Институт материаловедения Хабаровский научный центр ДВО РАН,
г. Хабаровск, Россия*

Методом теории функционала плотности, совмещенной с методом псевдопотенциалов, исследованы механические свойства наночастиц карбида титана (Ti_4C_4 , $\text{Ti}_{15}\text{C}_{15}$, $\text{Ti}_{24}\text{C}_{24}$, $\text{Ti}_{36}\text{C}_{36}$) с кубической структурой, а также наночастиц карбида вольфрама с кубической (W_4C_4 , W_8C_8 и $\text{W}_{32}\text{C}_{32}$) и тригональной ($\text{W}_{12}\text{C}_{12}$, $\text{W}_{15}\text{C}_{15}$ и $\text{W}_{21}\text{C}_{21}$) геометрией. Получены равновесные атомные конфигурации наночастиц, определена зависимость модуля упругости от линейной деформации. Квантово-механические расчёты из первых принципов показывают, что наночастицы карбидов переходных металлов с кубической структурой ведут себя сходным образом под действием механических деформаций. Модуль упругости наночастиц имеет более выраженную зависимость от линейного размера частицы вдоль направления деформации, чем от общего количества атомов в частице. Величина модуля упругости наночастиц TiC имеет максимальное значение 1200 ГПа при минимальном размере частицы, и уменьшается при увеличении в 5 раз ее линейного размера вдоль направления деформации до 700 ГПа.

В случае кубического карбида вольфрама максимальное значение модуля упругости составляет 1940 ГПа для базовой частицы W_4C_4 и понижается при увеличении в 3 раза линейного размера этой частицы по всем трем направлениям до 1200 ГПа. Модули упругости базовых частиц кубических TiC и WC примерно в одинаковое число раз больше значений соответствующих массивному материалу.

В случае деформации тригональных частиц в направлении перпендикулярном расположению атомных слоёв зависимость модуля упругости от деформации аналогична полученной зависимости для кубических частиц. Максимальное значение модуля упругости составляет 1520 ГПа, минимальное – 1340 ГПа. Однако исследование деформации тригональных частиц вдоль формирования слоёв, приводит к неоднозначным выводам об изменении модуля упругости и требует дополнительных вычислений. В целом упругие свойства наночастиц определяются не только количеством атомов, но и внутренним строением частиц и их исследования требуют индивидуального подхода.

Литература:

1. Заводинский В.Г., Чибисов А.Н., Гниденко А.А., Алейникова М.А. Теоретическое исследование упругих свойств малых наночастиц с различными типами межатомных связей // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2005. – Т.11. – №3. – С.337-346.

**ПРИЛОЖЕНИЕ НЕЛОКАЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ДАРБУ
ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ТОЧНЫХ РЕШЕНИЙ УРАВНЕНИЯ ФОККЕРА-ПЛАНКА,
МОДЕЛИРУЮЩЕГО КОМПОЗИТ С МАГНИТНЫМИ ОДНОДОМЕННЫМИ
ЧАСТИЦАМИ**

Кудрявцев А.Г.

ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва, Россия

Композитные материалы, содержащие однодоменные магнитные наночастицы, привлекают большой интерес исследователей в связи с уникальными физико-механическими свойствами этих материалов. Например, магнитные жидкости с низкими концентрациями магнитного наполнителя демонстрируют магнитный отклик, схожий с парамагнитным, но характеризуемый гораздо более высокими значениями магнитной восприимчивости и намагниченности насыщения. Сильное влияние поля на магнитное состояние частиц приводит к изменениям таких механических характеристик материала как вязкость и модуль сдвига. Такие физико-механические свойства позволяют использовать композиты, содержащие однодоменные магнитные частицы, для различных приложений, включая магнитную запись информации, разработку новых катализаторов, а так же многочисленные биомедицинские приложения, связанные с транспортом малых доз лекарства и управляемым микровоздействием на организм.

В докладе для теоретического описания эволюции магнитного состояния частиц с учетом действия тепловых флуктуаций применяется подход Брауна [1] на основе использования кинетического уравнения типа Фоккера-Планка для плотности вероятности направления момента частицы. Уравнение Фоккера-Планка входит в класс уравнений, для решения которых показал свою эффективность метод преобразования Дарбу [2]. Преобразование Дарбу привлекало в последние годы наибольшее внимание в применении к уравнению Шрёдингера в связи с возможностью получения новых решаемых моделей квантовой механики и в связи с многочисленными связями с популярной тематикой метода обратной задачи рассеяния и теорией солитонов. Однако приложение преобразования Дарбу дает мощный инструмент получения точных аналитических результатов и в других областях (см. например [3]). В докладе описывается метод нахождения точных решений уравнения Фоккера-Планка на основе нелокального преобразования Дарбу.

Литература:

1. Brown W.F. Thermal fluctuations of single-domain particle // Phys. Rev. – 1963. – Vol.130. – N5. – P.1677-1686.
2. Matveev V.B., Salle M.A. Darboux transformations and solitons. – Springer, 1991.
3. Кудрявцев А.Г., Сапожников О.А. Получение точных решений неоднородного уравнения Бюргерса с использованием преобразования Дарбу // Акустический журнал. – 2011. – Т.57. – №3. – С.313-322.

ОДНОМЕРНАЯ ТРЕХУРОВНЕВАЯ МОДЕЛЬ НЕЛИНЕЙНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ СПЛАВА С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ ПРИ ФАЗОВЫХ И СТРУКТУРНЫХ ПРЕВРАЩЕНИЯХ

Мишустин И.В.

ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва, Россия

Мартенситная фаза сплавов с памятью формы (СПФ) состоит из отдельных мартенситных образований (пластин или игл), которые формируются путем зарождения и роста во время прямого фазового перехода и деградируют в ходе обратных процессов при обратном фазовом переходе (из мартенсита в аустенит). В общем случае они отличаются разной ориентацией кристаллической решетки, а также различным поведением под нагрузкой, что связано с разными условиями их формирования и историей нагружения. Для учета этих особенностей предложена нелинейная модель деформирования СПФ, в которой рассматриваются параметры состояния не только представительного объема в целом, но и отдельных совокупностей мартенситных образований в нем. Это позволяет учесть различия их поведения при структурном переходе (переориентации мартенсита) и корректно выразить деформации при обратном фазовом переходе, а также обосновать эффект реверсивной памяти формы (немонотонное изменение интенсивности неупругой деформации при обратном переходе без нагрузки после прямого перехода с реверсивным нагружением).

Приведены основные соотношения модели для одноосного растяжения-сжатия стержня. Определен ряд тестовых задач, имеющих аналитические решения, по которым можно судить о функциях, входящих в основные соотношения модели. К таким задачам относятся прямой переход под действием постоянного напряжения и последующее увеличение нагрузки, активное и реверсивное нагружение хаотического мартенсита, ориентированное прямое превращение, обратный переход с реверсивной памятью формы. Приведены соответствующие аналитические решения. В задаче с реверсивной памятью формы учтены структурный переход при изменении нагрузки и прерывание прямого перехода с возобновлением из двухфазного состояния. Рассмотрены более сложные задачи с одновременным протеканием фазовых и структурных превращений.

КВАНТОВО-МЕХАНИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МОДИФИКАЦИИ СИЛИКАТНОЙ КОМПОНЕНТЫ ШУНГИТА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ НАПОЛНИТЕЛЯ ПОЛИБУТАДИЕНСТИРОЛЬНОЙ КАУЧУКОВОЙ МАТРИЦЫ С УЛУЧШЕННЫМИ АДГЕЗИОННЫМИ И ПРОЧНОСТНЫМИ СВОЙСТВАМИ

Никитина Е.А., Яновский Ю.Г., Карнет Ю.Н.

ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва, Россия

Методами квантовой механики (NDDO, AM1) исследовалась возможность модификации силикатной компоненты шунгита для получения наполнителя полибутадиенстирольной каучуковой матрицы с улучшенными адгезионными и прочностными свойствами. Упрочнение резин при введении наполнителя объясняется образованием менее подвижного (адсорбированного на поверхности частиц наполнителя) слоя полимерной матрицы; подвижность цепей полимера в отсутствие наполнителя в толще матрицы значительно выше.

Представлены результаты расчета взаимодействия элемента цепи полибутадиенового полимера с поверхностью немодифицированных и модифицированных частиц силикатных компонентов шунгита. При этом в качестве модельной силикатной частицы был взят кластер, содержащий 18 кремний-кислородных тетраэдров, поверхность которого была покрыта гидроксилами, а в качестве модели элемента цепи полибутадиенстирола – олигомер, содержащий две мономерные единицы. Модифицирующие агенты были взяты из базы данных модификаторов силикатов. Рассчитывалась теплота адсорбции и сила сдвигового трения полибутадиенстирольной частицы на немодифицированной $(\text{SiO}_2)_{18}\text{-OH}$ и модифицированной различными заместителями $(\text{SiO}_2)_{18}\text{-O-SiR}_1\text{R}_2\text{R}_3$ силикатных частицах. Был выполнен перебор достаточно большого, представительного числа модификаторов. Подготовлены рекомендации для эксперимента.

ПРИМЕНЕНИЕ ГРАДИЕНТНЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ И ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ, ПРОТЕКАЮЩИХ В ТОНКОСЛОЙНЫХ КОМПОЗИТНЫХ СТРУКТУРАХ

Соляев Ю.О.¹, Лурье С.А.¹, Саганов Е.Б.², Харченко К.Д.²

¹*ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва, Россия*

²*ФГБУ ВПО Московский авиационный институт (НИИ), г. Москва, Россия*

В работе приводятся результаты прикладных исследований по моделированию деформированного состояния тонкослойных композитных структур, подверженных термомеханическому воздействию. Моделирование проводится с привлечением градиентных моделей деформируемых сред, так как традиционные подходы во многих случаях не дают адекватного описания деформирования тонкослойных структур.

Задачей работы является разработка и тестирование моделей для проведения достоверного анализа напряженного состояния ультратонких слоистых композитных структур с учетом температурного нагружения с высокими градиентами изменчивости по координатам, с учетом масштабных параметров и поверхностных эффектов.

В работе получена постановка и построено решение задачи о равновесии бесконечного композитного слоя при действии силовых и температурных нагрузках в рамках градиентной модели термоупругости в двумерной постановке. Решение задачи проводилось с использованием интегрального преобразования Фурье. Исходная система уравнений в частных производных была сведена к единственному уравнению восьмого порядка относительно введенной функции-потенциала. Обратное преобразование Фурье было построено численно.

В результате, были исследованы ряд прикладных задач о деформировании тонкослойных композитных структур при индентировании и в условиях термомеханического нагружения. Показано, что градиентные эффекты несут определяющую роль для структур, толщина которых сопоставима с протяженностью локальных межфазных зон, возникающих в области контакта разнородных слоёв.

Решение представленной задачи позволяет получить уточненные оценки прочности тонкослойных композитных покрытий и поверхностных структур материалов. Проведено исследование зависимости напряженного состояния слоёв с учетом масштабных параметров модели (толщина слоёв покрытия, диаметр индентора, градиент температурного поля, протяженность локальных градиентных эффектов в материале). Исследован характер возникающих деформаций и напряжений в многослойной структуре в условиях перепада температуры. На границе контактирующих слоёв в случае нагрева возникает локальная концентрация напряжений, которая не может быть учтена в классической постановке задачи термоупругости.

НОВЫЕ ГИПЕРБОЛИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ В МЕХАНИКЕ ГЕТЕРОГЕННЫХ СРЕД

Суров В.С., Березанский И.В.

Южно-Уральский государственный университет (НИУ), г. Челябинск, Россия

Односкоростные модели многокомпонентной среды используются при моделировании волновых процессов во вспененных жидкостях и полимерах, в пузырьковых жидкостях, для локализации контактных поверхностей в многожидкостной гидродинамике. Включение в уравнения смеси сил вязкого трения и теплопроводности расширяет сферу приложения модели и дает возможность проводить расчеты течений, например, углеводородных смесей, биологических жидкостей и т.д. Разработка математически корректных и физически непротиворечивых моделей многофазных сред является актуальной задачей, поскольку не все существующие к настоящему времени общие модели гетерогенных сред являются таковыми. В частности, если при рассмотрении явления распространения тепла в односкоростных гетерогенных средах воспользоваться законом Фурье, то тепловые волны будут перемещаться с бесконечными скоростями. Если же вместо закона Фурье применить закон Максвелла – Каттанео, учитывающий релаксацию теплового потока, то движение волн происходит с конечными скоростями, что в свою очередь связано с принадлежностью системы уравнений к гиперболическому типу. Включение сил вязкого трения в уравнения модели односкоростной многокомпонентной среды из [1] также приводит к появлению волн с бесконечно большими скоростями распространения. В докладе обсуждается модель среды, свободная от этого парадокса, в которой по аналогии с подходом Максвелла – Каттанео в теплопередаче также учтена релаксация вязких напряжений. Вязкие напряжения вводятся в уравнения модели односкоростной многокомпонентной среды на уровне смеси в целом, которые по виду совпадают с газодинамическими. В газовой динамике широко используется упрощенная формула для расчета вязких напряжений, которая для одномерных течений имеет вид $\sigma = \mu u_x$, где μ – коэффициент вязкости. Но применение этого соотношения приводит к потере гиперболичности исходной системы уравнений. Чтобы остаться в рамках гиперболической системы предлагается использовать соотношение

$$\tau_\sigma (\sigma_t + u \sigma_x) + \sigma = \mu u_x.$$

При рассмотрении многоскоростных сред в работе использовалась модель гетерогенной среды из [2], основанная на законах сохранения. Особенность этой модели состоит в том, что в ней вводится такое состояние среды как смесь в целом, характеризующая осредненными значениями скорости, плотности и т.д., уравнения для которых по виду совпадают с газодинамическими. К этим уравнениям добавляются соотношения, выражающие законы сохранения для отдельных компонентов смеси. Давление полагалось общим для всех фракций смеси. В докладе использована модификация модели из [2], учитывающая вязкие и теплопроводящие свойства смеси.

В работе показано, что при использовании релаксационных законов для диссипативных процессов системы уравнений в одно- и многоскоростном приближении относятся к гиперболическому типу. Для рассматриваемых моделей среды исследованы автомодельные решения типа бегущих волн, которые в дальнейшем могут быть использованы при конструировании решателей задачи Римана, используемых в численных схемах Годуновского типа.

Литература:

1. Суров В.С. Односкоростная модель гетерогенной среды с гиперболическим адиабатическим ядром // ЖВМ и МФ. – 2008. – Т.48. – №6. – С.1111-1125.
2. Суров В.С. Гиперболическая модель многоскоростной гетерогенной среды // ИФЖ. – 2012. – Т.85. – №3. – С.495-502.

Секция 5

Биомеханика

КОМПОЗИЦИЯ ДЛЯ ЛЕЧЕНИЯ И ПРОФИЛАКТИКИ ЗАБОЛЕВАНИЙ ПАРОДОНТА НА ОСНОВЕ ЛИСТЕРИНА, ШУНГИТ-СЕРЕБРЯННОГО НАНОКОМПОЗИТА И ПЕРЕКИСИ ВОДОРОДА

Завьялова И.В., Полтавцев А.М., Зарайский Е.И.

ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва, Россия

Пародонтит одно из самых распространенных стоматологических заболеваний. В России им страдает до 60% взрослого населения.

Одной из актуальных задач современной стоматологии является разработка профилактического средства от заболеваний пародонта, обладающего высокими антисептическими свойствами, и при этом безопасным для частого и самостоятельного использования. Наиболее широко распространенным препаратом для профилактики заболеваний пародонта является запатентованный в 1903 году листерин. Однако исследования листерина проводимые *in vivo* в разных странах показали не высокую его эффективность для профилактики кровоточивости десен у детей, в сравнении с полосканием чистой водой, исследования также показали что полоскания в разы менее эффективны, чем использование зубных нитей. Тем не менее, листерин за свою столетнюю историю зарекомендовал себя как один из самых эффективных препаратов для профилактики заболеваний полости рта для домашнего использования.

Учитывая вышеизложенное, а также опираясь на опыт использования шунгит-серебрянного нанокмползита в качестве высокоэффективного бактерицидного агента, была разработана композиция, включающая два эти вещества вкупе с перекисью водорода, используемой стоматологами для дезинфекции, и в методиках отбеливания зубов. Было исследовано биоцидное действие предложенной композиции на флору пародонтозного кармана.

В ходе исследований *in vitro* было показано, максимальное подавляющее действие на рост микрофлоры оказала смесь, содержащая 1% перекиси водорода и 0,005% шунгит-серебрянного нанокмползита. Листерин без примесей ингибировал рост флоры до разведения 1:50. В тоже время, смесь, содержащая листерин, ШС нанокмползит и перекись водорода в концентрации 0,3-1%, ингибировали рост флоры до разведения образца 1:1000, причем зависимость ингибиции от концентрации образца была практически линейной. Эффективность предложенной композиции в 20 раз превосходит эффективность чистого листерина. Причем, перекись водорода можно применять в низкой концентрации 0,3%, что практически исключает ее попадание в ЖКТ. ШС нанокмползит применяется в концентрации, являющейся абсолютно безвредной, так как эти препараты находятся в фармакопее и показаны для приема внутрь, в дозах, на несколько порядков превышающих предложенные нами.

Таким образом, была продемонстрирована высокая эффективность смеси, содержащей для создания нового высокоэффективного препарата для профилактики и лечения заболеваний пародонта.

ЭКСПРЕСС-ДИАГНОСТИКА МЕТОДОМ ИХА С ПРИМЕНЕНИЕМ ЗОЛОТЫХ НАНОЧАСТИЦ ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ОНКОМАРКЕРОВ - ПЛАЦЕНТАРНЫХ БЕЛКОВ ГЛИКОДЕЛИНА И IGFBP-1

Зарайский Е.И., Полтавцев А.М, Завьялова И.В.

ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва, Россия

Предложен метод одновременной экспресс-диагностики наличия онкомаркеров гликоделина и IGFBP-1 в сыворотке крови, основанный на иммунохроматографическом (ИХ) определении наличия этих антигенов в образцах. Для решения поставленной задачи использовали трехслойный иммунохроматографический анализ с использованием моноклональных антител. Моноклональные антитела (МАТ) к гликоделину и IGFBP-1, иммобилизованные соответственно в тест-зонах 6 и 7 ИХ-стрипа на нитроцеллюлозной мембране, реагируют с соответствующими антигенами (АГ) в образце сыворотки в процессе тангенциального перемещения материала образца по ИХ-стрипу. Одновременно происходит связывание конъюгата (КГ) МАТ против других эпитопов гликоделина и IGFBP-1 с нанокolloидным золотом (НКЗ) с АГ гликоделина и АГ IGFBP-1 соответственно. В результате при наличии в образце АГ гликоделина в тест-зоне 6 иммунохроматографического стрипа образуется комплекс КГ гликоделина-АГ гликоделина-АТ гликоделина. При наличии в образце АГ гликоделина в тест-зоне 7 образуется комплекс КГ IGFBP-1-АГ IGFBP-1-АТ IGFBP-1. В контрольной зоне образуется комплекс АТ против иммуноглобулинов мыши с несвязавшимися КГ гликоделина и КГ IGFBP-1. Образовавшийся комплекс позволяет визуализировать наличие АГ гликоделина и АГ IGFBP-1 в сыворотке крови, а комплекс в тест-зоне – визуализирует сохранность стрипа. Это позволяет проводить скрининговую диагностику наличия пациентов с раком печени и другими онкологическими заболеваниями в группах риска.

ВЫЯВЛЕНИЕ НАИБОЛЕЕ ДИАГНОСТИЧЕСКИ ЦЕННЫХ ОНКОМАРКЕРОВ ДЛЯ МАССОВОЙ СКРИНИНГОВОЙ ДИАГНОСТИКИ НАСЕЛЕНИЯ

Осьмак Г.Ж., Полтавцев А.М., Зарайский Е.И., Завьялова И.В.

ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва, Россия

Одной из актуальных задач современной медицины является разработка иммунологических методов скрининговой диагностики онкологических заболеваний. Известно, что за последние 20 лет смертность от онкологических заболеваний не уменьшается, а по некоторым нозологиям увеличивается. Основные достижения онкологии этого периода является появление лечебных методик, позволяющих практически на 100% излечивать пациентов с опухолями I стадии. Таким образом, основные надежды в снижении смертности и инвалидизации онкологических больных связана с максимально ранней диагностикой. Такая диагностика возможна только при массовом скрининге населения. Такая диагностика экономически и организационно доступна только при применении иммунологических методов, позволяющих быстро и дешево выявлять наличие онкомаркеров в биологических жидкостях у пациентов. Некоторые иммунологические методы могут использоваться населением для самодиагностики, так как не требуют специального оборудования, квалифицированной рабочей силы и имеют не значительную стоимость.

В ходе исследований методом ИФА показано, что в группе риска повышенная концентрация онкомаркеров встречается в следующем проценте случаев: AFP 87.8%; PSA 4,9%, CEA 34,1%; CA125 6,09%; CA19.9 28,04%. В контрольной группе повышение АФП, СЕА или РСА не обнаружено. Сумма процентных долей превышает 100%, что свидетельствует о наличии нескольких онкомаркеров в одной сыворотке у части пациентов. Было выявлено, что пары CEA&CA19.9; PSA&CEA встречается в 100% случаев, пары CEA&AFP; AFP&CEA; CA125&CEA; CA19.9&CEA; CA19.9&AFP в более 50% случаев. Все остальные пары в 50% и менее процентах случаев. Также, выборки исследуемых пар были разбиты на две группы: в первую группу вошли сыворотки концентрация в которых превысила cut-off, во вторую группу те, уровень онкомаркеров в которых оказался в пределах нормы. В случае пары CEA&CA125 были получены следующие результаты: в сыворотках в которых концентрация не превышает cut-off корреляция не обнаружена ($r=0,00052$). В сыворотках с повышенной концентрацией коэффициент корреляции Пирсона очень высок ($r=0,9452$). Аналогичная ситуация сложилась между AFP и CEA: в сыворотках в которых концентрация не превышает cut-off корреляция = 0,0052. В сыворотках в которых концентрация больше критической коэффициент корреляции Пирсона = 0,68. Для проверки значимости использовали t-критерий.

В ходе работы выявлено что, наиболее диагностически значимыми для целей массовой скрининговой диагностики населения явились маркеры AFP, CA19.9, CEA. Невысокий процент превышения cut-off маркерами CA125 и PSA соответствует распространенности диагностируемых ими заболеваний – рака яичника и рака предстательной железы среди общей онкологической патологии. Высокий коэффициент корреляции Пирсона = 0,9452 у CA125&CEA в сыворотках от пациентов с онкологическим заболеванием, говорит о наличие тесной ($p>0.99$) функциональной связи между экспрессией данных онкомаркеров, что в свою очередь может свидетельствовать о наличие общих участков в механизме экспрессии данных антигенов.

ИЗУЧЕНИЕ БИОБЕЗОПАСНОСТИ «ГЕЛЯ ДЛЯ ОБРАБОТКИ РУК ХИРУРГОВ «СЕРЕБРЯНАЯ ОРГАНЗА» НА ОСНОВЕ ШУНГИТ-СЕРЕБРЯННОГО НАНОКОМПОЗИТА

Полтавцев А.М., Завьялова И.В., Зарайский Е.И.

ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва, Россия

Состояние кожи рук хирургов из-за частого усиленного мытья, обработок стерилизующими составами и применению резиновых перчаток с тальком внутри, которые нарушают газо- и водо-обмен как сами по себе, так и посредством закупоривания пор тальком, зачастую, неудовлетворительно. Часто наблюдается сухость кожи, ее преждевременное увядание а также различные патологически-дерматиты, экземы и некоторые другие. Мелкие, и даже невидимые глазу повреждения кожи у медиков, особенно работающих в непосредственном контакте с биологическими жидкостями, слизистыми оболочками, проводящих хирургические вмешательства, крайне опасны, являясь «входными воротами» для различных типов инфекций. С целью избежания вышеперечисленных осложнений был разработан специальный гель для обработки рук хирургов, главный действующим веществом которого является шунгит-серебрянный наноккомпозит. Целью данного исследования было изучение биобезопасности данного продукта культуральным методом, а также его косметические свойства. В ходе исследования использовали следующую методику: клетки фибробластов MSC культивируют в среде роста RPMI 1640 с 10% эмбриональной сыворотки, амфотерицином В (5 мкг/мл) и гентамицином (4 мкг/мл) во флаконах площадью 25 см². Культуральную среду из лунок, содержащих монослой клеток фибробластов, удаляют и вносят дозатором в каждую лунку культуру серию 10-ти кратных разведений образцов наноматериалов в объеме, составляющем 10 % от общего объема культуральной среды в лунке планшета, вносят в лунки с монослоем сразу же после внесения культуры. В качестве контроля используют клетки фибробластов, Плашки центрифугируют 1 час при 3000 об/мин при комнатной температуре и затем помещают в СО2-инкубатор. Инкубируют плашки в СО2–инкубаторе при температуре 37С0 в течение 48 часов. Через 48 часов инкубирования покровные стекла из 24-луночных плашек извлекают при помощи пинцета, и помещают во влажную камеру. Детекция результатов методом иммунофлуоресценции.с помощью витального красителя – акридин оранжевый в смеси с этидиум бромидо,окрашивающего живые клетки в зеленый , а мертвые в красный цвет при люминисцентной микроскопии.

В результате исследований предварительно продемонстрирована биобезопасность геля для рук хирургов, содержащего шунгит-серебрянный наноккомпозит”Серебряная органза» культуральным методом. 2)Показана нормализация влажности, жирности и упругости кожи рук хирургов после однократной обработки геля для рук хирургов, содержащего шунгит-серебрянный наноккомпозит”Серебряная органза».

ОПРЕДЕЛЕНИЕ БИОБЕЗОПАСНОСТИ НАНОМАТЕРИАЛОВ КУЛЬТУРАЛЬНЫМ МЕТОДОМ

Полтавцев А.М., Зарайский Е.И., Завьялова И.В.

ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва, Россия

Цель исследования состояла в изучении биобезопасности новых методов лечения пародонтоза при наличии адентии, пародонтита и деструктивных периодонтитов с использованием комплексной функциональной имплантационной системы на основе новых наноструктурированных интеллектуальных материалов и наногелей.

Были проведены исследования разработанной системы для восстановления зубов и тканей челюсти, основными элементами которой являются композиционный материал на основе наноструктурированного никелида титана (НСНТ) — «неживая составляющая» и богатая тромбоцитами плазма (БТП) крови пациента — «живая составляющая», которые после ультразвукового микширования в виде геля инъекционно вводятся в ткань.

Было проведено изучение биобезопасности компонентов системы культуральным методом. С этой целью были получены первичные культуры Вортонова студня пуповины человека, обогащенные стволовыми клетками. Наличие стволовых клеток было подтверждено иммолюминисцентной окраской культуры на нестин. С помощью полученных культур определяли дозозависимую острую токсичность используемых материалов, дозозависимую хроническую токсичность используемых материалов и их цитостатический эффект. Было показано отсутствие острой и хронической токсичности, а также цитостатического эффекта всех компонентов системы *in vitro*. Затем были проведены исследования системы в условиях клиники *in vivo*. Результатом проведенного лечения являются функционирование вылеченных зубов в течение более чем 4 лет по завершении лечения деструктивных (со значительной степенью деструкции) периодонтитов причинных зубов эндодонтическим и инъекционно-внутрикостным методами или их комбинацией с ЭЭИ; увеличение объема костной ткани челюсти (с уплотнением ее структуры) инъекционно-внутрикостным методом, восстановление целостности зубных рядов ДИ в комбинации с гетерофазными композитами на основе БТП при адентии.

Исследования показали высокую биобезопасность и эффективность системы как *in vitro*, так и *in vivo*, при клинических испытаниях.