

На правах рукописи



Люкшин Петр Александрович

**МОДЕЛИРОВАНИЕ КОМПОЗИТОВ
ПРИ МЕХАНИЧЕСКИХ, ТЕМПЕРАТУРНЫХ,
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ
И ВЫЧИСЛЕНИЕ ИХ ЭФФЕКТИВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК**

01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Томск – 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук.

Научный консультант:

доктор технических наук,
профессор, профессор РАН
Панин Сергей Викторович

Официальные оппоненты:

Аннин Борис Дмитриевич, действительный член РАН, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук, советник РАН

Радченко Андрей Васильевич, доктор физико-математических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный архитектурно-строительный университет», институт кадастра, экономики и инженерных систем в строительстве, директор

Плехов Олег Анатольевич, доктор физико-математических наук, профессор РАН, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук, Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук – филиал ПФИЦ УрО РАН, заместитель директора

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт прикладной механики Российской академии наук

Защита состоится 28 сентября 2018 года в 14 час. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.267.13, созданного на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36 (корпус № 10 (НИИ ПММ), аудитория 239).

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке и на официальном сайте федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» www.tsu.ru.

Материалы по защите диссертации размещены на официальном сайте ТГУ:
<http://www.ams.tsu.ru/TSU/QualificationDep/co-searchers.nsf/newpublicationn/LyukshinPA28092018.html>

Автореферат разослан « ____ » июня 2018 года

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук

Пикуשא
Елизавета Владимировна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертационного исследования. Композиционные материалы (КМ) широко используются в современной аэрокосмической, авиационной технике, судостроении, автомобилестроении, строительстве, медицине и т. д. Инженеру-конструктору необходимо знать широкий набор свойств композитов. Паспорт физических характеристик композиционного материала может включать до 50 наименований. Для определения характеристик композита могут использоваться как экспериментальные, так и теоретические методы. Большое количество уже имеющихся и вновь создаваемых материалов требует расширения фронта экспериментальных работ, что связано с большими материальными и временными затратами. Логично центр тяжести работ по созданию и исследованию новых материалов перенести из области лабораторных экспериментов в область физических и математических исследований. Определение эффективных деформационных, теплофизических, электрофизических характеристик композиционного материала, основанное на результатах решения краевых задач теории упругости, теплопроводности, электростатики, электропроводности представляется рациональным и рентабельным.

Цель работы. Создание, верификация и использование моделей дисперсно-наполненных композитов, учитывающих структуру материала, свойства компонент, характер межфазного взаимодействия, для определения эффективных характеристик композитов при механических, тепловых, электромагнитных воздействиях. Также необходимо создать и реализовать модель термобарьерного покрытия при тепловом ударе, включающее решение задач теплопроводности, термоупругости и устойчивости.

Для достижения поставленной цели были поставлены и решены следующие **задачи**:

1. Задача напряженно-деформированного состояния (НДС) структурно-неоднородного материала и определение его эффективных деформационных характеристик;

2. Задача теплопроводности в структурно-неоднородном теле и определение его эффективных теплофизических характеристик;

3. Задачи электростатики и электропроводности для структурно-неоднородного тела и определение его эффективных электрофизических свойств;

4. Задачи о тепловом ударе, потере устойчивости термобарьерного покрытия, о НДС системы «термобарьерное покрытие – подложка» после потери устойчивости.

Научная новизна. Предложен единый подход к моделированию деформационных, теплофизических, электрофизических характеристик дисперсно-наполненного композита, основанный на решении краевых задач теории упругости, теплопроводности, электростатики, электропроводности.

Разработаны процедуры перехода:

1. от параметров НДС и потенциальной энергии деформации структурно-неоднородного тела к эффективным деформационным характеристикам композита;

2. от поля температуры и количества теплоты в структурно-неоднородном теле к эффективному коэффициенту теплопроводности композита;

3. от распределения электрического потенциала, напряженности, энергии электромагнитного поля к эффективной диэлектрической проницаемости композита, от потенциала, напряженности электрического поля постоянного тока и мощности тепловых потерь в структурно-неоднородном теле к эффективной электрической проводимости композита.

Разработанные методики использованы при анализе термобарьерного покрытия при тепловом ударе для решения задач теплопроводности, определения докритического НДС, потери устойчивости покрытия, НДС покрытия и подложки после потери устойчивости.

На защиту выносятся следующие научные результаты:

1. Модели дисперсно-наполненного композиционного материала (КМ) при механических, тепловых, электромагнитных воздействиях, основанные на решении краевых задач математической физики.
2. Алгоритмы численной реализации нелинейных краевых задач плоской теории упругости, задач стационарной и нестационарной теплопроводности, электростатики и электропроводности.
3. Методы определения эффективных характеристик композита (модуль упругости, коэффициент теплопроводности, диэлектрическая проницаемость, электрическая проводимость) как функций структуры и характеристик фаз композита.
4. Установленные закономерности возникновения и развития отслоений на границах «матрица – включения» и их влияние на эффективные свойства композитов.
5. Модель термобарьерного покрытия при тепловом ударе, позволяющая объяснить и предсказать эффекты отслоения и разрушения в системе «подложка – покрытие».

Достоверность и обоснованность результатов. Достоверность полученных результатов базируется на использовании фундаментальных соотношений теории упругости, теплопроводности, электростатики,

электропроводности и апробированных численных методов (МКЭ, МКР) при решении соответствующих краевых задач, подтверждена сравнением численных результатов автора с аналитическими и численными результатами, полученными другими авторами, сравнением численных и экспериментальных данных.

Теоретическая и практическая значимость диссертации и использование полученных результатов. Значимость полученных результатов для науки и практики заключается в том, что разработаны процедуры перехода а) от параметров НДС и потенциальной энергии деформации структурно-неоднородного тела к эффективным деформационным характеристикам композита; б) от поля температуры и количества теплоты в структурно-неоднородном теле к эффективному коэффициенту теплопроводности композита; в) от распределения электрического потенциала, напряженности, энергии электромагнитного поля к эффективной диэлектрической проницаемости композита, от потенциала, напряженности электрического поля постоянного тока и мощности тепловых потерь в структурно-неоднородном теле к эффективной электрической проводимости композита. Разработанная и доведенная до уровня прикладных программ модель дисперсно-наполненного композита позволяет на основе данных о внутренней структуре, свойствах компонент материала прогнозировать деформационные, теплофизические, электрофизические характеристики материала. Разработанные методики могут быть рекомендованы для анализа деформационного поведения многокомпонентных термобарьерных покрытий в условиях термического удара при отработке новых составов и режимов их формирования.

Достоверность и обоснованность результатов. Достоверность полученных результатов базируется на использовании фундаментальных соотношений теории упругости, теплопроводности, электростатики, электропроводности и апробированных численных методов (МКЭ, МКР) при решении соответствующих краевых задач, подтверждена сравнением численных результатов автора с аналитическими и численными результатами, полученными другими авторами, согласием численных и экспериментальных данных.

Личный вклад. Предложенные модели и алгоритмы разработаны и реализованы в виде программ для ЭВМ лично автором. Им же самостоятельно выполнена постановка задач диссертационного исследования, анализ и обсуждение результатов теоретических и экспериментальных изысканий.

Внедрение работы. На разработанный комплекс программ получены 2 свидетельства о регистрации программ для ЭВМ в Роспатенте. Автор принимал участие в работах по договору с Министерством промышленности и торговли РФ (Гос. Контракт № 13411.1006899.11.065) «Исследование и разработка базовой технологии производства полимерных композиционных материалов с заданными деформационно-прочностными и теплофизическими характеристиками путем поверхностной и объемной модификации полимеров наполнителями, в том числе наноструктурированными» (2013–2015 гг.), а также прикладном научном исследовании по теме: «Разработка с использованием многоуровневых компьютерных моделей иерархически армированных гетеромодульных экструдированных твердосмазочных нанокомпозитов на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена для применения в узлах трения и футеровки деталей машин и механизмов, работающих в условиях Крайнего Севера» (соглашение с Министерством образования и науки РФ №14.604.21.0154, уникальный идентификатор проекта RFMEFI60417X0154, 2017-2018 гг.).

Результаты диссертации используются в учебном процессе на кафедре механики и графики Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники при подготовке образовательных дисциплин «Механика композиционных материалов», «Механика и технологии».

Связь работы с научными программами и темами. Диссертационная работа выполнена в Институте физики прочности и материаловедения СО РАН в соответствии с планами государственных и отраслевых научных программ:

Проекты фундаментальных исследований Сибирского отделения РАН и Государственных академий наук РФ:

Проект фундаментальных исследований СО РАН №3.6.1.1 «Разработка принципов физической мезомеханики многоуровневых систем и создание на их основе конструкционных и функциональных материалов с наноструктурой во всем объеме, только в поверхностных слоях, с наноструктурными покрытиями или модифицированными наноструктурными наполнителями» (2007–2009 гг.); Проект фундаментальных исследований СО РАН Ш.20.1.3 «Разработка методологии и критериев диагностики состояния нагруженных материалов на основе многоуровневого подхода» (2010-2012 гг.); Проект фундаментальных исследований государственных академий наук № Ш.23.1.3. «Научные основы диагностики предразрушения и оценки ресурса работы многоуровневых структурно-неоднородных сред» (2013–2016 гг.); Проект фундаментальных исследований государственных академий наук № 23.1.3. Научные основы многоуровневого подхода к мониторингу, оценке

механического состояния и диагностике предразрушения конденсированных сред и мягкой материи (soft matter) (2017–2019 гг.).

Проекты Российского фонда фундаментальных исследований:

РФФИ 97-01-00586-а «Исследование фрагментации в полимерах и композитах с полимерной матрицей при действии внешних полей как основы диагностики предразрушения материалов» (1997–1998 гг.); РФФИ 05-01-98005-р_обь_а «Разработка научных основ и методов реализации задач компьютерного конструирования полимерных композиций» (2005–2006 гг.); РФФИ 06-01-96923-р_офи «Разработка физико-химических основ повышения эксплуатационных характеристик конструкционных и функциональных объемных материалов и защитных покрытий из сверхвысокомолекулярного полиэтилена путем модификации нанопорошками и нановолокнами» (2006–2008 гг.); РФФИ 06-08-01305-а «Исследование влияния нанодисперсных керамических наполнителей на адгезионную прочность, износо- и стойкость к агрессивным средам полимерных материалов и покрытий на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена для широкого освоения в химической и металлургической отраслях и машиностроении» (2006–2008 гг.); РФФИ 06-08-81028-Бел_а «Научные основы формирования высокопрочных и износостойких полимерных покрытий с наноструктурными наполнителями» (2006–2007 гг.); РФФИ 08-01-00205-а «Разработка основ и реализация методов вычислительной механики применительно к полимерным композитным материалам с учетом наноструктурных особенностей» (2008–2010 гг.); РФФИ 10-08-90011-Бел_а «Разработка, диагностика и аттестация наноструктурированных полимерных композиционных материалов для имплантатов» (2010–2011 гг.); РФФИ 09-08-00752-а «Научные основы повышения механических характеристик композиционных материалов на основе СВМПЭ с наномодификаторами путем активации межфазных взаимодействий на интерфейсах «полимер – наполнитель»» (2009–2011 гг.); РФФИ 12-08-00930-а «Высокоэнергетическая модификация СВМПЭ и нанокомпозитов на его основе для кратного увеличения их износостойкости, механических свойств и технологичности» (2012–2014 гг.); РФФИ 12-08-90040-Бел_а «Разработка и экспериментальная верификация моделей трибомеханического поведения нанокомпозитов на основе полимерной матрицы и гидроксипатита для медицины и методы диагностики их свойств» (2012–2013 гг.); РФФИ 14-08-90028 Бел_а «Разработка методов получения и диагностики антифрикционных биосовместимых нанокомпозитов на полимерной матрице» (2014–2016 гг.); РФФИ 16-48-700192 р_а «Научные основы создания многоуровневых твердосмазочных, экстудируемых,

антифрикционных композитов на базе перспективных термопластичных полимеров для медицины и машиностроения» (2016–2018 гг.).

Проекты специализированных отделений РАН:

Проект 13.2. Разработка многоуровневой гибридной модели пластической деформации и разрушения в условиях трибосопряжения Программы № 13 Отделения энергетики, машиностроения, механики и процессов управления РАН «Трибологические и прочностные свойства структурированных материалов и поверхностных слоев» (координатор академик РАН И.Г. Горячева)) (2011–2013 гг.); Проект 2.12.3. «Разработка и экспериментальная верификация многоуровневой модели пластической деформации и разрушения структурно-неоднородных материалов в условиях трибосопряжения» Программы фундаментальных исследований ОЭММПУ РАН № 2.12 «Многоуровневое исследование свойств и поведения перспективных материалов для современных узлов трения» (руководитель: член-корр. РАН Р.В. Гольдштейн) (2012–2014 гг.); Проект 1.11.2. «Многоуровневое моделирование и проектирование антифрикционных материалов и защитных покрытий с иерархической структурой, обладающих повышенным сопротивлением разрушению и изнашиванию» Программы фундаментальных исследований ОЭММПУ РАН №11 «Механика поверхностных и интерфейсных явлений в проектировании материалов с повышенным сопротивлением разрушению и изнашиванию» (координатор: ак. И.Г. Горячева, ак. Н.Ф. Морозов) (2016–2017 гг.).

Публикация результатов. Результаты представлены в 48 работах, в том числе 29 статей в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (из них 3 статьи в зарубежных научных журналах, индексируемых Web of Science и/или Scopus; 1 статья в российском научном журнале, переводная версия которого индексируется Scopus), 11 статей в сборниках материалов конференций, индексируемых Web of Science, 2 свидетельства о регистрации программы для ЭВМ, 5 коллективных монографий, 1 статья в зарубежном научном журнале.

Апробация работы. Результаты работы были представлены на следующих конференциях: Международная конференция по физической мезомеханике, компьютерному конструированию и разработке новых материалов, 7–11 сентября 2009 г., Томск; Третья международная конференция «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов», Москва, 12–15 октября 2009 г.; International Forum on Strategic Technologies (IFOST'2009), October 21–23, 2009 г., Ho Chi Minh City, Vietnam; Международная научно-техническая

конференция «Полимерные композиты и трибология» (ПОЛИКОМТРИБ – 2009), Гомель, Беларусь, 22–25 июня 2009 г.; Всероссийская конференция «Механика и наномеханика структурно-сложных и гетерогенных сред. Успехи, проблемы, перспективы» г. Москва, ИПРИМ РАН, 30 ноября – 2 декабря 2009 г.; Шестая международная конференция «Материалы и покрытия в экстремальных условиях: исследования, применение, экологически чистые технологии производства и утилизации изделий», 20–24 сентября 2010 г., Большая Ялта, Понизовка, Автономная республика Крым, Украина; Научно-техническая конференция с участием иностранных специалистов «Трибология – машиностроению», посвящённая 120-летию со дня рождения проф. М.М. Хрущёва, 7–9 декабря 2010 г., Москва, ИМАШ РАН им. А.А. Благонравова; Всероссийская конференция «Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред» (к 90-летию со дня рождения академика И.Ф. Образцова), 23–25 ноября 2010 г., Москва; Международная конференция «Современные проблемы прикладной математики и механики: теория, эксперимент и практика», посвящённой 90-летию со дня рождения академика Н.Н. Яненко. Новосибирск, Академгородок, 30 мая – 4 июня 2011 г.; Международная конференция по физической мезомеханике, компьютерному конструированию и разработке новых материалов, 7–11 сентября 2011 г., Томск, Россия; The 3rd International Conference on Heterogeneous Material Mechanics, May 22-26, 2011, Shanghai (Chong Ming Island), China; Международная конференция «Математические и информационные технологии», Врнячка Баня, Сербия, , 31.08 – 05.09.2011; 19th European Conference on Fracture «Fracture Mechanics for Durability, Reliability and Safety», Kazan, Russia, 26–31 August, 2012; Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики. Всероссийская научная конференция, посвящённая 50-летию полета Ю.А. Гагарина и 90-летию со дня рождения основателя и первого директора НИИ ПММ ТГУ А.Д. Колмакова. 12–14 апреля 2011 г. Томск; Всероссийская научно-техническая конференция с участием иностранных специалистов «Проблемы машиноведения: трибология – машиностроению», Москва, 29 - 31 октября 2012 г.; IV Всероссийский симпозиум «Механика композиционных материалов и конструкций», Москва, ИПРИМ РАН, 4–6 декабря 2012 г.; Международная конференция «Иерархически организованные системы живой и неживой природы», 9-13 сентября 2013 г., Томск; Восьмая всероссийская научная конференция «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики», посвящённая 135-летию ТГУ и 45-летию НИИ ПММ ТГУ. Томск, 22-26 апреля, 2013 г.; Международная конференция «Физическая мезомеханика многоуровневых систем-2014. Моделирование, эксперимент, приложения», 3-5

сентября 2014 г., Томск; 5-ая международная научно-техническая конференция «Техника и технология нефтехимического и нефтегазового производства», 25-30 апреля 2015 г. Омск; XI Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики, 20 – 24 августа 2015 г., Казань; International Symposium on Heterogeneous Material Mechanics (ISHMM-2016), 8–10 June, 2016, Chongqing, China; Международная конференция «Перспективные материалы с иерархической структурой для новых технологий и надежных конструкций», 19–23 сентября 2016 г., Томск; 6th World Tribology Congress (WTC 2017), Beijing International Convention Center, Beijing, China, September 17–22, 2017; 7-я Всероссийская научная конференция с международным участием «Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред» им. И.Ф. Образцова и Ю.Г. Яновского, Москва, 21–23 ноября 2017 г.; Международная конференция «Перспективные материалы с иерархической структурой для новых технологий и надежных конструкций», Томск, 9–13 октября 2017 г.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, основной части, включающей в себя четыре главы, заключение, список цитированной литературы из 118 источников, 1 приложение. Объем диссертационной работы составляет 203 страницы. Работа иллюстрирована 91 рисунком и 1 таблицей.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, дан краткий литературный обзор, сформулирована цель и аргументирована научная новизна исследований, показана практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения.

В первой главе излагается численный метод решения плоской задачи теории упругости с учетом физической и геометрической нелинейности.

Краевая задача теории упругости решается методом конечных элементов (МКЭ), реализующим вариационный принцип Лагранжа, с использованием процедуры последовательных нагружений. Для первого шага матрица жесткости, отражающая наличие начальных напряжений, равна нулю. После первого шага вычисляются новые координаты узловых точек, а также перемещения, деформации и напряжения. Матрица жесткости, используемая в методе перемещений, и матрица жесткости, учитывающая влияние начальных напряжений, пересчитываются на каждом шаге нагрузки (или связанного с ней параметра). Соотношения между приращениями напряжений и деформаций в общем случае меняются от шага к шагу, отражая нелинейную зависимость напряжений от деформаций.

Вычисление эффективных механических характеристик КМ с регулярной структурой рассматривается на примере анализа НДС ячейки периодичности.

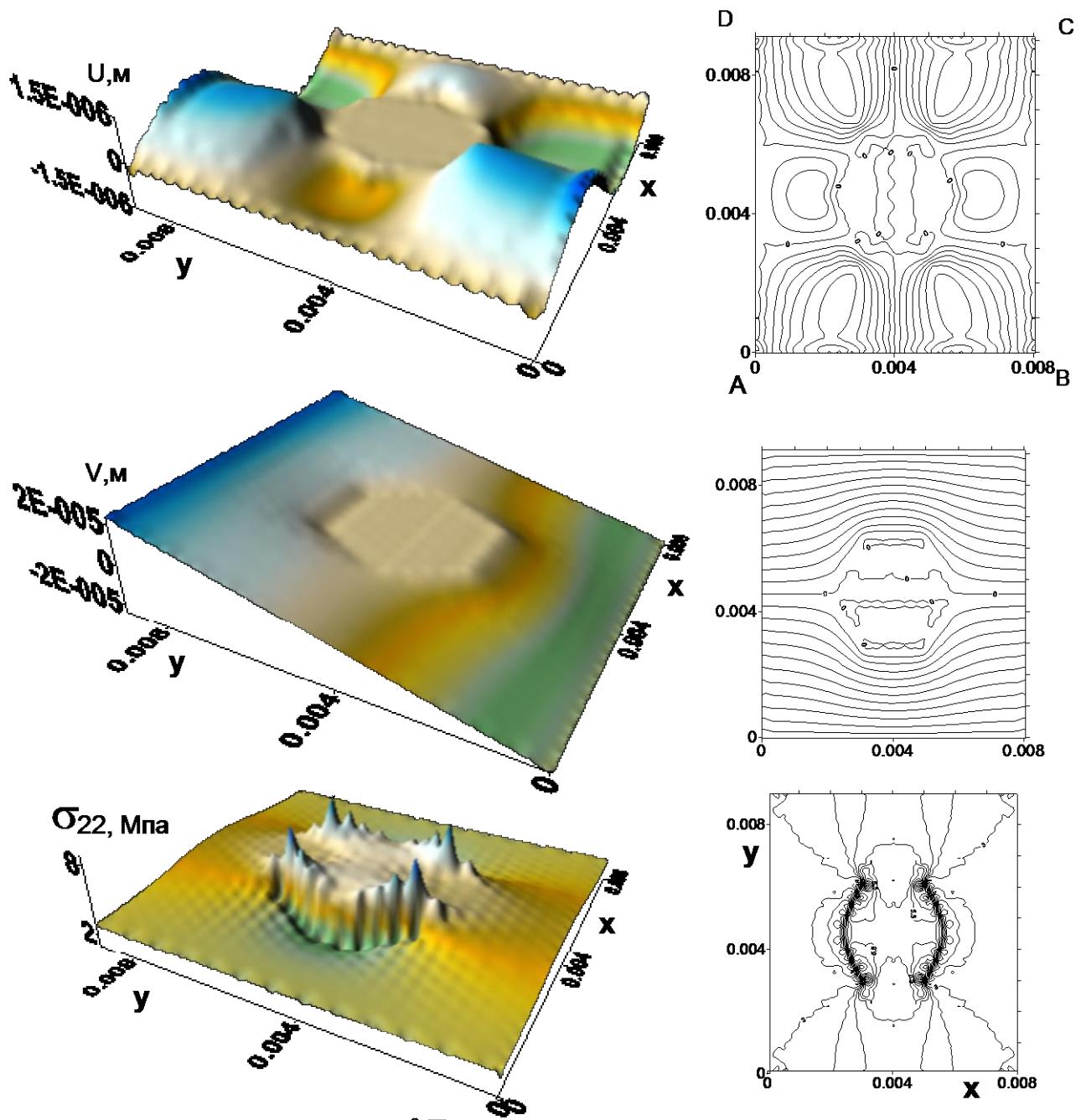
Далее предполагается, что жесткость (модуль упругости) включений выше соответствующих характеристик матрицы минимум на два порядка.

На рис. 1 приведены перемещения U вдоль оси x , перемещения V вдоль оси y , напряжение σ_{22} (вдоль оси y) при использовании условий идеального контакта между матрицей и включением. Когда предусматривается возможность отрыва на границе «матрица – включение», вводится двойная нумерация соответствующих узлов на контакте. Чтобы не изменять число уравнений, используется прием Пэйна-Айронса. Двойная нумерация узлов не оказывает никакого влияния на параметры НДС, пока узлы связаны, т.е. тело деформируется как сплошное, единое целое.

При достижении нормальных напряжений σ_2 предельных значений $\sigma_2 \geq [\sigma]$ (критерий наибольших нормальных напряжений) в элементах, прилегающих к жесткому включению, сплошность материала нарушается, образуются новые поверхности. В этом случае двойные узлы расходятся и преобразуется глобальная матрица жесткости. Отслоения происходят в угловых точках включения, являющихся концентраторами напряжений. Далее матрица отслаивается от включения по горизонтальным кромкам.

При дальнейшем растяжении моделируется скольжение элементов матрицы по наклонным граням включения. Если касательное напряжение τ_α на наклонной грани включения превосходит предельное $\tau_\alpha > [\tau]$ (критерий предельных касательных напряжений), то элементы матрицы начинают скользить по этой грани. В этом случае также требуются преобразования глобальной матрицы жесткости. При скольжении для перемещений узла u и v выполняется зависимость $u = v \cdot tg\alpha$, где α – угол наклона грани включения. В разрешающие уравнения МКЭ вводятся изменения (умножение строк и столбцов матрицы на коэффициент $1/tg\alpha$ и суммирование соответствующих строк и столбцов). Следует отметить, что симметрия глобальной матрицы жесткости при таких преобразованиях сохраняется.

Поверхности и изолинии перемещений и напряжений при отрыве матрицы от включения по горизонтальным кромкам (по критерию нормальных напряжений) и скольжении элементов матрицы по наклонным кромкам (по критерию касательных напряжений) приведены на рис. 2.

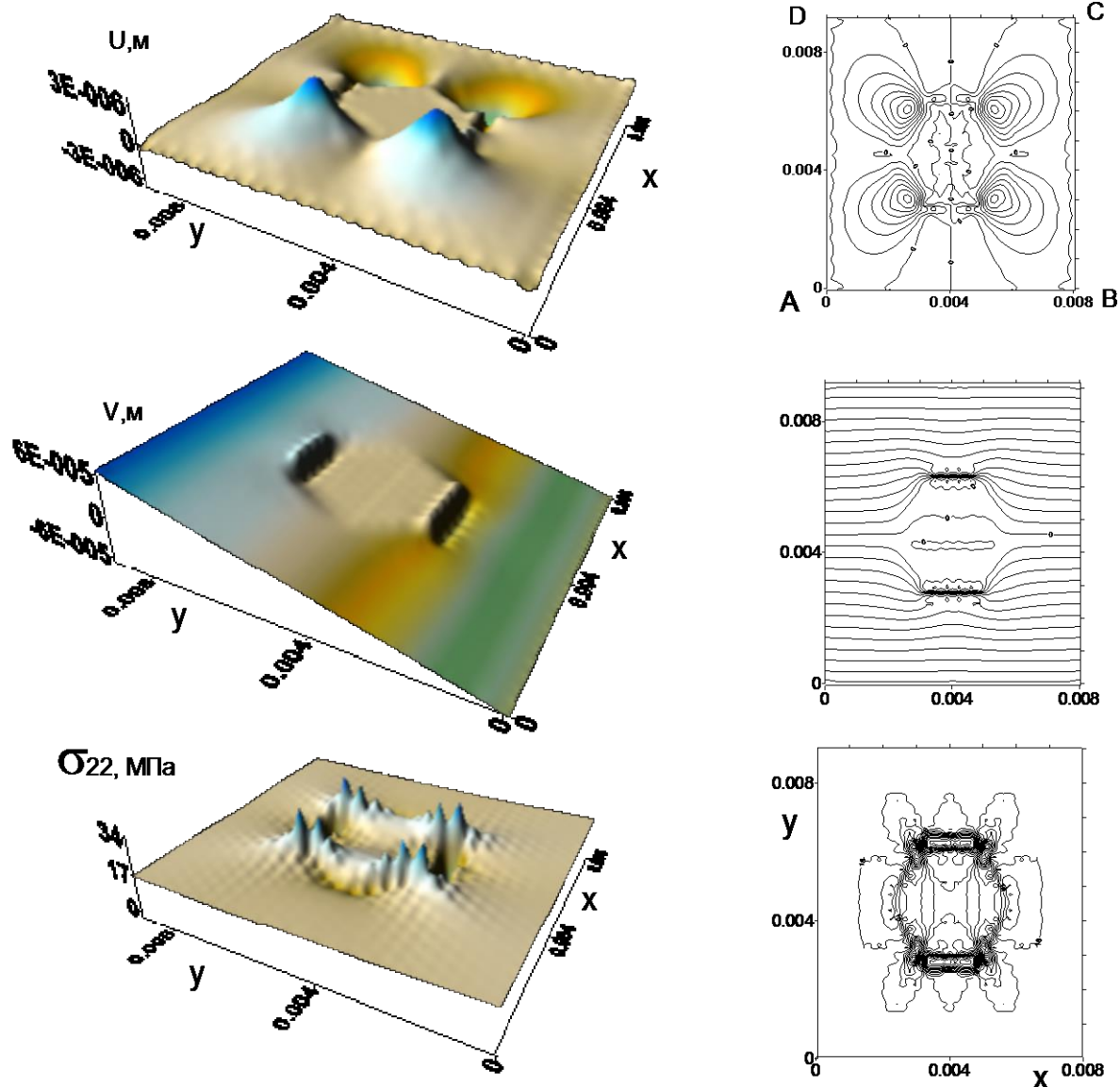


$$\nu_{уддэф} = 0.214 \cdot 10^{-8} \text{ Па}$$

$$\sigma_{22} = 7.031 \text{ МПа} \quad \epsilon_{22} = 0.5 \cdot 10^{-2} \quad E = 1.4 \cdot 10^9 \text{ Па}$$

Рис. 1. Поверхности и изолинии перемещений U, V , а также напряжений σ_{22} при растяжении ячейки композита вдоль оси y .

На границе «матрица – включение» идеальный контакт



$$V \text{ уд. деф.} = 1.380 \cdot 10^{-8} \text{ Па}$$

$$\sigma_{22} = 17.25 \text{ МПа} \quad \varepsilon_{22} = 1.46 \cdot 10^{-2} \quad E = 1.18 \cdot 10^9 \text{ Па}$$

Рис. 2. Поверхности и изолинии перемещений U, V и напряжений σ_{22} в ячейке композита при растяжении вдоль оси y . Матрица отрывается от включения по горизонтальным кромкам и скользит по наклонным

На рис. 3 показана зависимость $\sigma \sim \varepsilon$ для случая растяжения ячейки композита при идеальном контакте на границе «матрица – включение» (кривая b) и при отрыве матрицы от включения по горизонтальным кромкам и

дальнейшем скольжении элементов матрицы по наклонным кромкам включения (кривая *a*).

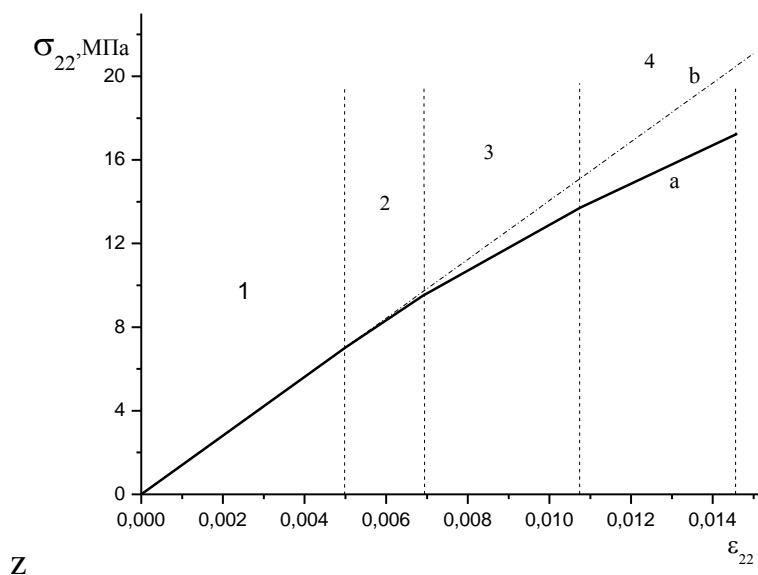


Рис. 3. График $\sigma \sim \varepsilon$ при растяжении с учетом нормального и касательного критериев нарушения сплошности

Кривая *b* соответствует упругой деформации матрицы и включения, идеальному контакту между матрицей и включением, зависимость $\sigma \sim \varepsilon$ носит линейный характер. Кривая *a* соответствует упругой деформации матрицы и включения, но отражает нелинейную зависимость. Участок 1 кривых соответствует идеальному контакту между включением и матрицей, участок 2 соответствует началу отрыва матрицы от включения в местах концентрации напряжений, участок 3 соответствует отрыву матрицы по горизонтальным кромкам, участок 4 соответствует отрыву матрицы по горизонтальным кромкам и скольжению матрицы по наклонным кромкам.

В работе проводилось сравнение эффективных модулей композита, вычисленных с позиций двумерной и трехмерной теории упругости. Определение эффективных модулей композита с позиций трехмерной теории упругости проводилось в программном комплексе ANSYS Ю.А. Реутовым [Реутов Ю.А. Прогнозирование свойств полимерных композиционных материалов и оценка надежности изделий из них. Дисс. канд. физ.- мат. наук, ТГУ, Томск, 2016].

Анализ проводился применительно к ударопрочной композиции на основе полипропилена, наполненного бутилкаучуком, т.е. в данном случае включения менее жесткие, нежели матрица (рис. 4). Эффективный модуль упругости

композита при относительной объемной доле наполнителя 0.05 в случае двумерной модели отличается от модуля, полученного по трехмерной модели, примерно на 5 %. С увеличением степени наполнения отличия между эффективными модулями упругости, полученными с использованием трехмерной и двумерной моделями, увеличиваются и достигают 20÷25 %.

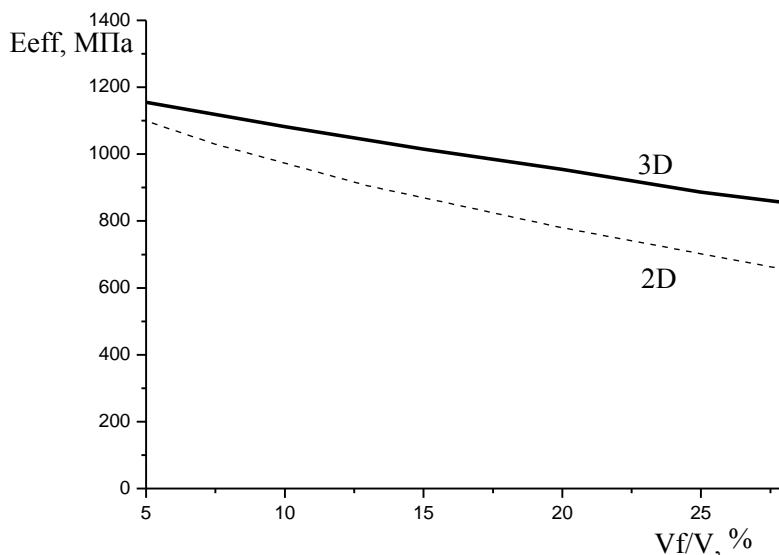


Рис. 4. Зависимость эффективного модуля E_{eff} композита (полипропилен + бутилкаучук) от степени наполнения бутилкаучуком по двумерной (2D) и трехмерной (3D) моделям

В целом имеется корреляция между результатами, полученными по двумерным и трехмерным моделям.

Во второй главе решаются стационарная и нестационарная задачи теплопроводности для структурно-неоднородного тела и вычисляются эффективные теплофизические характеристики композита.

Решение **нестационарной** двумерной задачи теплопроводности при задании на границе расчетной области потока тепла и конвективного теплообмена сводится к минимизации функционала

$$\chi = \int_V 0.5 \left[K_{xx} \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + K_{yy} \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 + 2\lambda \frac{\partial T}{\partial t} T \right] dV + \int_{S_1} q T dS + \int_{S_2} \frac{h}{2} (T - T_{GRN})^2 ds \quad (1)$$

где S_1 – площадь поверхности, на которой задан поток тепла; S_2 – площадь поверхности, где происходит конвективный обмен тепла; K_{xx} , K_{yy} – коэффициенты теплопроводности; T – температура; t – время; $\lambda = c \cdot \rho$, c – удельная теплоемкость, ρ – плотность; V – объем области; q – поток тепла; h – коэффициент теплообмена; T_{GRN} – температура окружающей среды.

Решение **стационарной** двумерной задачи теплопроводности при задании на границе потока тепла и конвективного теплообмена сводится к минимизации функционала

$$\chi = \int_V 0.5 \left[K_{xx} \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + K_{yy} \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 \right] dV + \int_{S_1} qT dS + \int_{S_2} \frac{h}{2} (T - T_{GRN})^2 ds \quad (2)$$

В случае **нестационарной** задачи условие экстремума функционала приводит к системе обыкновенных дифференциальных уравнений относительно температуры, в случае **стационарной** задачи – к системе алгебраических уравнений.

Нестационарная задача теплопроводности решается по неявной схеме, задается поле температуры в начальный момент времени, на кромках расчетной области ставятся условия Дирихле и Неймана. Предполагается, что в структурно-неоднородном теле на границе “матрица-включение” существует идеальный тепловой контакт: равны температуры и тепловые потоки на линии сопряжения двух тел с различными теплофизическими характеристиками.

На рис. 5 приведены поверхности и изолинии температуры для ячейки композита. Поля температур получены при решении стационарной и нестационарной задач теплопроводности.

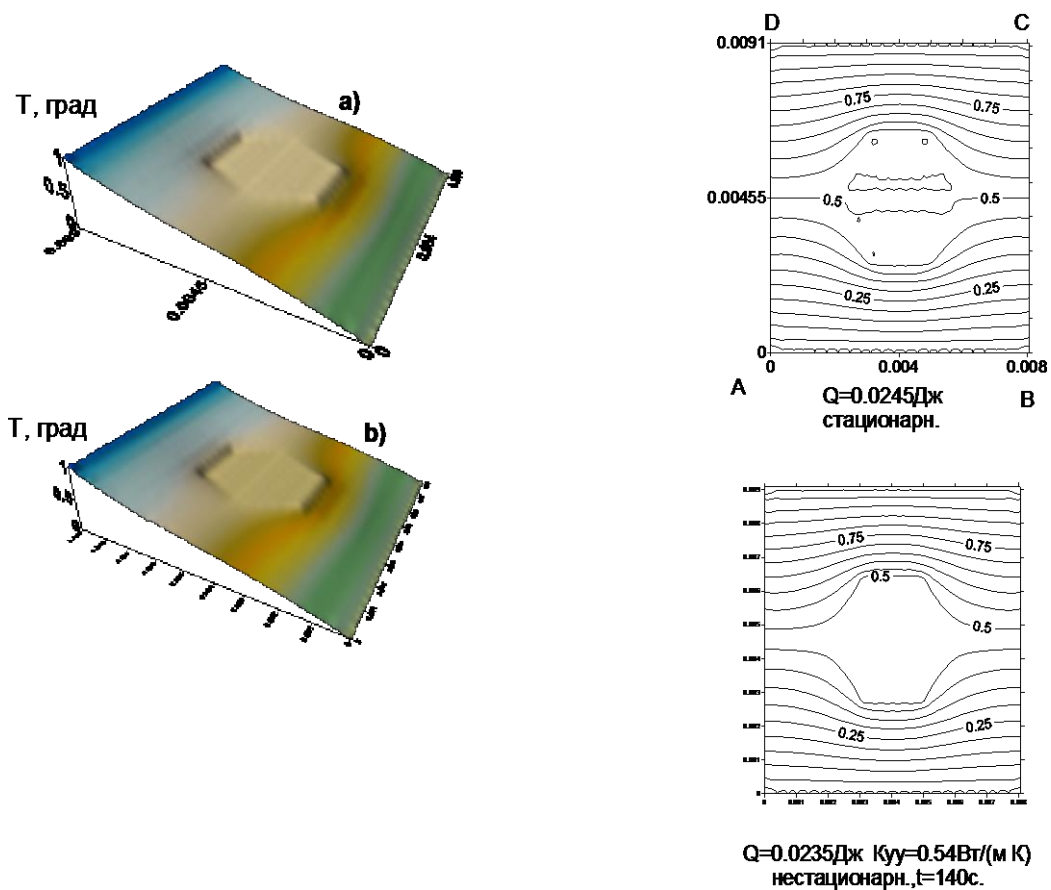


Рис. 5. Поверхности и изолинии температуры в ячейке композита.
 а) - результаты решения стационарной задачи теплопроводности,
 б) - результат решения нестационарной задачи

Количество теплоты, полученное структурно-неоднородным телом. вычисляется следующим образом.

$$Q = \sum_{i=1}^{n1} c_1 V_i \rho_1 \Delta T_i + \sum_{j=1}^{n2} c_2 V_j \rho_2 \Delta T_j; \quad (3)$$

где $n1$ – число конечных элементов одной фазы; $n2$ – число конечных элементов второй фазы; ΔT_i , ΔT_j – изменение температуры в конечном элементе.

Изменение температуры в каком-либо элементе ячейки композита равно разности между температурой $T(x,y,t)$, полученной в результате решения задачи теплопроводности, и начальной температурой $T(x,y,0)$.

То же самое количество теплоты можно получить, если композиционный материал заменить однородным материалом с некоторым осредненным коэффициентом теплопроводности K_{yy}

$$Q = \frac{K_{yy} \cdot S \cdot t \cdot \Delta T}{l} \quad (4)$$

где S – площадь стороны ячейки композита, через которую передается тепловой поток; t – время, в течение которого передается количество теплоты Q ; ΔT – разность температур на границах расчетной области; l – расстояние, на которое распространилось тепло за время t .

Если в приведенной формуле(4) известны все величины, кроме коэффициента теплопроводности, то этот коэффициент легко вычисляется.

$$K_{yy} = \frac{Q \cdot l}{S \cdot t \cdot \Delta T}; \quad (5)$$

Если $q = Q/(S \cdot t)$ – тепловой поток, то коэффициент теплопроводности равен

$$K_{yy} = \frac{q \cdot l}{\Delta T}$$

Возможно вычисление коэффициента теплопроводности композита по теории смесей

$$K_{yy} = K_f v_f + K_m v_m \quad (6)$$

где K_f , K_m – коэффициенты теплопроводности наполнителя и матрицы; v_f , v_m – относительное объемное содержание наполнителя и матрицы.

Из рис. 5 видно, что количество теплоты, полученное структурно-неоднородным телом в результате решения стационарной задачи, превышает количество теплоты, полученное этим телом в результате решения нестационарной задачи, на 5 %.

На рис. 6 приведены результаты решения задач теплопроводности для структурно-неоднородного тела при наличии в нем трещинообразных воздушных пустот. Наличие пустот уменьшает эффективный коэффициент теплопроводности на 10 % по сравнению со случаем идеального контакта между включением и матрицей. На рис. 7 приведены изолинии и поверхность температуры в структурно-неоднородном двухфазном материале, в материале с эффективным коэффициентом теплопроводности, вычисленным по формуле (5), в материале с коэффициентом теплопроводности, вычисленным по теории смесей (6).

Количество теплоты, которое получает структурно-неоднородное тело (а) и тело сравнения (в) за время 15 с, примерно равны, отличие не превышает 20 %. Количество теплоты, которое получает тело сравнения с коэффициентом теплопроводности, вычисленным по теории смесей, отличается на 300 %.

Эффективный коэффициент теплопроводности по двумерной (2D) и трехмерной (3D) моделям рассчитывался на основе решения стационарных задач теплопроводности. При решении задач явно учитывается геометрия включений и теплофизические характеристики фаз.

Зависимость эффективного коэффициента теплопроводности композита K_{yy} от степени наполнения, вычисленного по двумерным и трехмерным моделям, приведена на рис. 8.

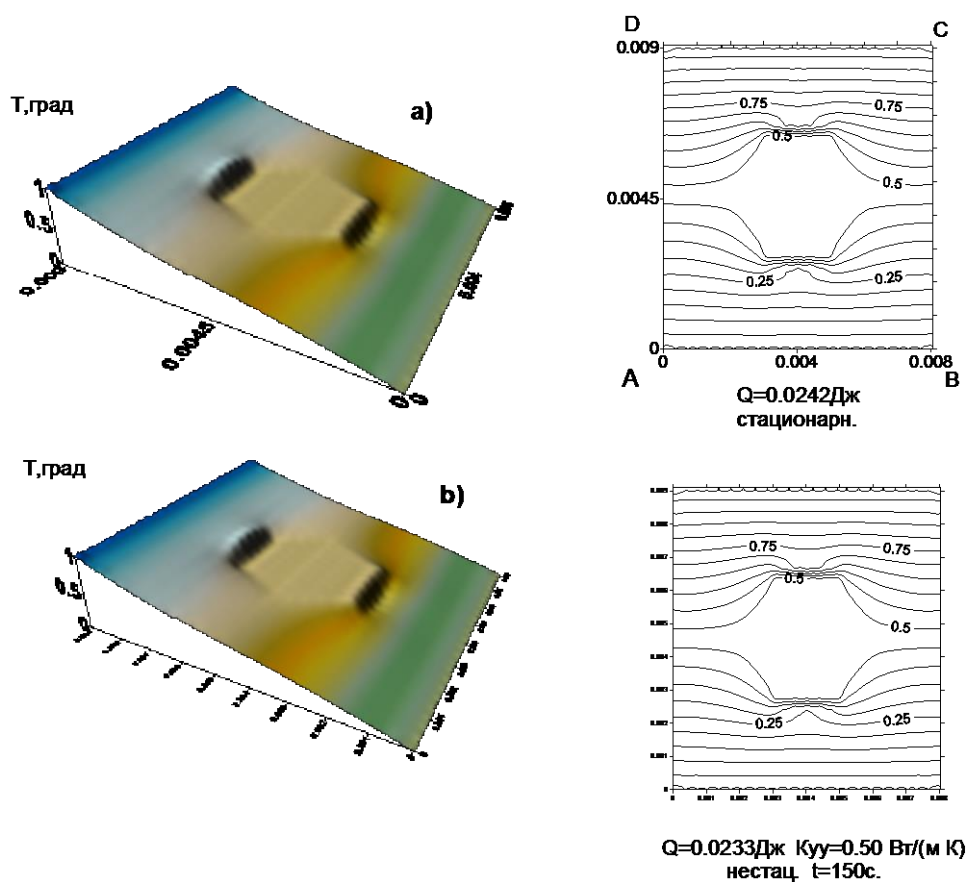


Рис. 6. Поверхности и изолинии температуры в структурно-неоднородном теле с включением и горизонтальными трещинообразными воздушными пустотами (трехфазный материал): а) – результат решения стационарной задачи теплопроводности; б) – результат решения нестационарной задачи

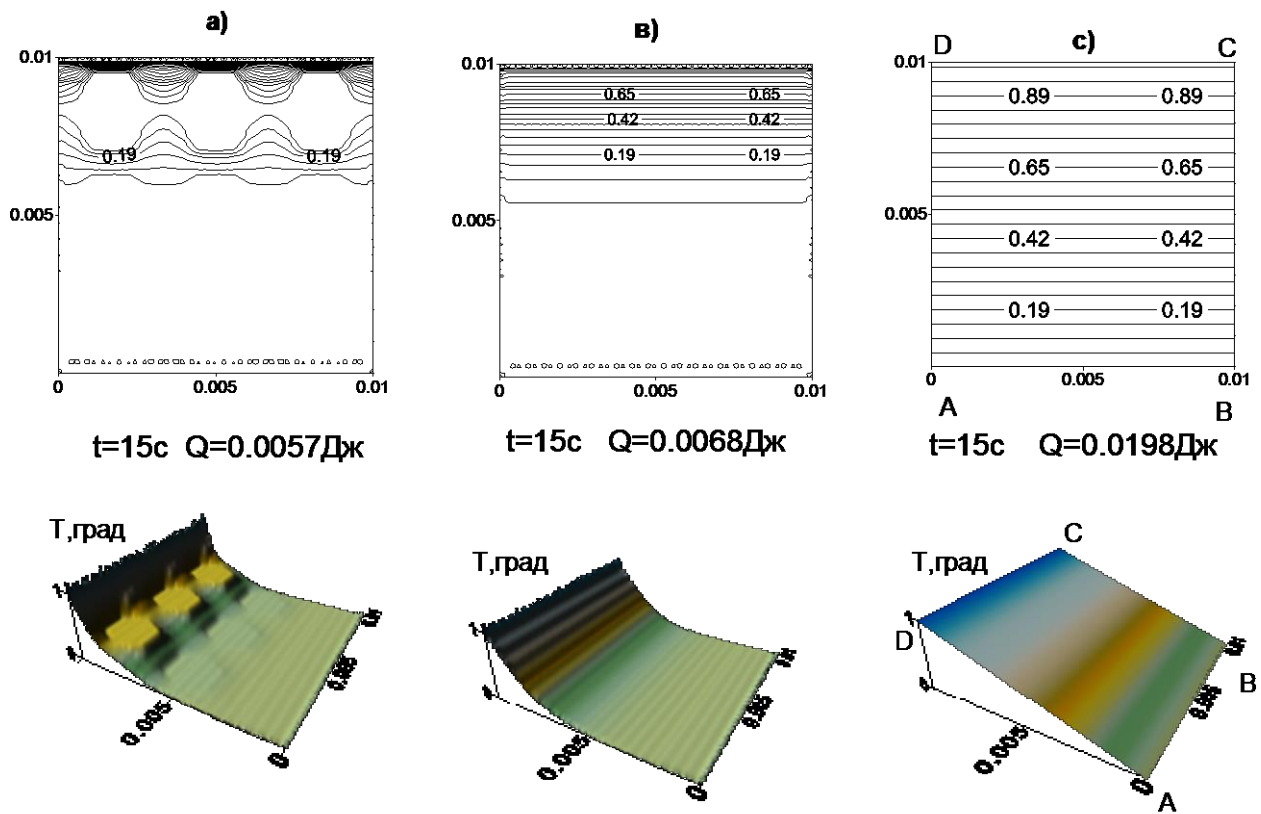


Рис. 7. Изолинии и поверхности температуры на момент времени $t = 15$ с. в структурно-неоднородном теле (а), в однородном материале (в) с коэффициентом теплопроводности $K_{yy} = 0.38$ Вт/(м·К), в однородном материале (с) с коэффициентом теплопроводности по теории смесей $K_{yy} = 22$ Вт/(м·К)

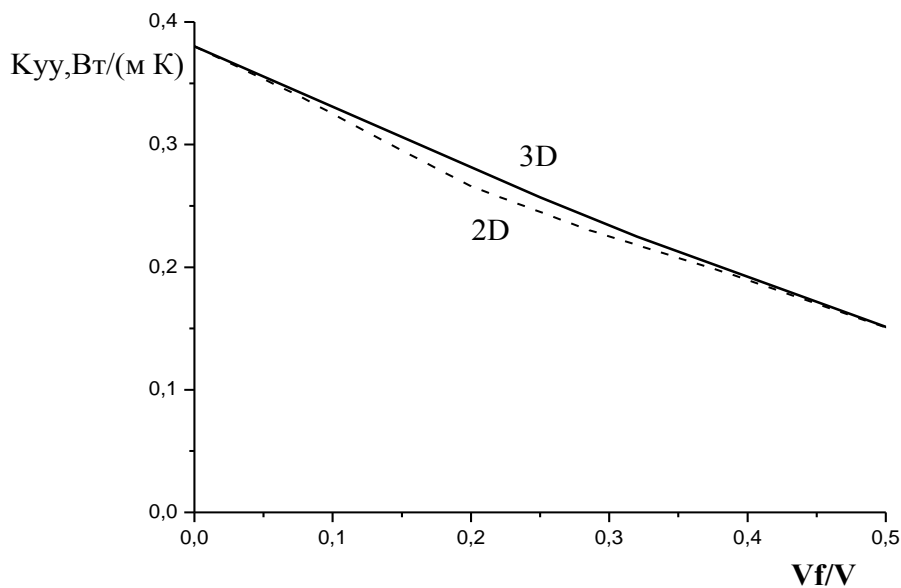


Рис. 8. Зависимость эффективного коэффициента теплопроводности композита K_{yy} от степени наполнения. Кривая 2D – двумерная модель, кривая 3D – трехмерная модель. Материал матрицы – полиэтилен, включения – воздух

Композит представляет собой вспененный полиэтилен. С увеличением степени наполнения воздухом теплопроводность композита уменьшается. При относительном объемном содержании включений 0.05 отличия между коэффициентами теплопроводности по двумерной (2D) и трехмерной (3D) моделям составляет 5 %. При увеличении наполнения отличие коэффициентов теплопроводности растет, но не более чем на 15 %.

В третьей главе вычисляются эффективные электрофизические характеристики дисперсно-наполненного композита: диэлектрическая проницаемость и удельная проводимость. Для этого решаются задачи электростатики и электропроводности для композита.

Электростатическое поле в прямоугольной ячейке $ABCD$ описывается уравнениями Максвелла:

$$\operatorname{rot} E = 0; \quad D = \varepsilon_a E; \quad \operatorname{div} D = 0 \quad (6)$$

где E – напряженность поля, D – электрическое смещение, ε_a – абсолютная диэлектрическая проницаемость. Используя подстановку $E = -\operatorname{grad} \varphi$, третье уравнение системы (6) можно записать в виде:

$$\operatorname{div}(-\varepsilon_r \varepsilon_0 \operatorname{grad} \varphi) = 0 \quad (7)$$

где ε_r – относительная диэлектрическая проницаемость материала, ε_0 – электрическая постоянная, φ – скалярная функция, потенциал.

Если в пределах одного конечного элемента диэлектрическая проницаемость материала постоянна, то уравнение (7) можно записать в виде:

$$\varepsilon_r \varepsilon_0 \operatorname{div} \operatorname{grad} \varphi = 0. \quad (8)$$

Вводя обозначение $\operatorname{div} \operatorname{grad} \varphi = \nabla^2 \varphi$, уравнение (8) можно записать в виде:

$$\varepsilon_r \varepsilon_0 \nabla^2 \varphi = 0 \quad (9)$$

Это уравнение Лапласа (9) с переменными коэффициентами ε_r , т.к. в разных точках ячейки $ABCD$ могут быть различные материалы.

На границе раздела двух фаз равны потенциалы и нормальные составляющие вектора электрического смещения:

На кромках AB и CD задается значение электрического потенциала φ (условия Дирихле), например:

$$\varphi|_{AB} = 0, \quad \varphi|_{DC} = 1. \quad (10)$$

На кромках BC и AD ставятся условия второго рода (условия Неймана, симметрии):

$$\left. \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right|_{AD} = 0; \quad \left. \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right|_{BC} = 0. \quad (11)$$

Далее принимается, что матрица – диэлектрик, наполнитель – проводник.

Уравнение (9) совместно с граничными условиями (10,11) решается методом конечных элементов. Решение уравнения (9) эквивалентно отысканию минимума функционала χ

$$\chi = \int_V \frac{1}{2} \left[\varepsilon_r \varepsilon_0 \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)^2 + \varepsilon_r \varepsilon_0 \left(\frac{\partial \varphi}{\partial y} \right)^2 \right] dV \quad (12)$$

Минимизация функционала χ позволяет получить систему алгебраических уравнений, которая решается методом Гаусса.

В результате решения задачи электростатики получается распределение потенциала φ в узлах сетки конечных элементов и напряженности E в элементах. Из условия равенства энергии электростатического поля в структурно-неоднородном материале и энергии поля в материале с эффективными характеристиками получим эффективную диэлектрическую проницаемость композита $\varepsilon_{\text{reff}}$.

$$\varepsilon_{\text{reff}} = \frac{\sum_{i=1}^{28680} \varepsilon_R(i) E^2(i) \Delta V(i)}{E^2 \cdot V}, \quad (13)$$

Экспериментальное определение диэлектрической проницаемости и удельной проводимости композита проводилось с использованием мостового измерителя LCR-818, для измерений изготавливались образцы по ГОСТ 6433.2-71. Экспериментальное значение диэлектрической проницаемости композита «силикон + медь» составляет $\varepsilon_{\text{эксн}} = 5.1$, значение диэлектрической проницаемости, полученное по вышеприведенной методике $\varepsilon_{\text{reff}} = 4.0$. Экспериментальное значение диэлектрической проницаемости для композита «силикон + графит» равно $\varepsilon_{\text{эксн}} = 4.4$, по вышеприведенной методике $\varepsilon_{\text{reff}} = 3.4$.

Электрическое поле постоянного тока в ячейке КМ описывается уравнениями Максвелла:

$$\text{rot}E = 0; \quad \delta = \sigma \cdot E; \quad \text{div}\delta = 0, \quad (14)$$

где δ – плотность тока, σ – удельная электрическая проводимость, E – напряженность электрического поля. Вводя новую переменную $E = -\text{grad}\varphi$ и подставляя ее в (14), получим

$$\text{div}(-\sigma \cdot \text{grad}\varphi) = 0 \quad (15)$$

где φ – потенциал.

Для определения потенциала электрического поля постоянного тока в рассматриваемой области необходимо решить уравнение Лапласа (15) с граничными условиями Неймана и Дирихле.

Для электрического потенциала φ на границе двух сред с проводимостями σ_1, σ_2 выполняются условия равенства потенциалов и нормальных компонент плотности тока. Численно решая уравнение Лапласа (14), получим распределение потенциала φ , затем напряженности E в каждом конечном элементе.

С одной стороны, мощность тепловых потерь в проводнике можно определить согласно закону Джоуля-Ленца. С другой стороны, ее можно выразить через напряженность поля E и электрическую проводимость материала σ

$$P = \int_V \sigma E^2 dV \quad (16)$$

Если найти распределение потенциала и напряженности электрического поля в каждом элементе структурно-неоднородного тела, то интеграл (16) можно заменить суммой по ячейкам расчетной области

$$P = \sum_{i=1}^{28680} \sigma(i) E^2(i) \Delta V(i) \quad (17)$$

Мощность тепловых потерь в однородном теле сравнения равна

$$P = \sigma_{eff} E_y^2 \cdot V \quad (18)$$

Напряженность в нем равна

$$E_y = \frac{U_{DC} - U_{AB}}{L_{AD}}.$$

Далее легко получить эффективную электрическую проводимость композита:

$$\sigma_{eff} = \frac{\sum_{i=1}^{28680} \sigma(i) E^2(i) \Delta V(i)}{E_y^2 \cdot V} \quad (19)$$

На рис. 9 приведены поверхность и изолинии электрического потенциала φ электрического поля постоянного тока в структурно-неоднородном теле.

Так как проводимость наполнителя (медь) больше проводимости матрицы (силикон) на 15 порядков, проводилось исследование влияния абсолютной величины проводимости наполнителя на мощность тепловых потерь композита P .

Если при решении задачи электропроводности принять, что проводимость наполнителя больше проводимости матрицы в $10^3, 10^4, 10^5$ раз, то мощность тепловых потерь P ячейки композита не изменяется и равна $P=0.731$ Вт. Таким образом, при решении задачи электропроводности для композита

«силикон + медь» достаточно проводимость наполнителя взять на 3 порядка больше, чем проводимость матрицы.

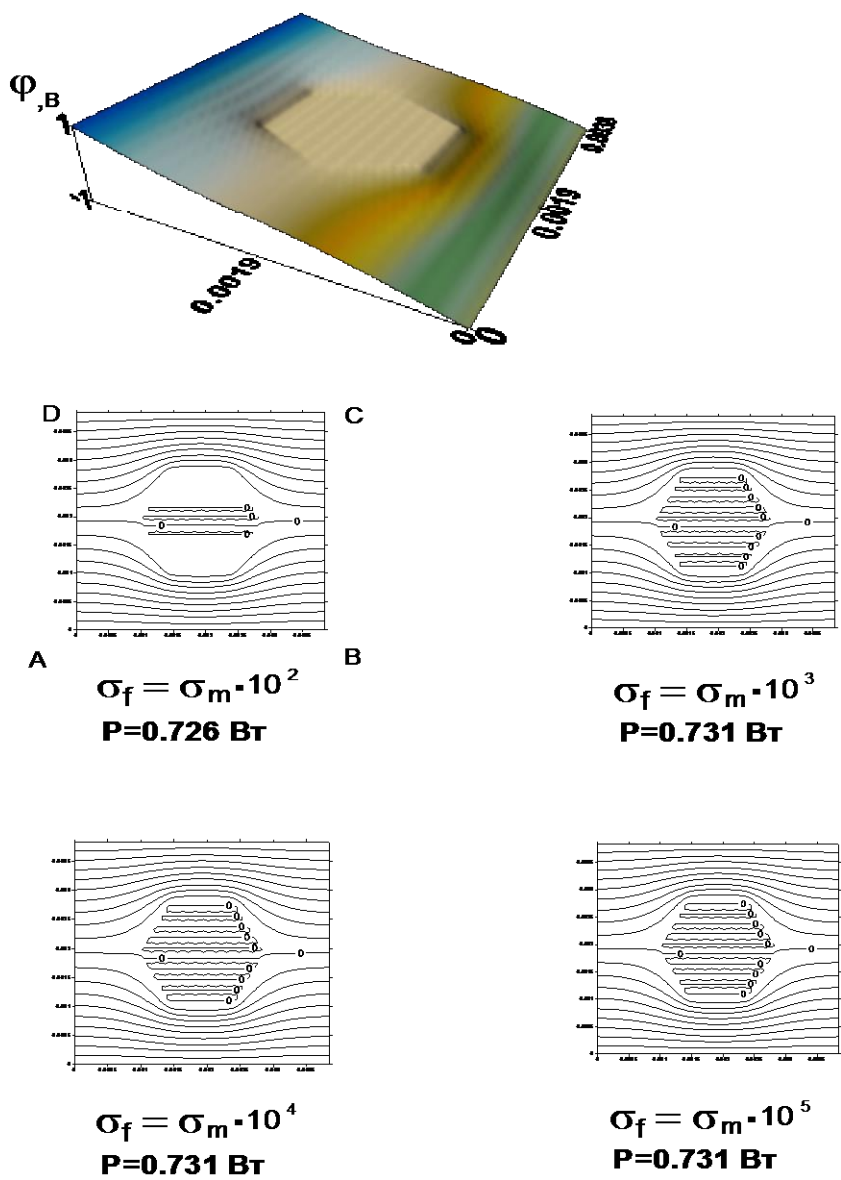


Рис. 9. Распределение скалярного потенциала φ и мощности тепловых потерь P в ячейке структурно-неоднородного материала при решении задачи электропроводности. Материал матрицы – силикон, проводимость $\sigma_m = 0.126 \cdot 10^{-8} \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$, наполнитель – медь, проводимость наполнителя $\sigma_f = 5.9 \cdot 10^7 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$. Эффективная проводимость композита $\sigma_{eff} = 0.182 \cdot 10^{-8} \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$. Объемное содержание наполнителя $ps = 0.168$

На рис. 10 приведены результаты теоретического и экспериментального исследования электропроводности композиционных материалов «силикон + медь» и «силикон + графит». Экспериментальное определение электрической проводимости проводилось с использованием мостового измерителя LCR-819. Образцы для испытаний изготавливались круглой формы по ГОСТ 6433.2-71. Экспериментальное значение электрической проводимости

композиата «силикон + медь» равно $\sigma_{\text{эксп}}=0.343 \cdot 10^{-8} \text{ Ом}^{-1} \text{ м}^{-1}$, расчетное значение эффективной проводимости $\sigma_{\text{eff}}=0.216 \cdot 10^{-8} \text{ Ом}^{-1} \text{ м}^{-1}$. Экспериментальное значение электрической проводимости композиата «силикон + графит» равно $\sigma_{\text{эксп}}=0.225 \cdot 10^{-8} \text{ Ом}^{-1} \text{ м}^{-1}$, расчетное значение эффективной проводимости $\sigma_{\text{eff}}=0.144 \cdot 10^{-8} \text{ Ом}^{-1} \text{ м}^{-1}$.

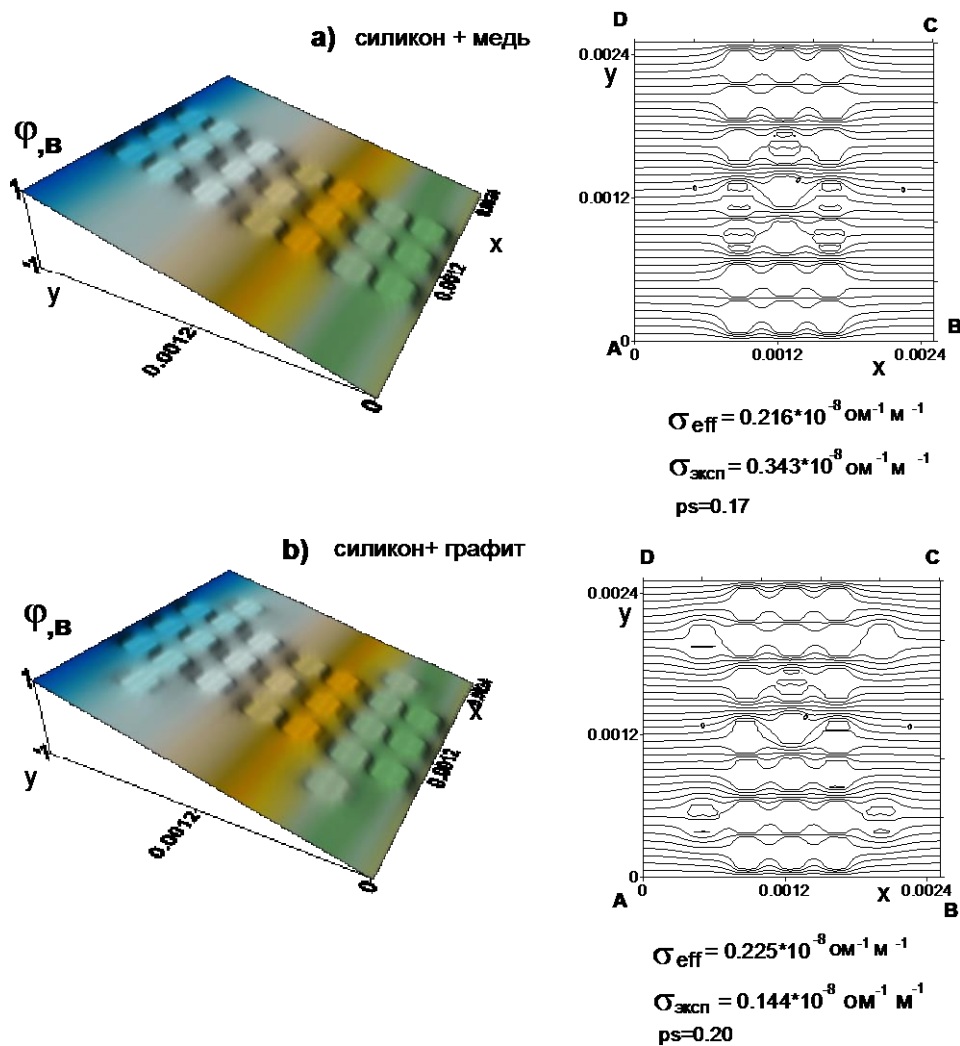


Рис. 10. Поверхности потенциала и изолинии электрического поля постоянного тока в ячейке КМ. Граничные условия на краях области $ABCD$ следующие.

На краях AB и DC – условия Дирихле, $\varphi|_{AB} = -1$; $\varphi|_{DC} = 1$,

на краях AD и BC – условия симметрии

В случае композиата «силикон + медь» отличия между экспериментальными и теоретическими значениями электрической проводимости составляют 40 %, в случае композиата «силикон + графит» отличия составляет 30 %.

Относительная диэлектрическая проницаемость композита «полиэтилен – железо» при содержании наполнителя 40 % увеличивается всего в 2.5 раза, хотя диэлектрическая проницаемость металла формально равна ∞ . Удельная электрическая проводимость композита «полиэтилен – сталь» при объемном содержании наполнителя 40 % увеличивается в 2.5 раза.

На рис. 11 приведены поверхности и изолинии электрического потенциала φ и напряженности E электрического поля постоянного тока в композите «медь – графит».

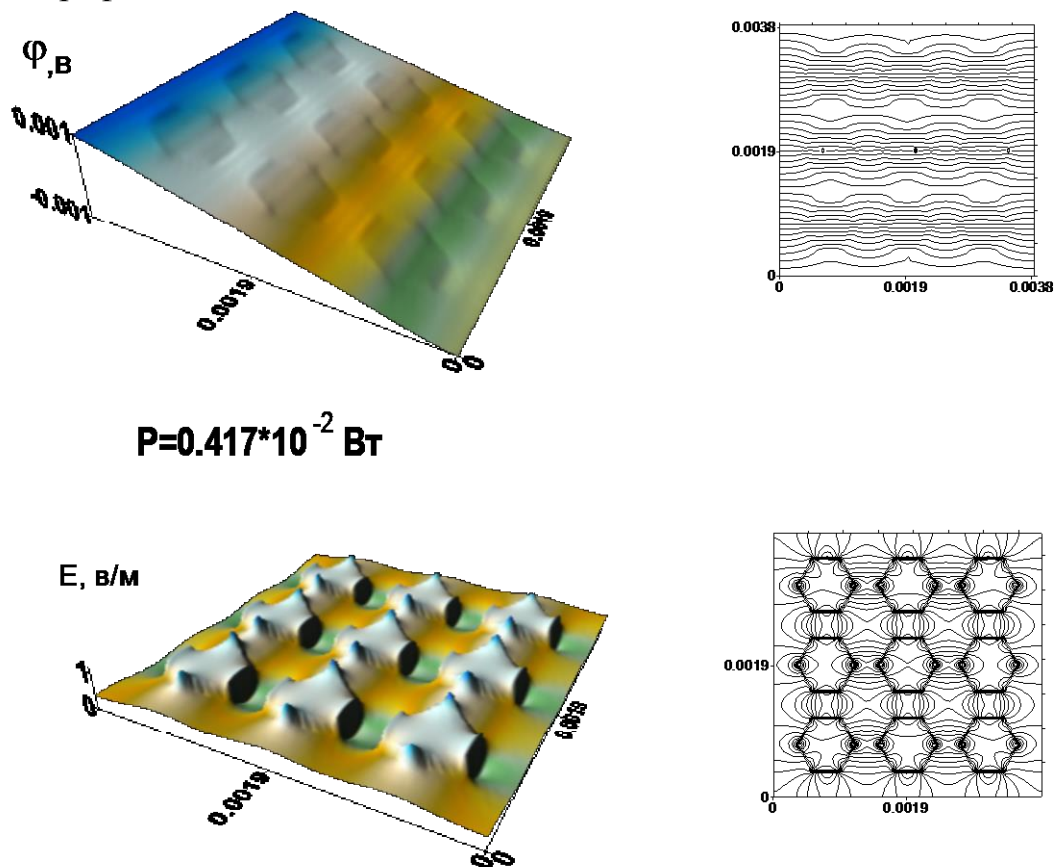


Рис. 11. Результаты решения задачи электропроводности для композита «медь-графит». Поверхности и изолинии электрического потенциала φ и напряженности E электрического поля постоянного тока. Материал матрицы – медь, материал включений – графит. Удельная электрическая проводимость матрицы $\sigma_m = 5.6 \cdot 10^7 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$, удельная проводимость включений $\sigma_f = 1.0 \cdot 10^6 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$, P – мощность тепловых потерь в композите

Мощность тепловых потерь при прохождении электрического тока через композит равна $P=0.417 \text{ Вт}$. Предполагается, что эта мощность является причиной повышения температуры в композите.

Если решить нестационарную задачу теплопроводности, то мощность тепловых потерь можно определить как $P=\Delta Q/\Delta t$ и найти изменение температуры в материале как результат последовательного решения задач

электропроводности и теплопроводности. На рис. 12 приведено изменение температуры в композите вследствие прохождения электрического тока.

После того, как определено изменение температуры в композите, решается задача термоупругости для структурно-неоднородного тела и находятся поля напряжений в композите, которые приведены на рис. 13.

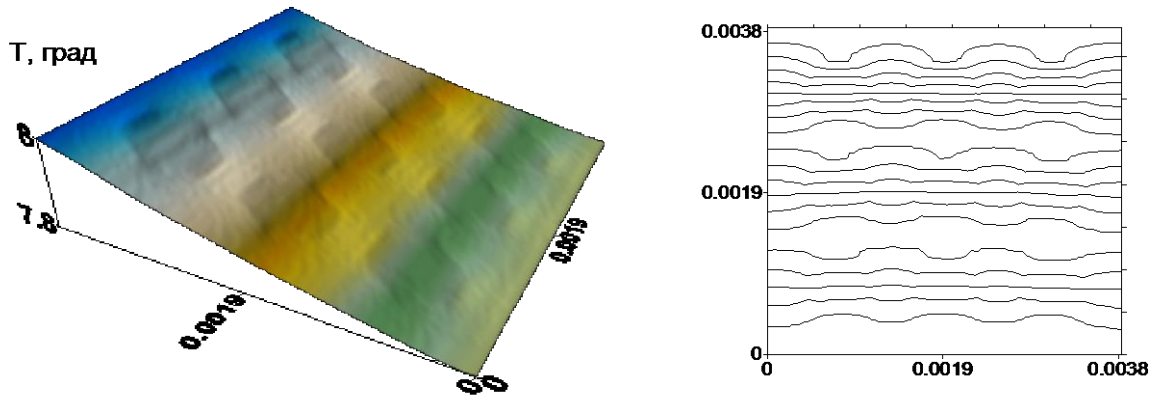


Рис. 12. Результаты решения задачи теплопроводности в композите «медь – графит». Поверхность и изолинии температуры в композите. P – мощность тепловых потерь, $P = \Delta Q / \Delta t$. $P = 0,415 \cdot 10^{-2}$ Вт

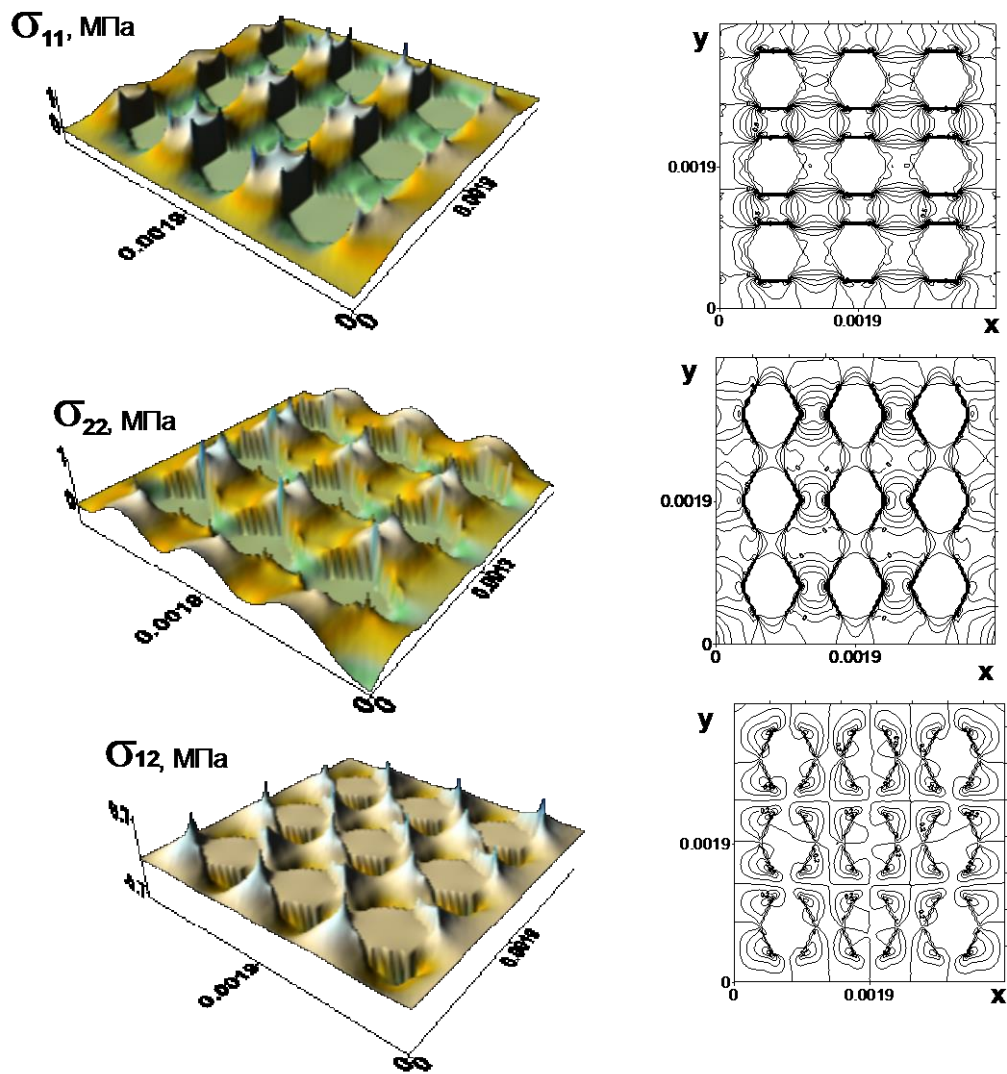


Рис. 13. Результаты решения задачи термоупругости для ячейки композита. Материал матрицы – медь, материал включений – графит. Поверхности и изолинии напряжений в композите при его нагревании на 8 °С,
 σ_{11} , σ_{22} – напряжения вдоль осей x, y , σ_{12} – напряжения сдвига

Таким образом, в случае композиционного материала, который является проводником, в нем возникают тепловые потери при прохождении электрического тока. Температура композита изменяется, и в нем возникают поля перемещений, деформаций, напряжений, обусловленные прохождением электрического тока и изменением температуры, даже если компоненты композита не обладают пьезоэффектом.

В четвертой главе решается задача НДС структурно-неоднородного тела и потеря устойчивости анизотропного покрытия на упругом основании при тепловом ударе.

Объектом исследований является простейшая модель, состоящая из **двух** слоев: керамического покрытия Al_2O_3 и медной подложки. Верхний керамический слой далее рассматривается как пластинка, лежащая на упругом основании (или подложке).

При моделировании НДС термобарьерного покрытия под действием теплового воздействия решается несколько задач:

- 1) задача теплопроводности структурно-неоднородного тела при интенсивном нагреве, что определяет распределение температуры;
- 2) задача определения НДС структурно-неоднородного тела при полученном распределении температуры;
- 3) задача о потере устойчивости покрытия на медной подложке;
- 4) задача определения амплитуды прогиба покрытия и НДС покрытия и упругого основания после потери устойчивости.

В работе делается предположение, что форма прогиба покрытия (пластинки) в закритическом состоянии определяется собственным вектором, который определяется при решении задачи устойчивости в рамках концепции Эйлера. Величины прогибов w_i находятся из предположения, что длина пластинки L_{10} вдоль оси x в результате нагрева увеличивалась на величину $L_{10}\alpha_1\Delta T$.

$$L_{10} + \alpha_1\Delta TL_{10} = \sum_{i=1}^{i=60} \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (w_{i+1} - w_i)^2}. \quad (20)$$

С использованием этой формулы определяются прогибы w_i .

На рис. 14 показано распределение температуры вдоль нормали к поверхности покрытия, на рис. 15 – распределение напряжений в структурно-неоднородном теле, вызванное распределением температуры, приведенным на рис. 14.

В термобарьерном покрытии при нагревании возникают мембранные сжимающие напряжения (200-1000 МПа), которые могут послужить причиной потери устойчивости. Для системы покрытие-подложка используется модель

пластинки на упругом основании (модель Винклера). Уравнение устойчивости анизотропной пластинки на упругом основании получаются из уравнений равновесия после того, как в них подставляют выражения для моментов, и вместо поперечной нагрузки q подставляется «фиктивная нагрузка».

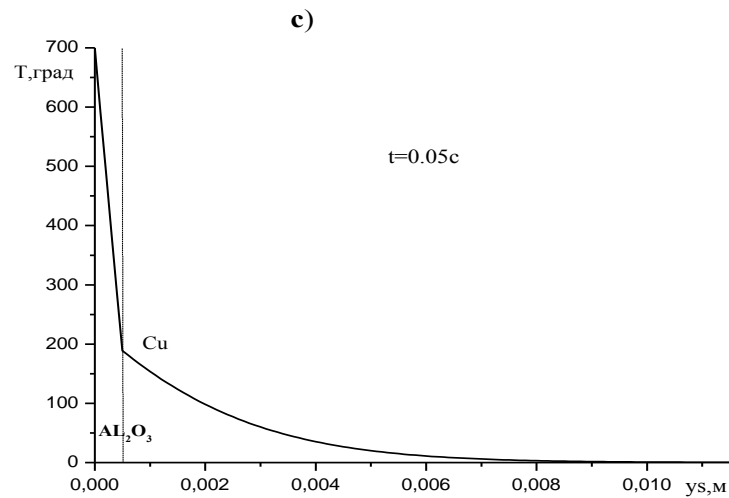


Рис. 14. Распределение температуры в двухслойном покрытии, координата 0 отвечает внешней поверхности, подверженной нагреву

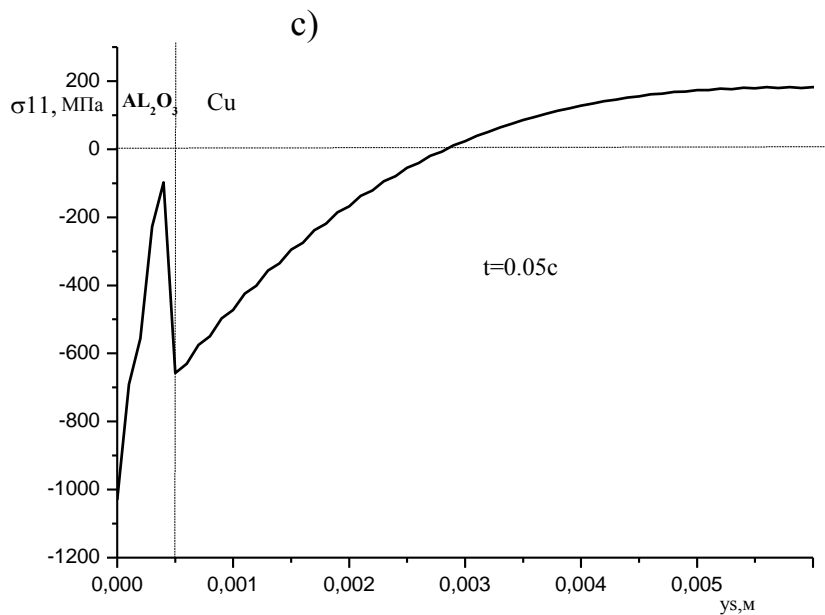
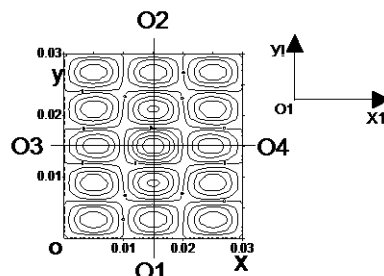
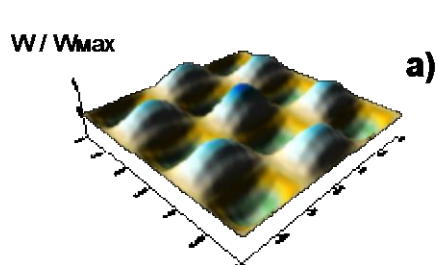


Рис. 15. Распределение напряжений вдоль нормали к поверхности покрытия

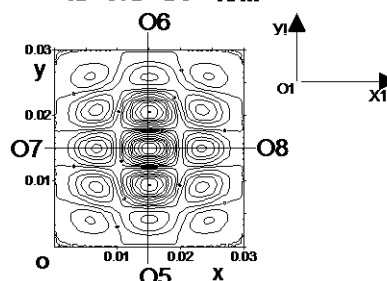
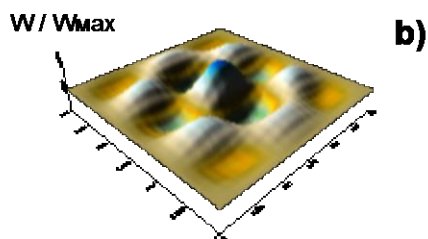
Критические нагрузки и формы потери устойчивости ортотропной пластинки на упругом основании приведены на рис. 16. Отношение толщины пластинки к длине стороны вдоль осей x, y равно $\frac{h}{a} = \frac{h}{b} = \frac{1}{200}$. Модули упругости $E_1 = 380$ ГПа, $E_2 = 190$ ГПа, $G = 80$ ГПа, коэффициенты Пуассона $\nu_1 = 0.30$,

$\nu_2 = 0.15$. Коэффициент постели упругого основания $k = 1 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^3$, коэффициенты линейного температурного расширения ортотропного покрытия $\alpha_1 = 6 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$, $\alpha_2 = 9 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$.

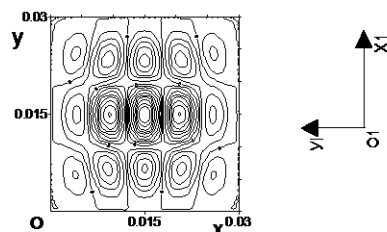
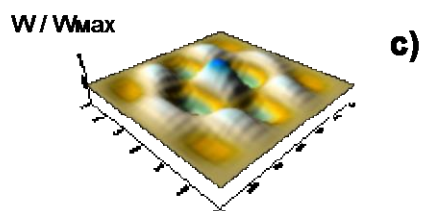
$\sigma_{11} = 0.407 \cdot 10^9 \text{ Па}$ $\sigma_{22} = 0.306 \cdot 10^9 \text{ Па}$ $\varphi = 0$ $\kappa = 0.1 \cdot 10^{11} \text{ Н/м}^3$



$\sigma_{11} = 0.428 \cdot 10^9 \text{ Па}$ $\sigma_{22} = 0.322 \cdot 10^9 \text{ Па}$ $\varphi = 0$ $\kappa = 0.1 \cdot 10^{11} \text{ Н/м}^3$



$\sigma_{11} = 0.321 \cdot 10^9 \text{ Па}$ $\sigma_{22} = 0.428 \cdot 10^9 \text{ Па}$ $\varphi = \pi/2$ $\kappa = 0.1 \cdot 10^{11} \text{ Н/м}^3$



$\sigma_{11} = 0.306 \cdot 10^9 \text{ Па}$ $\sigma_{22} = 0.407 \cdot 10^9 \text{ Па}$ $\varphi = \pi/2$ $\kappa = 0.1 \cdot 10^{11} \text{ Н/м}^3$

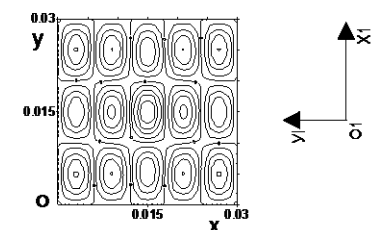
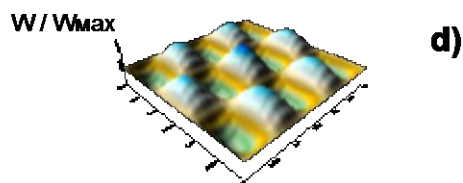


Рис. 16. Критические напряжения и формы потери устойчивости ортотропной пластинки на упругом основании. Оси ортотропии $X_1O_1Y_1$ совпадают с глобальными осями XOY .

a), d) – шарнирное опирание кромок; b), c) – жесткое защемление

Форма потери устойчивости ортотропной пластинки на упругом основании напоминает шахматную доску, причем вдоль оси ортотропии с

большим модулем упругости наблюдаются три полуволны, вдоль оси с меньшим модулем – пять полуволн. При повороте осей ортотропии на 90^0 соответственно поворачивается и картина волнообразования при потере устойчивости. Граничные условия жесткого защемления сторон повышают критические напряжения на 5-8 % по сравнению с напряжениями при шарнирном опирании сторон.

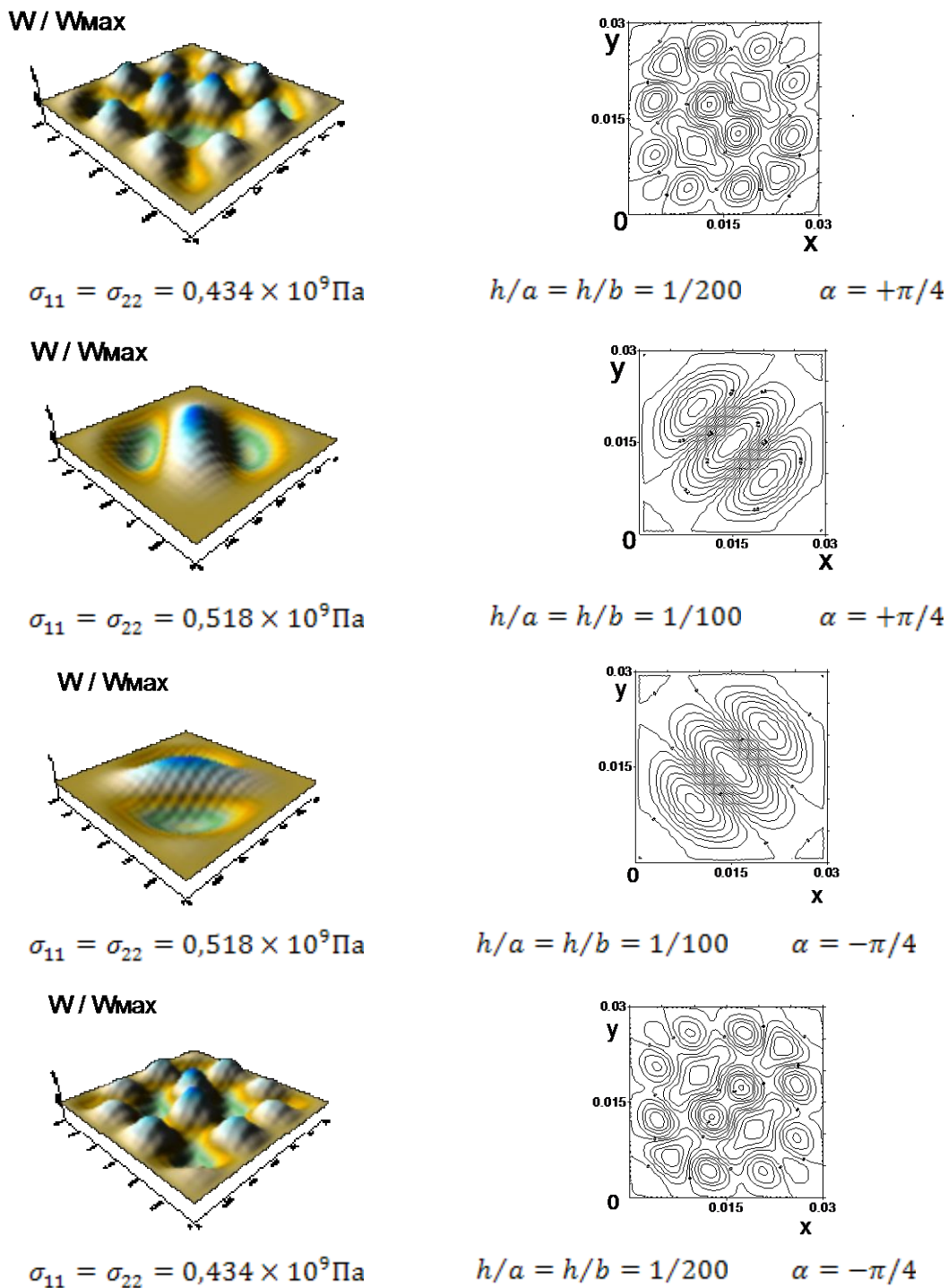


Рис. 17. Критические напряжения и формы потери устойчивости анизотропной пластинки на упругом основании при жестком защемлении сторон

Критические напряжения и формы потери устойчивости анизотропной пластинки на упругом основании приведены на рис. 17. Коэффициент постели упругого основания для данного случая равен $k = 1 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^3$. Картина волнообразования симметрична относительно осей ортотропии. При повороте осей ортотропии на 90° картина волнообразования поворачивается также на 90° . Если отношение толщины пластинки к длине ее стороны равно $h/a = 1/100$, то вдоль оси ортотропии с большим модулем упругости число полуволн равно 1, вдоль другой оси ортотропии с меньшим модулем упругости число полуволн равно 3.

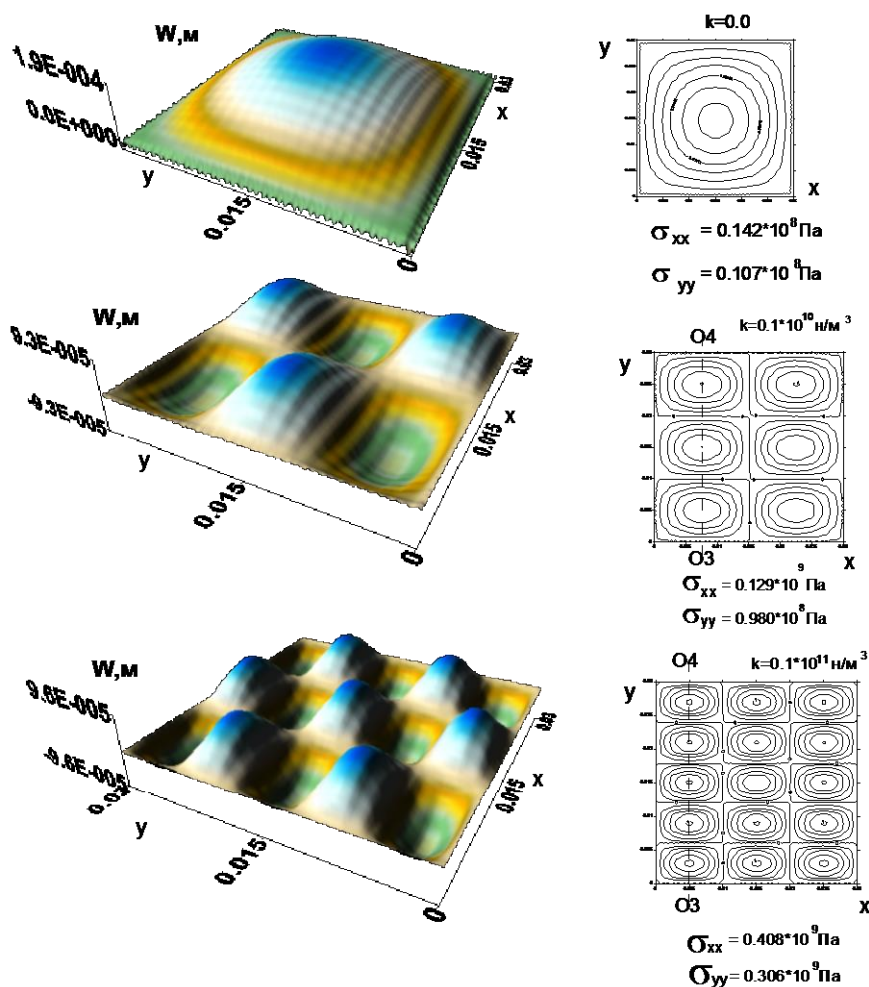


Рис. 18. Прогибы, изолинии прогибов пластинки на упругом основании ($k=0.1 \cdot 10^{11} \text{ Н/м}^3$, $k=0.1 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^3$) и без упругого основания ($k = 0$) после потери устойчивости.

Напряжения σ_{xx} , σ_{yy} – критические напряжения, приводящие к потере устойчивости ортотропного покрытия на упругом основании

Решение задачи устойчивости в рамках концепции Эйлера определяет форму потери устойчивости с точностью до постоянного множителя.

Конкретная величина нормального прогиба пластинки в каждой точке w_i вычисляется следующим образом.

В результате нагрева ортотропная пластинка увеличивает свои размеры вдоль осей приблизительно на величины $\Delta L_1 = \alpha_1 \Delta T L_{10}$, $\Delta L_2 = \alpha_2 \Delta T L_{20}$. Перемещения ΔL_1 и ΔL_2 находятся в результате решения задачи напряженно-деформированного состояния для ортотропной пластинки при ее нагревании на ΔT . Прогиб w_i пластинки после потери устойчивости при нагревании вычисляется из уравнения (20).

На рис. 18 приведены поверхности и изолинии прогибов ортотропной пластинки на упругом основании ($k = 0.1 \cdot 10^{10}$ Н/м³, $k = 0.1 \cdot 10^{11}$ Н/м³) и без упругого основания ($k = 0$). Наличие упругого основания изменяет форму прогибов при потере устойчивости. На рис. 19 приведены поверхность прогиба W ортотропного покрытия после потери устойчивости и напряжения в упругом основании после потери устойчивости покрытия. Качественно картина НДС в системе подложка – покрытие при потере устойчивости покрытия остается без изменений при различных свойствах (модулях упругости) основания – наличие сжимающих и растягивающих напряжений, как в покрытии, так и в подложке, образование в подложке зон сжатия и растяжения (интрузии и экструзии). При тепловом ударе в термопокрытии возникают значительные сжимающие напряжения, которые могут служить причиной потери устойчивости пластинки (покрытия). Наличие упругого основания увеличивает критическую нагрузку и изменяет форму потери устойчивости покрытия.

Экстремальные значения напряжений в пластинке расположены в порядке, напоминающем шахматную доску. Клетки вытянуты вдоль оси с большим модулем упругости. В случае анизотропии, когда оси ортотропии не совпадают с глобальными осями XOY , выпучины и вмятины располагаются симметрично относительно осей ортотропии.

При потере устойчивости покрытия на упругом основании число волн на поверхности покрытия увеличивается с увеличением коэффициента постели упругого основания и уменьшением отношения толщины пластинки к ее ширине и длине.

При потере устойчивости покрытия на упругом основании в покрытии возникают как растягивающие, так и сжимающие напряжения, которые могут вызвать разрушение материала покрытия. В упругом **основании** возникают периодически расположенные области, испытывающие напряжения сжатия и растяжения, что обуславливает формирование зон экструзии и интрузии. Если напряжения растяжения между покрытием и основанием превышают адгезионную прочность, то возможен отрыв покрытия от упругого основания.

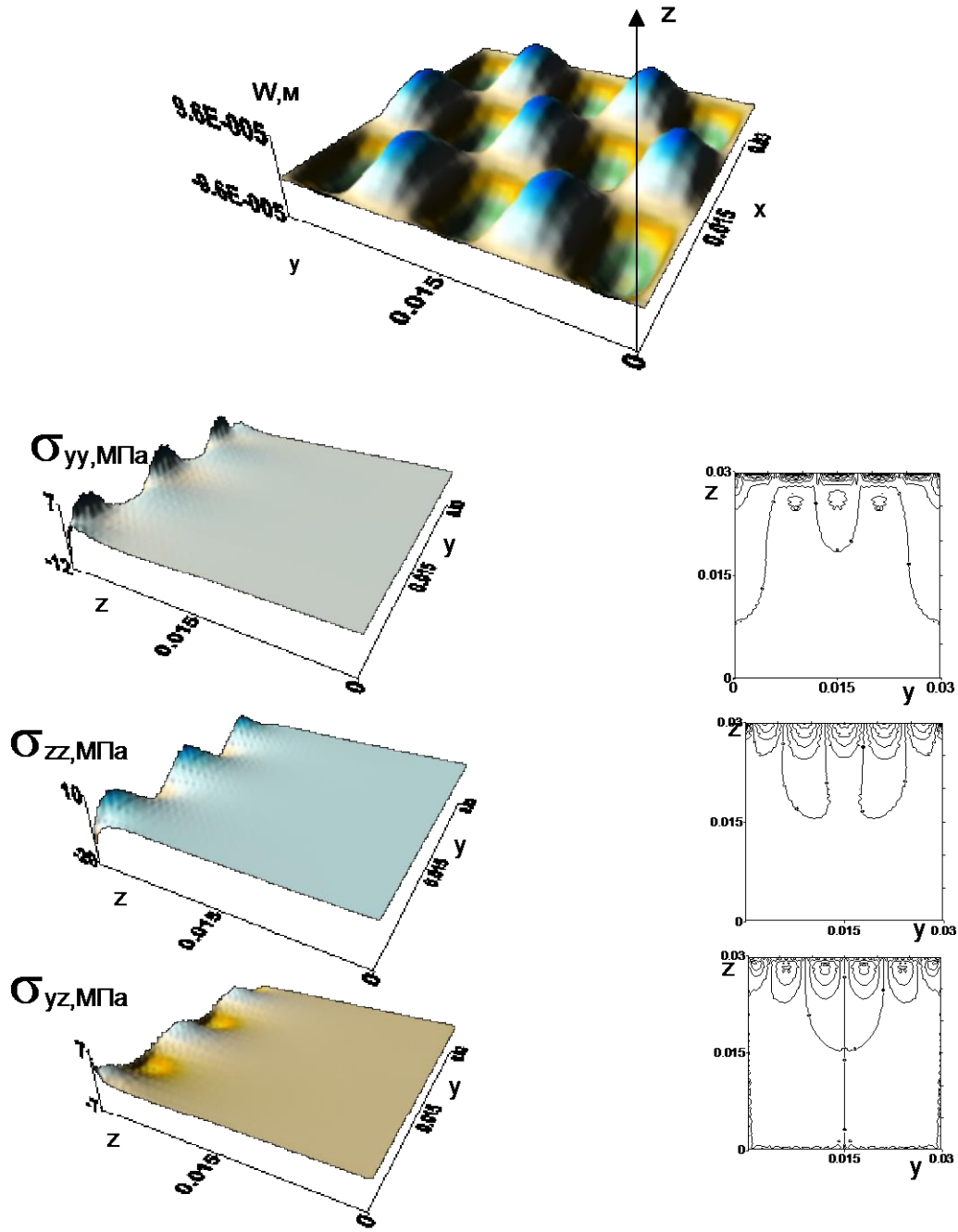


Рис. 19. Прогибы W срединной поверхности покрытия после потери устойчивости и напряжения в упругом основании после потери устойчивости покрытия. Модуль упругости основания $E = 0.280 \times 10^9$ Па, коэффициент постели упругого основания $k = 0.1 \times 10^{11}$ Н/м³

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Созданная модель дисперсно-наполненного композита позволяет вычислять эффективные характеристики материала при механических, тепловых и электромагнитных воздействиях. Модель термобарьерного покрытия позволяет предсказывать характер разрушения в системе «подложка – покрытие» при тепловом ударе.

2. Показано, что нарушение сплошности материала, отрыв матрицы от включения делает зависимость $\sigma \sim \varepsilon$ нелинейной даже в том случае, когда матрица и включения работают в упругой области.

3. Установлено, что неидеальность контакта между матрицей и включениями, наличие трещинообразных воздушных пустот вокруг включений уменьшает эффективный модуль упругости композита в зависимости от взаимной ориентации трещин и направления деформирования. Аналогичный эффект наблюдается при прохождении теплового потока. Неидеальный контакт между матрицей и включением, наличие трещин приводит к уменьшению эффективных модулей упругости и коэффициентов теплопроводности композита в основном вдоль направления, перпендикулярного трещинам.

4. Показано, что система параллельных неравноосных включений в композите превращают материал в ортотропный как с точки зрения теплофизических, так и деформационно-прочностных свойств. Учет дискретности включений приводит к тому, что соотношение $E_1\nu_2 = E_2\nu_1$, справедливое для идеального упругого ортотропного тела, выполняется с погрешностью до 40 %.

5. Проведено сравнение эффективных коэффициентов теплопроводности композита, рассчитанных по двумерным (2D) и трехмерным (3D) моделям. Различие эффективных коэффициентов теплопроводности, вычисленных по двумерным и трехмерным моделям, не превышает 15 %. Различие эффективных модулей упругости композита, вычисленных по двумерным (2D) и трехмерным (3D) моделям, не превышает 20 %. В целом наблюдается корреляция между характеристиками, полученными по двумерным и трехмерным моделям.

6. Показано, что относительная диэлектрическая проницаемость ε_r и удельная электрическая проводимость σ композита “полиэтилен-медь” при относительном содержании меди 0.4 увеличивается в 2.5 раза по сравнению с практически нулевой проводимостью матрицы, хотя диэлектрическая проницаемость меди формально равна бесконечности, а ее удельная электрическая проводимость на 15 порядков больше проводимости матрицы.

7. Для нахождения эффективных характеристик композита решаются краевые задачи теории упругости, теплопроводности, электростатики и

электропроводности. Алгоритмы решения краевых задач применимы для многофазных КМ с произвольной внутренней геометрией, при различных контактных условиях на границах фаз. В этом отношении разработанные методики получения электрических, теплофизических, механических характеристик КМ являются универсальными.

8. В композите при прохождении электрического тока изменяется температура. В результате последовательного решения задач электропроводности, теплопроводности, термоупругости вычисляются поля перемещений, деформаций, напряжений в композите. В любом проводнике возникают поля напряжений и деформаций как следствие тепловых потерь при прохождении электрического тока и изменения температуры.

9. Эффективные деформационные, электрофизические, теплофизические характеристики композита определяются из условия равенства энергий в структурно-неоднородном теле и в однородном теле сравнения при механических, тепловых, электромагнитных воздействиях. В случае механических воздействий приравниваются потенциальная энергия деформации структурно – неоднородного тела и тела сравнения. В случае тепловых воздействий сравниваются количество теплоты, полученное структурно-неоднородным телом и телом сравнения за конечный промежуток времени. В случае электромагнитных воздействий приравниваются энергии электромагнитных полей в неоднородном материале и в теле сравнения, мощности тепловых потерь в структурно-неоднородном теле и однородном теле сравнения.

10. Время расчета эффективных характеристик композита не превышает десятков секунд на стандартных современных ПК. Методики могут быть использованы при решении обратных задач механики, теплопроводности, электрофизики композитов и задач оптимального проектирования.

11. Установлено, что при тепловом ударе в термобарьерном покрытии возникают значительные сжимающие напряжения, которые могут служить причиной потери устойчивости покрытия. Наличие упругого основания увеличивает критическую нагрузку и изменяет форму потери устойчивости покрытия. После потери устойчивости в покрытии возникают как растягивающие, так и сжимающие напряжения, которые могут вызвать разрушение материала покрытия. В упругом основании возникают периодически расположенные области, испытывающие напряжения сжатия и растяжения (интрузии и экструзии). Если напряжения растяжения в зоне контакта покрытия и основания превышают адгезионную прочность, то возможен отрыв покрытия от упругого основания.

СПИСОК ТРУДОВ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Статьи в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, а также изданиях, индексируемых Web of Science, Scopus:

1. Люкшин Б. А. Влияние свойств межфазного слоя на напряженно-деформированное состояние полимерного композита в окрестности включения / Б. А. Люкшин, **П. А. Люкшин** // Механика композиционных материалов и конструкций. – 1998. – Т. 4, № 2. – С. 56–68. – 1,5 / 1 а.л.

2. Люкшин Б. А. Прочностной анализ дисперсно-наполненных полимерных систем на мезоуровне / Б. А. Люкшин, **П. А. Люкшин** // Физическая мезомеханика. – 1999. – Т. 2, № 1–2. – С. 57–68. – 1,1 / 0,6 а.л.

3. Люкшин Б. А. Опыт прочностного конструирования наполненной полимерной композиции / Б. А. Люкшин, Л. А. Алексеев, В. В. Гузеев, М. В. Липовка, **П. А. Люкшин**, Н. Ю. Матолыгина // Физическая мезомеханика. – 2000. – Т. 3, № 1. – С. 59–66. – 0,75 / 0,35 а.л.

4. Люкшин Б. А. Двухэтапный процесс компьютерного конструирования наполненной полимерной композиции / Б. А. Люкшин, **П. А. Люкшин**, Н. Ю. Матолыгина // Физическая мезомеханика. – 2000. – Т. 3, № 4. – С. 71–77. – 0,88 / 0,5 а.л.

5. Люкшин Б. А. Температурные напряжения и образование межфазных слоев в композитах / Б. А. Люкшин, **П. А. Люкшин** // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2000. – Т. 6, № 2. – С. 261–274. – 0,71 / 0,4 а.л.

6. Люкшин Б. А. Влияние геометрии включений в полимерной композиции на вид кривой «напряжения-деформации» / Б. А. Люкшин, **П. А. Люкшин**, Н. Ю. Матолыгина // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2001. – Т. 7, № 3. – С. 277–287. – 0,67 / 0,4 а.л.

7. Дашук И. А. Влияние деформационно-прочностных свойств структурных элементов на характеристики дисперсно наполненных композиций / И. А. Дашук, Б. А. Люкшин, **П. А. Люкшин**, Н. Ю. Матолыгина // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2004. – Т. 10, № 3. – С. 366–384. – 0,92 / 0,4 а.л.

8. Люкшин Б. А. Задачи компьютерного конструирования наполненных полимерных композиций / Б. А. Люкшин, **П. А. Люкшин**, Н. Ю. Матолыгина // Физическая мезомеханика. – 2004. – Т. 7 : спец. выпуск, ч. 1. – С. 19–22. – 0,5 / 0,3 а.л.

9. **Люкшин П. А.** Расчет упругого осесимметричного напряженно-деформированного состояния аварийного клапана / П. А. Люкшин, Н. Ю. Матолыгина // Физическая мезомеханика. – 2004. – Т. 7 : спец. выпуск, ч. 1. – С. 66–69. – 0,63 / 0,4 а.л.

10. Люкшин Б. А. Анализ напряженно-деформированного состояния

элементов клапана химического реактора / Б. А. Люкшин, **П. А. Люкшин**, Н. Ю. Матолыгина, М. В. Липовка // Известия Томского политехнического университета. – 2004. – Т. 307, № 4. – С. 116–120. – 0,75 / 0,35 а.л.

11. Анисимов И. И. Эффективные деформационно-прочностные характеристики полимерной композиции с дисперсными включениями разных размеров / И. И. Анисимов, С. А. Бочкарева, В. И. Десятых, Б. А. Люкшин, **П. А. Люкшин**, Н. Ю. Матолыгина, Н. В. Смолянинова // Физическая мезомеханика. – 2006. – Т. 9, № 2. – С. 11–15. – 0,63 / 0,2 а.л.

12. **Люкшин П. А.** Определение эффективных теплофизических характеристик композиционного материала / П. А. Люкшин, Б. А. Люкшин, Н. Ю. Матолыгина, С. В. Панин // Физическая мезомеханика. – 2008. – Т. 11, № 5. – С. 103–110. – 1 / 0,5 а.л.

13. Анохина Н. Ю. Влияние адгезии матрицы к армирующим включениям на эффективные характеристики полимерной композиции / Н. Ю. Анохина, С. А. Бочкарева, Б. А. Люкшин, **П. А. Люкшин** // Физическая мезомеханика. – 2009. – Т. 12, № 5. – С. 111–115. – 0,53 / 0,3 а.л.

14. Анохина Н. Ю. Оценка адгезионного взаимодействия фаз композиционного материала по кривой напряжение-деформация / Н. Ю. Анохина, С. А. Бочкарева, Б. А. Люкшин, **П. А. Люкшин**, С. В. Панин // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2010. – Т. 16, № 1. – С. 97–105. – 0,87 / 0,4 а.л.

15. **Люкшин П. А.** Расчет температуры и температурных напряжений в многослойном покрытии / П. А. Люкшин, Б. А. Люкшин, Н. Ю. Матолыгина, С. В. Панин // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2010. – Т. 16, № 4. – С. 563–574. – 1,24 / 0,6 а.л.

16. **Люкшин П. А.** Моделирование напряженно-деформированного состояния и потери устойчивости термобарьерного покрытия при тепловом ударе / П. А. Люкшин, Б. А. Люкшин, Н. Ю. Матолыгина, С. В. Панин // Физическая мезомеханика. – 2011. – Т. 14, № 1. – С. 33–41. – 1,0 / 0,6 а.л.

17. **Люкшин П. А.** Моделирование отслоения термобарьерных покрытий под действием температурных напряжений / П. А. Люкшин, Б. А. Люкшин, Н. Ю. Матолыгина, С. В. Панин // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2011. – Т. 54, № 10/2. – С. 123–130. – 0,92 / 0,55 а.л.

18. Юсиф С. А. К. Напряженно-деформированное состояние на интерфейсе «керамическое теплозащитное покрытие – медная основа» / С. А. К. Юсиф, С. В. Панин, **П. А. Люкшин**, В. П. Сергеев // Физическая мезомеханика. – 2011. – Т. 14, № 4. – С. 81–94. – 1,56 / 0,7 а.л.

19. Панин С. В. Влияние анизотропии полимерной матрицы на свойства композиции / С. В. Панин, С. А. Бочкарева, Б. А. Люкшин, **П. А. Люкшин**, Н. Ю. Гришаева, О. А. Сенатова // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2013. – Т. 56, № 7/3. – С. 200–202. – 0,42 / 0,2 а.л.

20. Панин С. В. Моделирование и анализ температурных полей и напряженно-деформированного состояния в термобарьерных покрытиях с анизотропией свойств / С. В. Панин, **П. А. Люкшин**, С. А. Бочкарева, Н. Ю. Матолыгина, Б. А. Люкшин // Известия высших учебных заведений.

Физика. – 2013. – Т. 56, № 7/3. – С. 203–205. – 0,42 / 0,2 а.л.

21. **Люкшин П. А.** Влияние анизотропии на напряженно-деформированное состояние и потерю устойчивости керамического защитного покрытия при тепловом ударе / П. А. Люкшин, Б. А. Люкшин, Н. Ю. Матолыгина, С. В. Панин // Физическая мезомеханика. – 2015. – Т. 18, № 3. – С. 32–46. – 1,75 / 1,2 а.л.

22. Гришаева Н. Ю. Модификация теплофизических характеристик полимеров введением микронаполнителей / Н. Ю. Гришаева, **П. А. Люкшин**, Б. А. Люкшин, С. В. Панин, С. А. Бочкарева, Ю. А. Реутов, Н. Ю. Матолыгина // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2016. – Т. 22, № 3. – С. 342–361. – 1,23 / 0,6 а.л.

23. **Люкшин П. А.** Расчет электрофизических свойств дисперсно-наполненного композита / П. А. Люкшин, Н. Ю. Гришаева, Б. А. Люкшин, С. В. Панин, С. А. Бочкарева, Н. Ю. Матолыгина, Г. Е. Уцын // Вычислительная механика сплошных сред. – 2017. – Т. 10, № 1. – С. 5–16. – 0,88 / 0,2 а.л.

24. **Люкшин П. А.** Напряженно-деформированное состояние термобарьерного покрытия на упругом основании после потери устойчивости покрытия / П. А. Люкшин, Б. А. Люкшин, Н. Ю. Матолыгина, С. В. Панин // Физическая мезомеханика. – 2017. – Т. 20, № 4. – С. 52–62. – 1,25 / 0,8 а.л.

25. Гришаева Н. Ю. Влияние структурных особенностей сверхмолекулярного полиэтилена на свойства композиции / Н. Ю. Гришаева, **П. А. Люкшин**, Б. А. Люкшин, С. В. Панин, С. А. Бочкарева, Н. Ю. Матолыгина, И. Л. Артемов // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2017. – Т. 23, № 2. – С. 183–197. – 0,7 / 0,3 а.л.

26. Бочкарева С. А. Получение заданных эффективных механических, теплофизических и электрических характеристик композиционных дисперсно наполненных материалов / С. А. Бочкарева, Н. Ю. Гришаева, Б. А. Люкшин, **П. А. Люкшин**, Н. Ю. Матолыгина, И. Л. Панов // Перспективные материалы. – 2017. – № 5. – С. 5–18. – 1,35 / 0,7 а.л.

в переводной версии журнала:

Bochkareva S. A. Obtaining of specified effective mechanical, thermal, and electrical characteristics of composite filled with dispersive materials / S. A. Bochkareva, B. A. Lyukshin, **P. A. Lyukshin**, N. Y. Matolygina, N. Y. Grishaeva, I. L. Panov // Inorganic Materials: Applied Research. – 2017. – Vol. 8, is. 5. – P. 651–661. – DOI: 10.1134/S2075113317050070. (*Scopus*)

Статьи в зарубежных научных журналах, индексируемых Web of Science и / или Scopus:

27. Panin S. V. FEM based design thermal-barrier coating in terms of varying «coating- substrate» interface geometry / S. V. Panin, S. A. Yussif, V. E. Panin, **P. A. Lyukshin**, B. A. Lyukshin, V. P. Sergeev // Journal of iron and steel research international. – 2010. – Vol. 17, suppl. 1. – P. 89–94. – 0,65 / 0,3 а.л. (*Web of Science*)

28. Anokhina N. Yu. Estimation of the adhesive interaction of composite material phases using the stress-strain curve / N. Yu. Anokhina, S. A. Bochkareva, B. A. Lyukshin, **P. A. Lyukshin**, S. V. Panin // International journal of nanomechanics. Science and technology. – 2010. – Vol. 1, is. 4. – P. 301–311. –

DOI: 10.1615/NanomechanicsSciTechnolIntJ.v1.i4.30. – 0,65 / 0,3 а.л. (*Scopus*)

29. Lyukshin B. A. A multilevel analysis of deformation and fracture of filled polymeric coatings for tribotechnical application. / B. A. Lyukshin, S. V. Panin, S. A. Bochkareva, **P. A. Lyukshin**, A. I. Reutov // *Engineering Fracture Mechanics*. – 2014. – Vol. 130. – P. 75–82. – DOI: 10.1016/j.engfracmech.2014.07.034. – 0,65 / 0,3 а.л. (*Web of Science*)

Статьи в сборниках материалов конференций, индексируемых Web of Science:

30. Bochkareva S. A. The effect of anisotropy in polymeric matrices on compositional properties at various temperatures / S. A. Bochkareva, N. Yu. Grishaeva, B. A. Ljukchin, **P. A. Ljukchin**, S. V. Panin, O. A. Senatova, Y. A. Reutov // *Advanced materials research*. – 2014. – Vol. 1040 : International conference for young scientists on high technology – research and applications. Tomsk, Russia, March 26–28, 2014. – P. 188–193. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1040.188. – 0,25 / 0,15 а.л.

31. Bochkareva S. A. Determination of the thermal conductivity coefficient of inhomogeneous media / S. A. Bochkareva, N. Yu. Grishaeva, **P. A. Lyukshin**, B. A. Lyukshin // *AIP Conference Proceedings*. – 2014. – Vol. 1623 : International conference on physical mesomechanics of multilevel systems. Tomsk, Russia, September 03–05, 2014. – P. 71–74. – DOI: 10.1063/1.4898885. – 0,27 / 0,17 а.л.

32. Grishaeva N. Yu. Thermal properties simulation of multilayer pipe / N. Yu. Grishaeva, B. A. Lyukshin, **P. A. Lyukshin**, A. I. Reutov, Y. A. Reutov // *AIP Conference proceedings*. – 2014. – Vol. 1623 : International conference on physical mesomechanics of multilevel systems. Tomsk, Russia, September 03–05, 2014. – P. 187–190. – DOI: 10.1063/1.4898914. – 0,27 / 0,15 а.л.

33. Lyukshin B. A. Design of composites with specified effective mechanical and thermophysical characteristics / B. A. Lyukshin, **P. A. Lyukshin**, S. A. Bochkareva, N. Yu. Matolygina, N. Yu. Grishaeva // *AIP Conference proceedings*. – 2014. – Vol. 1623 : International conference on physical mesomechanics of multilevel systems. Tomsk, Russia, September 03–05, 2014. – P. 383–386. – DOI: 10.1063/1.4898962. – 0,27 / 0,15 а.л.

34. Lyukshin B. A. Stress-strain state and loss of stability of anisotropic thermal coating under thermal shock / B. A. Lyukshin, **P. A. Lyukshin**, S. A. Bochkareva, N. Yu. Matolygina, S. V. Panin // *AIP Conference Proceedings*. – 2014. – Vol. 1623 : International conference on physical mesomechanics of multilevel systems. Tomsk, Russia, September 03–05, 2014. – P. 387–390. – DOI: 10.1063/1.4898963. – 0,27 / 0,15 а.л.

35. Grishaeva N. The comparison of calculated and experimental values of thermophysical properties of the filled material / N. Grishaeva, B. Lyukshin, **P. Lyukshin**, Y. Strukov, A. Reutov, Y. Reutov // *AIP Conference Proceedings*. – 2015. – Vol. 1683 : International conference on advanced materials with hierarchical structure for new technologies and reliable structures. Tomsk, Russia, September 21–25, 2015. – Article number 020064. – 5 p. – DOI: 10.1063/1.4932754. – 0,28 / 0,2 а.л.

36. **Lyukshin P. A.** Strength analysis of anisotropic thermal barrier coating under heat shock / P. A. Lyukshin, B. A. Lyukshin, N. Yu. Matolygina, S. V. Panin //

Procedia Engineering. – 2015. – Vol. 113 : International Conference on Oil and Gas Engineering (OGE-2015). Omsk, Russia, April 25–30, 2015. – P. 408–412. – DOI: 10.1016/j.proeng.2015.07.306. – 0,32 / 0,2 а.л.

37. Lyukshin B. A. Modeling of filled polymeric composite materials in view of structural features / B. A. Lyukshin, S. V. Panin, S. A. Bochkareva, N. Yu. Grishaeva, **P. A. Lyukshin**, Yu. A. Reutov // Procedia engineering. – 2015. – Vol. 113 : International Conference on Oil and Gas Engineering (OGE-2015). Omsk, Russia, April 25–30, 2015. – P. 474–478. – DOI: 10.1016/j.proeng.2015.07.338. – 0,32 / 0,15 а.л.

38. **Lyukshin P. A.** Deformation, temperature and electrical field simulation in composite materials and their effective calculation characteristics / P. A. Lyukshin, B. A. Lyukshin, N. Yu. Matolygina, S. V. Panin // AIP Conference proceedings. – 2015. – Vol. 1683: International conference on advanced materials with hierarchical structure for new technologies and reliable structures. Tomsk, Russia, September 21–25, 2015. – Article number 020131. – 4 p. – DOI: 10.1063/1.4932821. – 0,26 / 0,15 а.л.

39. Bochkareva S. A. Comparative analysis of methods for determination of the thermal characteristics of filled polymeric composites. / S. A. Bochkareva, N. Yu. Grishaeva, **P. A. Lyukshin**, B. A. Lyukshin, S. V. Panin, Yu. A. Reutov, N. Yu. Matolygina // AIP Conference proceedings. – 2016. – Vol. 1783 : Advanced materials with hierarchical structure for new technologies and reliable structures. Tomsk, Russia, September 19–26, 2016. – Article number 020017. – 5 p. – DOI: 10.1063/1.4966310. – 0,27 / 0,15 а.л.

40. **Lyukshin P. A.** Stress-strain state in «coating-substrate» system after coating stability loss induced by impact thermal stresses / P. A. Lyukshin, S. A. Bochkareva, N. Yu. Grishaeva, B. A. Lyukshin, N. Yu. Matolygina, S. V. Panin // AIP Conference proceedings. – Vol. 1783 : Advanced materials with hierarchical structure for new technologies and reliable structures. Tomsk, Russia, September 19–26, 2016. – Article number 020142. – 5 p. – DOI: 10.1063/1.4966435. – 0,27 / 0,15 а.л.

Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ:

41. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014617442. Программа расчета методом конечных элементов напряженно-деформированного состояния при особом задании топологии сетки с независимой нумерацией узлов элементов / **Люкшин П. А.**, Бочкарева С. А., Гришаева Н. Ю., Люкшин Б. А., Матольгина Н. Ю.; правообладатель: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (РУ). Заявка № 2014615107; дата поступления – 29.05.2014; дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ – 22.07.2014.

42. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014617443. Программа определения параметров композиционного материала по заданным деформационно-прочностным характеристикам / Люкшин Б. А., Бочкарева С. А., Гришаева Н. Ю., **Люкшин П. А.**,

Матолыгина Н. Ю.; правообладатель: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (RU). Заявка № 2014615108; заявл. – 29.05.2014; дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ – 22.07.2014.

Монографии:

43. Люкшин Б. А. Наполненные полимерные композиции / Б. А. Люкшин, С. В. Панин, С. А. Бочкарева, Н. Ю. Гришаева, Л. А. Корниенко, **П. А. Люкшин**, Н. Ю. Матолыгина, А. И. Реутов. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 297 с. – 17,27 / 2,5 а.л.

44. Люкшин Б. А. Компьютерное моделирование и конструирование наполненных композиций / Б. А. Люкшин, С. В. Панин, С. А. Бочкарева, Н. Ю. Гришаева, Л. А. Корниенко, **П. А. Люкшин**, Н. Ю. Матолыгина, А. И. Реутов. – Новосибирск: Изд-во СО РАН Наука, 2015. – 264 с. – 21,3 / 3 а.л.

45. Люкшин Б. А. Дисперсно-наполненные полимерные композиты технического и медицинского назначения / Б. А. Люкшин, С. В. Шилько, С. В. Панин, Ю. К. Машков, Л. А. Корниенко, **П. А. Люкшин**, Ю. М. Плескачевский, О. В. Кропотин, С. А. Бочкарева, Н. Ю. Матолыгина, Д. А. Черноус, Н. Ю. Гришаева, Ю. А. Реутов. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2017. – 311 с. – 25,2 / 2,5 а.л.

46. Люкшин Б. А. Моделирование физико-механических процессов в неоднородных конструкциях / Б. А. Люкшин, А. В. Герасимов, Р. А. Крехтулева, **П. А. Люкшин**. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2001. – 272 с. – 15,81 / 3 а.л.

47. Люкшин Б. А. Компьютерное конструирование наполненных полимерных композиций / Б. А. Люкшин, С. В. Панин, С. А. Бочкарева, **П. А. Люкшин**, Н. Ю. Матолыгина, Ю. В. Осипов. – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2007. – 216 с. – 12,56 / 2,6 а.л.

Статья в зарубежном научном журнале:

48. **Lyukschin P. A.** Stress-strain state and stability loss of anisotropic thermal barrier coating under thermal impact / P. A. Lyukschin, B. A. Lyukschin, N. Yu. Matolygina, S. V. Panin // International Journal of Composite Materials. – 2014. – Vol. 4 (5A). – P. 16–26. – DOI: 10.5923/j.comaterials.201401.03. – 0,65 / 0,4 а.л.

Издание подготовлено в авторской редакции.
Отпечатано на участке цифровой печати
Издательского Дома Томского государственного университета
Заказ № 1806-18 от «18» июня 2018 г. Тираж 100 экз.
г. Томск Московский тр. 8 тел. 53-15-28