На правах рукописи

if

Любимова Ольга Николаевна

СТЕКЛОМЕТАЛЛОКОМПОЗИТ: МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА, СТРУКТУРНЫЕ МЕХАНИЗМЫ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ, МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ

Специальность 01.02.04 - «Механика деформируемого твердого тела»

Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора физико-математических наук

Комсомольск- на- Амуре – 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Дальневосточный федеральный университет», Отделения машиностроения, морской техники и транспорта Инженерного департамента Политехнического института (школы)

- Научный консультант: член- корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Хабаровского федерального исследовательского центра ДВО РАН, г. Хабаровск Буренин Анатолий Александрович
- Официальные доктор технических наук, зав. кафедрой сопротивления материалов оппоненты: ФГБОУ BO «Волгоградский государственный технический университет», г. Волгоград Захаров Игорь Николаевич

доктор физико-математических наук, профессор Отделения материаловедения инженерной школы новых производственных технологий ФГБОУ ВО «Томский политехнический университет», г. Томск

Князева Анна Георгиевна

доктор физико-математических наук, профессор, зав. кафедрой информационных экономических систем ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий им. Академика М.Ф. Решетнева», г. Красноярск

Сенашов Сергей Иванович

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем машиноведения РАН (ИПМаш РАН), г. Санкт-Петербург

Защита состоится « 2 » апреля 2021 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 212.092.07 в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный университет» по адресу 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, проспект Ленина, 27, факс (4217) 5361-50, dis@knastu.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Комсомольского-на-Амуре государственного университета» и на сайте https://sovet.knastu.ru/diss_defense.

Ученый секретарь диссертационного совета к.ф.-м.н., доцент

Григорьева А.Л.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования связана с сохраняющейся потребностью различных отраслей промышленности в конструкционных композиционных материалах с уникальным комплексом свойств и многообразием функциональных назначений. Общими являются требования высоких прочностных характеристик, низкого удельного веса и снижения скорости химического взаимодействия с рабочей или окружающей средой. Для каждой отрасли и назначения перечисленный набор дополняется специфическими требованиями, например, в строительстве – общей несущей способностью, в приборостроении – наименьшим коэффициентом трения или высокой термостойкостью.

Среди интересных и перспективных подходов к моделированию новых материалов выделяется направление получения материалов, сочетающих свойства стекла и металла. Стеклометаллическими композитами (СтМ) или (СМК) называют: композиционные покрытия, стеклометаллические нанокомпозиты, микрошарики, и волокна для армирования материалов, слоистые конструкционные материалы на основе металла и стеклоткани или монослоев стекла. Последнему виду стеклометаллических композитов (стеклометаллокомпозиту) и посвящено настоящее исследование.

Стеклометаллокомпозит (или далее СМК) отличается технологией, это слоистый композиционный материал на основе алюминия и стекла или стали и стекла, получаемый методами высокой температурной обработки: центрифугирования, косвенного, индукционного нагрева или баллонным методом. Несмотря на то, что первые технологические приемы были применены при остекловывании стальных труб еще в 60-х годах прошлого столетия, ряд технологических проблем, связанных в первую очередь с получением качественного соединения стеклянного и стального слоя, а также конкуренция со стороны синтетических материалов не позволила достаточно развить данное направление. В 90-х годах Пикулем В.В. была рассмотрена глубоководного изготовления оболочки корпуса аппарата возможность ИЗ стеклометаллокомпозита на основе алюминия и стекла. Проведенный им предварительный теоретический анализ показал эффективность данного материала при условии его получения с заданными свойствами. В отличие от покрытий стеклянный слой в составе оболочки имеет одинаковый или существенно больший размер (толщину), чем металл. Основной была принята, в соответствии со стандартным подходом в теории упрочнения стекла, гипотеза о существенном упрочнении стеклянного слоя за счет устранения поверхностных микродефектов в результате наведения сжимающих напряжений при определенных температурах за счет разницы в физикомеханических свойствах стекла и металла. Для изучения возможности упрочнения стекла в составе стеклометаллокомпозита было предложено исследовать свойства и физико-химические основы получения стеклометаллокомпозитных стержней, состоящих из стеклянного сердечника и металлической оболочки.

Исследования по получению нового материала связаны с комплексом актуальных фундаментальных проблем химии и физики стекла, механики материалов и термомеханики, среди которых: структура стекла, стеклование, моделирование структурных изменений при высоких температурах, изменение свойств композита при различных типах воздействия, моделирование совместного деформирования соединения из разнородных материалов и получение бездефектного соединения стекла с металлом.

Степень разработанности темы. Технология производства СМК содержит в себе явления и процессы, экспериментально и теоретически изученные совершенно недостаточно. Технологическая операция процесса его получения подразумевает нагрев до температур 750 – 850 °С, при которых стекло должно переходить из аморфного в состояние вязкой жидкости, и наоборот при остывании. Разные стороны подобных процессов изучались в фундаментальных работах Гиббса Дж., Таммана Г., Шульца М.М., Волькенштейна М.В., Бартенева Г.М., Малкина А.Я., Александрова А.П., Лазуркина Ю.С., Немилова С.В., Кольрауша Ф., Тула А.,

Нарайанасвами О., Мойнихана К., Маседо П., Ковакса А. Все же степень влияния условий на стеклование и формирование внутренней структуры стекла технологических операций остается на стадии накопления данных, а развитие технологий получения соединений стекла с металлами протекает преимущественно опытным путем. Общего теоретического подхода к механизму формирования подобных соединений до сих пор не существует. При этом именно в такой связи нельзя не отметить результаты и предложения в работах Преснова В.А., Якубени М.П., Бачина В.А., Новодворского Ю.Б., Мазурина О.В. и Старцева Ю.К. Только в нескольких работах Макаровой Н.О., Татаринцевой О.С., Шмидта Т. и Киркера Б. экспериментально проверялись свойства соединений стекла со сталью в прочностные и деформационные зависимости от изменений структуры в зоне соединения. Очевидно, эта проблема заслуживает большего внимания. Механические и структурные свойства соединения задают функциональные качества композита; публикаций, отслеживающих эту связь посредством решения отдельных технологических задач в производстве СМК крайне мало (Пикуль В.В., Жорник А.И., Кулямина Л.Л., Гончарук В.К., Солоненко Э.П.). Единичны и исследования прочностных и деформационных свойств элементов конструкций, материалом которых является СМК (Гридасова Е.А., Любимова О.Н., Морковин А.В.). Требуются дальнейшие и значительные усилия в части математического моделирования процессов, сопровождающих производство СМК. В этой связи неоценимым может сказаться опыт, накопленный в расчетах задач консолидации расплавов (Багмутов В.П., Баландин Г.Ф., Ефимов В.А., Захаров И.Н., Скобло С.Я.), полимеризационного затвердевания (Булгаков В.К., Быковцев Г.И., Чехонин К.А.), растущих тел (Арутюнян Н.Х., Манжиров А.В., Радаев Ю.Н.), термомеханики высокочистых и легированных стекол (Матвеенко В.П., Шардаков И.Н., Труфанов Н.А., Сметанников О.Ю.).

Целью работы является разработка научных основ направленного синтеза нового слоистого конструкционного материала – стеклометаллокомпозита.

1. Комплексное исследование многостадийного процесса получения стеклометаллокомпозита, в том числе: экспериментальные исследования физико-химических процессов в зоне соединения стекла и стали и их влияния на структуру и свойства стеклометаллокомпозита.

2. Экспериментальные исследования влияния отлельных факторов технологии: В температуры, скорости нагрева и охлаждения, методов дополнительной химической обработки и времени выдержки при максимальной температуре на механические свойства стеклометолокомпозита.

3. Разработка математических моделей и новых алгоритмов расчета изменения свойств СМК при температурной обработке, с учетом физико-химических изменений в структуре стекла и металла, особенностей структурных и механических релаксационных процессов в стеклах при термообработке в интервале стеклования и при изменении в поверхностных слоях структуры стекла.

4. Разработка основ прогнозирования изменений свойств стеклометаллокомпозита при модификации материалов, входящих в его состав.

5. Обоснование теоретической и практической значимости стеклометаллокомпозита и определение области его применения.

Научная новизна работы. Выполненная работа является первым комплексным исследованием по изучению физических основ формирования нового конструкционного и функционального материала на основе стекла и металла с сопутствующей разработкой математических моделей, количественно воспроизводящих экспериментальные данные. Создано новое научное направление в конструкционных материалах и методах повышения прочности стекла, получены следующие новые результаты.

1. Получен новый конструкционный и функциональный материал на основе неорганического стекла и малоуглеродистой стали – СМК стержень, обоснована его практическая значимость как армирующего элемента в бетонных конструкциях для строительной отрасли.

2. Установлены новые сведения о физико-химических процессах и структурных изменениях, происходящих при спаивании стекла со сталью в зоне их соединения, экспериментально выявлены закономерности изменения структуры при изменении температуры, времени выдержки и способа дополнительной обработки соединяемых поверхностей стали и стекла.

3. Предложен новый способ соединения стекла с малоуглеродистой сталью в окислительной среде без хрупких фаз в зоне соединения.

4. Впервые экспериментально исследованы особенности деформирования и разрушения стеклометаллокомпозита при различных видах воздействий: механических, тепловых и химических. Установлено, что разрушение стеклометаллокомпозита идет по различным преобладающим механизмам: хрупкому при исследованиях ударной вязкости, одноосного сжатия, термостойкости и пластичному при одноосном растяжении, изгибе и многоцикловой усталости. Определены значения максимальной температуры, времени выдержки и способа обработки соединяемых поверхностей, при которых СМК наиболее эффективно выдерживает механическое и тепловое воздействие.

5. Разработана новая феноменологическая модель термомеханического поведения слоистых материалов с релаксационными переходами для описания технологических и остаточных напряжений в СМК при температурном воздействии, которая позволяет учесть изменение свойств и структурную релаксацию в стеклянных слоях в интервале стеклования, пластическое деформирование и фазовые переходы в металлических слоях. Развивается условие частичного проскальзывания на поверхности сопряжения слоев в соосных цилиндрических сопряженных системах при осимметричном температурном и механическом воздействиях.

6. Разработаны, обоснованы и верифицированы вычислительные алгоритмы для численного решения краевых задач механики для слоистых композитов, выполненных из стеклующихся и пластичных материалов при температурной обработке и структурных изменениях в зоне соединения стекла и металла. Предложен и реализован численный алгоритм решения краевой задачи термомеханики неоднородной стеклующейся среды с учетом зависимости теплофизических и реологических свойств стекол от температуры.

7. Численно исследована эволюция технологических напряжений в цилиндрических образцах стеклометаллокомпозита в процессе получения и при отжиге. Установлено влияние скорости охлаждения на остаточные напряжения в СМК и экспериментально выявлен разный характер разрушения образцов, полученных при разных температурных режимах при одноосном растяжении.

Положения, выносимые на защиту.

1. Способ и технология получения нового слоистого композиционного материала на основе стекла и стали комбинированным методом литья под давлением и пайки.

2. Результаты экспериментальных и теоретических исследований закономерностей процессов на границе соединения неорганических стекол и стали, в том числе характеризующие параллельные и последовательные реакции окисления и растворения оксидов железа с образованием зоны насыщенной железом в стекле.

3. Физико-механические основы информационной системы по анализу свойств нового слоистого конструкционного материала — стеклометаллокомпозита. Комплекс исследований, позволяющий провести многокритериальный анализ свойств СМК.

4. Математическая модель и метод определения эволюции термических напряжений в СМК в рамках релаксационной кинетической теории стеклования. Математическая модель и численный метод расчета изменений свойств стеклометаллокомпозита в интервале стеклования с учетом пластического течения и фазового перехода в металлических слоях. Модель учета проскальзывания вдоль образующей в соосных сопряженных цилиндрических системах.

5. Комплекс результатов численного исследования механического поведения многослойных СМК при термической, механической и концентрационной нагрузке.

5

Теоретическая и практическая значимость работы определяется главным образом тем, что на основе комплексного исследования особенностей поведения стеклометаллокомпозита при термическом и механическом воздействиях разработан единый подход к количественному описанию изменений свойств СМК при произвольных сочетаниях перечисленных воздействий. Этот подход доказал эффективность при разработке научных основ формирования нового конструкционного материала на основе неорганического стекла и стали и может быть использован при моделировании свойств слоистых композитов со стеклующимися слоями и фундаментальных исследованиях особенностей деформирования и разрушения стеклообразных материалов. Результаты исследований позволили получить представление об особенностях структурных изменений в зоне соединения стекла и стали. Методические разработки, математические модели и программные продукты, полученные в ходе выполнения диссертационной работы, внедрены в технологию получения СМК стержней, научную практику и в учебный процесс.

Методология и методы исследования. В работе используются методы теории вязкоупругости, пластичности, фазовых переходов, кинетической теории стеклования и вычислительной математики. Оригинальные экспериментальные методики обработки данных по усадке, оригинальное лабораторное оборудование для получения стеклометаллокомпозита и экспериментальных исследований его свойств. Для математического моделирования использовались конечно-элементный пакет ANSYS и специально разработанные алгоритмы и программы в пакетах Maple и MATLAB.

Достоверность научных положений и выводов экспериментальных и теоретических исследований диссертации обеспечена: корректным применением методик экспериментальных исследований и методов планирования и статистической обработки эксперимента; использованием классических подходов неравновесной термодинамики и механики сплошных сред; выбором экспериментально апробированных теоретических направлений математического моделирования; сравнением разработанных моделей с экспериментальными исследованиями и результатами классических решений механики деформируемого твердого тела.

Апробация работы. Лично соискателем доложены основные результаты работы на слелующих конференциях, выставках семинарах: XII Всероссийском И съезде по фундаментальным проблемам теоретической И прикладной механики (Уфа, 2019), Международной конференции «Advanced Problems in Mechanics» (Санкт-Петербург, 2010, 2014, 2015), 14th Japan International Sampe Symposium and Exhibition (14-й японской международной выставке-симпозиуме по композиционным материалам, Токио, Канадзава, 2015), Ежегодной российской выставке «ВУЗПРОМЭКСПО» (Москва, 2014, 2015, 2019), 1st International Scientific Conference "Problems in Geomechanics of Highly Compressed Rock and Rock Massifs" (Владивосток, 2019), Четвертой международной конференции «Математическая физика и её приложения» (Самара, 2014), XVI-ой Зимней школе по механике сплошных сред» (Пермь, 2009), Всероссийской конференции с международным участием, посвященной 60-летию Института гидродинамики им. М.А.Лаврентьева СО РАН (Новосибирск, 2017), семинарах Института машиноведения и металлургии ДВО РАН (Комсомольск на Амуре, 2015, 2016, 2017, 2018), региональном START UP- 2016 по направлению "Промышленные технологии и материалы".

Личный вклад заключается в планировании и анализе всех экспериментальных исследований по условиям синтеза и свойств нового функционального материала, разработка математических моделей и численных методов деформационных особенностей поведения стеклометаллокомпозита при температурной обработке. Проведение и анализ микроскопических исследований СМК, в том числе исследование микротвердости в зоне соединения на основе CH-1 и стали 20 выполнены совместно с Морковиным А.В., на основе С-49 и Ст3сп с Гридасовой Е.А., проведение и анализ исследований поведения стеклометаллокомпозита при одноосном растяжении, сжатии и изгибе совместно с Морковины А.В., при кручении совместно с Гридасовой E.A., многоцикловом растяжении совместно с Ф. Вальтером при одноосном

6

(Дортмундский Технический университет, Германия), разработка численного метода для задачи о фазовом переходе при плавлении (кристаллизации) в металлических слоях совместно с Пестовым К.Н., проведение и анализ экспериментальных исследований по термостойкости совместно с Солоненко Э.П. и Барботько М.В, алгоритм вычисления релаксации напряжений в плоском спае и стеклянных покрытиях на упругих подложках совместно с Солоненко Э.П.

В научном руководстве диссертациями:

1) Пестова К.Н. «Эволюция температурных напряжений как следствие процесса остывания и консолидации расплава при формировании слоистых материалов». Диссертация на соискание степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04- механика деформируемого твердого тела. Владивосток, ИАПУ ДВО РАН, 2012.

2) Гридасовой Е.А. «Повышение прочностных свойств стекла в результате металлизации методом диффузионной сварки». Диссертация на соискание степени кандидата технических наук по специальности 01.02.04- механика деформируемого твердого тела. Комсомольск-на-Амуре, КНАГТУ, 2013.

3) Солоненко Э.П. «Моделирование напряженного состояния стеклометаллокомпозитных материалов при температурной обработке». Диссертация на соискание степени кандидата физикоматематических наук по специальности 01.02.04- механика деформируемого твердого тела. Комсомольск-на-Амуре, КНАГТУ, 2017.

4) Морковина А.В. «Структурно-деформационные процессы в зоне соединения стекла и стали при получении стеклометаллокомпозита». Диссертация на соискание степени кандидата технических наук по специальности 01.02.04- механика деформируемого твердого тела. Комсомольск-на-Амуре, КНАГТУ, 2018.

Публикации. Основные материалы диссертации представлены в 17 публикациях журналов перечня ВАК, 2 монографиях, 1 учебном пособии и 7 публикациях из Web of Science или Scopus. Полученные оригинальные результаты защищены 4 патентами на изобретение РФ.

Работа выполнена при поддержке научных программ: грант Министерства образования и науки РФ соглашение № 14.А18.21.0383, № 14.А18.21.0353 (2013-2014 гг.), Научный фонд ДВФУ Соглашение № 12-02-13006-м-14/13 (2013-2014), ФЦП Соглашение № 14.575.21.0009 УНИ RFMEFI57514X0009 (2014-2015 гг.), грант Минобрнауки №5.2535.2014К (2015-2016 гг.), грант Миностерства науки и высшего образования РФ №14.584.21.0034 УНИ RFMEFI58418X0034 (2019-2021 гг.), РФФИ Договор № 19-33-90200/19 (2019-2021 гг.).

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы, содержащего 290 наименований. Текст работы изложен на 337 страницах. Диссертация содержит 221 рисунок и 51 таблицу.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность и степень разработанности темы диссертации, определены цель и основные задачи работы, отражена научная новизна, теоретическая и практическая значимость. Кратко представлено содержание диссертации по главам.

В первой главе выполнен краткий обзор по методам повышения прочности стекла и обзор по существующим технологиям изготовления стеклометаллокомпозита. Описаны: технологические особенности методов центрифугирования для получения СМК цилиндров; метода пайки (косвенным и индукционным нагревом) для СМК стержней (на основе стекол $CH - 1(73SiO_2 - 9,4B_2O_3 - 5Al_2O_3 - 9,1(Na_2O + K_2O) - 3,5(CaO + MgO))$ и $C49 - 1(67,5SiO_2 - 20,3B_2O_3 - 3,5Al_2O_3 - 8,7Na_2O)$ и сталей Ст3сп и стали 20); оборудование, в том числе специально разработанное и применяемое при изготовлении и изучении свойств экспериментальных образцов СМК (Рисунок 1).



Рисунок 1. Фотографии экспериментальных образцов (ЭО): СМК цилиндр (алюминий В-95алюмосиликатное стекло); СМК цилиндр (В-95 – алюмосиликатное стекло-В-95); СМК стержень (СН-1– сталь 20) – поперечный и продольные срезы, оснастка для изготовления до 10 СМК стержней; секционная камера термической печи (1– ЭО; 2 – секции с нагревательными элементами, 3 – оснастка, передающая нагрузку)

Экспериментально исследована и отработана технология получения соединений стекла и стали методом пайки в окислительной среде без использования обычных приемов хромирования, серебрения и омеднения. Выделены и обоснованы три основных метода, используемых при обработке поверхности стекла и стали для получения их прочного адгезионного соединения: ХО только механическая очистка внутренней поверхности стальных трубок от продуктов окисления и обезжиривание поверхностей стали и стекла спиртом; ХО – после очистки и обезжиривания внутренняя поверхность стали обрабатывается последовательно азотной кислотой, дистиллированной водой и изопропиловым спиртом; *ХО&В* - дополнительно к *ХО* внутренняя поверхность стальной трубки в горячем состоянии обрабатывается припоем на основе тетрабората натрия и борной кислоты. Структура зоны соединения СН-1-сталь 20 (С49-1 – ст3сп) была исследована методом сканирующей электронной микроскопии на CEM HitachiS-3400N в режиме отраженных электронов (BSECOMP) при различных увеличениях (в режиме 20 kV, 1^{-10⁻⁸} A), элементный состав определялся методом энергодисперсионного рентгенофлуоресцентного спектрального анализа (EDS) при линейном сканировании и измерении в отдельных точках (погрешность определения 1% (относительная доля), предел обнаружения – 0,005% по массе, пространственное разрешение ограничено ≈ 1 мкм). Получен массив экспериментальных данных по структуре в зоне соединения: фотографии фрагментов структуры при разном увеличении (Рисунок 2); данные об условном среднем процентном содержании элементов при линейном сканировании и измерениях в отдельных точках.

Задача об изменении структуры в многокомпонентных стеклах при введении оксидов железа (FeO, Fe_2O_3) является перспективной и малоизученной в области физической химии. Экспериментальные исследования по формированию структуры в железосодержащих трехкомпонентных стеклах отражены в работах Павлушкина Н.М., Евстропьева К.С., Mandal A.K., Корниловой Э.Е. и Конон М.Ю. Анализ экспериментальных результатов позволил объяснить образование разных структур в зоне соединения стекло-сталь при разных методах дополнительной обработки (Рисунок 2).



Рисунок 2. Микрофотографии зоны соединения (стекло CH-1 и сталь 20, CEM HitachiS-3400N) при $T_{max} = 800$ °C и выдержке для: $\overline{XO} - 120$ мин; XO и XO&B - 100 мин (слева) и 60 мин (справа)

По существу, можно выделить два характерных направления при формировании зоны соединения. В случае \overline{XO} и XO: слой оксидов на стальной поверхности смачивается стеклом и, взаимодействуя, образует две фазы: прилежащую к металлу кристаллическую фазу шириной 2 - 7 мкм и аморфную фазу железосодержащего стекла шириной 30-100 мкм. Для \overline{XO} характерна неоднородная зона соединения, содержащая отслоения, трещины, конгломераты или слои разных окислов железа. При обработке XO&B связанная стекловидная пленка с растворенным окислом железа (*FeO*) взаимодействует со стеклом, «уходит» и на границе спая становится видна чистая сталь (без оксидов) (Рисунок 2, фотографии XO&B с разным временем выдержки 60 мин – справа и 100 мин – слева). Далее в процессе диффузии в стекле равномерно по контуру зоны формируется аморфный слой железосодержащего стекла шириной до 200 мкм, в зависимости от времени выдержки. Кристаллических фаз ни при \overline{XO} , ни при XO не наблюдается.

Для оптимизации ширины диффузионной зоны методом полного факторного анализа исследованы экспериментальные данные, в качестве факторов оптимизации рассмотрены температура, время выдержки и тип обработки (\overline{XO} , XO, XO&B). Получены три адекватные регрессионные модели, для каждой построены матрицы планирования эксперимента. Доказано влияние трех факторов технологии – температуры, времени выдержки и типа обработки и установлены пределы изменения: 1) тип обработки соединяемых поверхностей – XO и XO&B; 2) температура выдержки (T_{max}) – 750 и 800 °C; 3) время выдержки – 60, 80 и 100 мин.

В конце главы обозначены проблемы, на решение которых направленно исследование и поставлены основные задачи.

Во второй главе рассмотрена проблема возможности практического применения СМК стержней как армирующих элементов для бетонных конструкций. В п. 2.1 выполнено

математическое, а в **п.2.2** экспериментальное моделирование механического проведения балок и плит, армированных СМК арматурой. **В п.2.3** проведен анализ стоимости СМК арматуры, обоснована ее экономическая эффективность и определены перспективные направления исследований.

При математическом моделировании в п.2.1 элементов бетонных конструкций армированных СМК стержнями был использован подход мезомеханики для нахождения эффективных характеристик материала, разработанный Паниным В.Е. и основанный на поэтапном моделировании композиционных конструкций. На І-м уровне представительный (повторяющийся характерный и минимальный по размеру) объем композита схематизировался в виде структурного элемента (ячейки периодичности) и моделировались механические свойства ячеек периодичности, которые для бетона, армированного СМК, были определены в виде кубиков, с одним (продольное армирование, тип А) и двумя стержнями (крестообразное армирование, тип В). Механические свойства ячеек периодичности определялись из численного моделирования одноосного растяжения И чистого сдвига В конечно-элементном методе программной среды ANSYS Workbench в области упругого деформирования при нагрузках, не превышающих 5% от предела прочности бетона определенной марки, выбранной для расчетов и экспериментальных исследований. Определенные на 1-ом уровне эффективные механические характеристики использовались в качестве параметров при моделировании на 2-ом масштабном уровне. В программной среде ANSYS рассчитывалось напряженно-деформированное состояние балочной сваи и плиты для разных вариантов закрепления и приложения нагрузки и для двух вариантов армирования бетона: СМК и сталью. При численных расчетах определенных строительных конструкций: свай под фундаментом и плотины замечено, что наиболее эффективно армирование СМК в узлах бетонных конструкций, работающих на сжатие, в них сжимающие напряжения в среднем более чем на 20% меньше, чем для аналогичных бетонных изделий, армированных сталью. Деформации балочных свай под фундаментом, работающих на сжатие, при армировании бетона СМК арматурой, оказались незначительно выше, чем в конструкциях из железобетона, при этом максимальные напряжения меньше, чем у железобетона на 17,3%, а минимальные меньше на 32,8 %. При моделировании механического поведения балок на изгиб при разных условиях приложения нагрузки характер распределения напряжений и перемещений практически совпадает для железобетона и бетона, армированного СМК, максимальные значения напряжений различаются на 1-5 %, что позволяет предположить, что замена стальной арматуры на СМК не приводит к ухудшению прочностных характеристик этого вида бетонных изделий.

В п.2.2 приведены результаты экспериментальных исследований деформирования бетонных балок и плит, армированных СМК. Эксперименты проводились на УИМ Amsler (1925) со специально спроектированной оснасткой, имитирующей защемление и шарнирное опирание. Деформации и перемещения определялись стандартными методами: измерительная система состояла из индикатора часового типа ИЧ-10 и измерительно-управляющего устройства (УИУ 2002) для измерения относительного сопротивления используемых тензорезисторов КФ-4/КФ-5 (тип 5П1-20-200-Б12) с номинальным сопротивлением 200 ± 0.2 Ом и коэффициентом чувствительности 2.18. При исследовании поведения бетонной балки, армированной СМК (тип А), один конец экспериментального образца устанавливался между верхней и нижней частью захвата, имитирующего защемление, а второй опирался на подвижную опору с соблюдением параллельности относительно опорной плоскости Amsler. Осуществлялась ступенчатая с повышением нагрузка до достижения предельного состояния (предельно допустимого прогиба 4,16 · 10⁻³ м). Нагрузка, при которой появлялась первая трещина, в среднем составила 56% от среднего значения максимальной нагрузки равной 7,34 кН. Моделирование в ANSYS с использованием эффективных характеристик балки, армированной СМК (тип А), с граничными условиями таким же типом приложения нагрузки, как в эксперименте области с максимальными интенсивностями напряжений, полностью соответствуют экспериментальным данным по

выявлению первых дефектов в балке. Экспериментальные исследования плит с шарнирноподвижной опорой и сосредоточенной нагрузкой по центру плиты поводились с последовательно увеличивающейся нагрузкой от начального значения в 6,3 кН с шагом 0,5 кН до допустимых предельных значений прогибов. Экспериментально определенная нагрузка, при которой бетонная армированная СМК, теряет несущую способность, плита, составила около 46,6 кН. Моделирование в ANSYS проводилось с использованием эффективных характеристик плиты, армированной СМК (тип Б), граничными условиями как в эксперименте, в упругой области до 9,02 кН, при которой появляются первые, визуально определяемые, трещины. нагрузки Выявленные области с максимальными интенсивностями напряжений соответствуют экспериментальным областям с первыми дефектами.

В п.2.3 показано, что экономически выгодно внедрять в строительную отрасль новую композитную арматуру из СМК при ее стоимости как минимум на 15% ниже традиционной стальной, тогда стоимость армированного ею бетона может дать 5%—ное уменьшение. Анализ стоимости композитной арматуры СМК позволил сформулировать актуальные исследовательские задачи, среди которых: исследование по расширению диапазона стекол и стали для СМК стержней; разработка технологии, позволяющей получать длинные образцы до 12 метров; получение ребер для сцепления с бетоном на СМК стержнях.

Технический результат исследований и экономическая значимость отмечены первым местом на региональном отборе START UP-2016 по направлению "Промышленные технологии и материалы".

В третьей главе приведены результаты комплексных экспериментальных исследований свойств СМК стержней в: п.3.1 – микротвердости и модуля упругости; п.3.2 – при одноосном растяжении и сжатии, кручении и сложном изгибе; п.3.3 – при циклических нагрузках и ударной вязкости; п.3.4 – коррозионной и п. 3.5 – термической стойкости, износа при абразивном трении в агрессивной среде. Поскольку материал является новым и конструкционным, даже стандартные методики исследования механических свойств необходимо было адаптировать и уточнять в технической части и теоретических расчетах.

Активные экспериментальные исследования микротвердости и механического поведения одноосном растяжении одновременно с экспериментальными исследованиями при технологических режимов и контроле качества зоны соединения позволили оптимизировать технологические режимы. При анализе значений в п.3.1 микротвердости в стекле, стали и зоне их соединения по всем режимам выделен только режим: *ХО&В*, *T*_{max} = 800 °С и 100 мин для пары сталь 20 и CH-1. Замечено, что значения микротвердости в образцах, полученных по этому режиму, на 20% больше, чем для исходного стекла CH-1. Измерения модуля упругости показали, что в стекле, зоне соединения и стали его изменение незначительно (< 5%) и он практически совпадает с макроскопическим модулем Юнга для стекла СН-1 и стали 20 (Таблица 1).

Sono cocounciliar (All (Similar					
	CH-1	Сталь 20	СМК (СН-1-сталь 20)		
			стекло	3C	сталь
HV	509	150	601	549	155
Е, ГПа	71	210	75	78	210

Таблица 1. Средние значения микротвердости и модуль упругости по толщине стекла, стали и зоны соединения (ДМ «SHIMADZU DUH-211S»)

При одноосном растяжении в **п.3.2** установлено, что условная диаграмма для образцов стеклометаллокомпозита аналогична диаграмме деформирования металлов при одноосном растяжении, в месте разрыва замечено формирование незначительной шейки, при разрыве отделяется тонкий стеклянный диск в месте разрыва, в целом по образующей стержня формируется равномерная дефектная слоистая структура (Рисунок 3в). Выделены два режима с лучшими прочностными характеристиками (Рисунок 3а): 1 - XO, $T_{max} = 800$ °C и 100 мин и

2 - XO&B, $T_{max} = 800$ °C и 100 мин; с пределом пропорциональности $\sigma_{np} = 118 \div 122$ МПа, с небольшой пилообразной площадкой по типу площадки текучести с условным пределом текучести $\sigma_T = 130 \div 142$ МПа, нелинейного упрочнения и разрушения после достижения максимума, временное сопротивление разрыву $\sigma_B = 164 \div 216$ МПа. Дальнейшие исследования свойств стеклометаллокомпозита проводились для экспериментальных образцов, полученных по режимам 1 и 2. При одноосном сжатии СМК образцов условная диаграмма аналогична диаграмма для хрупких материалов, $\sigma_B = 437 \div 500$ МПа (Рисунок 3 б), замечено, что после прохождения предельной точки и снятия нагрузки, геометрические характеристики образцов практически не изменяются и не нарушается целостность образца (Рисунок 3 г).

Исследования проводились на УИМ Shimadzu AG-X PL US: при растяжении со специально спроектированными захватами (а) и стандартными (б) для образцов следующей геометрии: длина (l): (а) - 0,1 м, (б) 0,16 м, диаметр d = 0,01 м; при сжатии с использованием опорных плит со сферической посадкой Shimadzu с размерами образцов l = 0,03 м и d = 0,01 м; со скоростью нагружения во всех испытаниях $2 \cdot 10^{-5}$ м/с.

Испытания на изгиб проводились для разных условий закрепления образцов: (а) классического трехточечного изгиба с шарнирным опиранием по краям и приложением нагрузки по центру (УИМ Shimadzu AG-X PL US) и (б) изгиба с защемлением и шарнирным опиранием (УИМ Shoper) для образцов с размерами: l = 0,1 м, d (а)- 0,01 м, (б)- 0,02 м, со скоростью нагружения $2 \cdot 10^{-5}$ м/с. Условные диаграммы качественно совпадают с диаграммами изгиба стальных стержней. В отличие от стальных в СМК образцах формируется разрыв в месте приложения нагрузки (Рисунок 3 д). Минимальное значение нагрузки, при которой акустически фиксировалось разрушение стекла, составило в среднем при (а) 1,1 кН и (б) 0,8 кН.

Испытание на кручение проводились на ИМ КМ-50 с предельным крутящим моментом 490 (H · м) с использованием специально разработанных захватов и торсиометра, адаптированных к геометрии экспериментальных образцов СМК: l = 0,105 м и d = 0,01 м при ступенчатом нагружении крутящим моментом с переменными шагами от $1 \div 2,5$ до 10 (H · м), среднее значение модуля сдвига составило $0,56 \cdot 10^5$ МПа.



Рисунок 3. Результаты исследований механических свойств: а) условная диаграмма растяжения; б) условная диаграмма сжатия. Фотографии экспериментальных образцов: в) после разрушения при одноосном растяжении; г) при максимальных напряжениях при одноосном сжатии; д) после разрушения при изгибе с защемлением

В **п.3.3** оценка предела усталости стеклометаллокомпозита была проведена на основе оценки амплитуды пластической деформации. Образцы стеклометаллокомпозита, полученные по режиму 1, проходили циклы на растяжение-сжатие с переменной амплитудой нагружения на сервогидравлической машине Shimadzu, 20 kN, EHF-LV20 (Рисунок 4).



Рисунок 4. Результаты ступенчатого испытания на увеличение нагрузки и кривая Веллера (s-n диаграмма)

Полученные характеристики позволили заключить, что примененный метод является актуальным для стеклометаллокомпозита, максимальная амплитуда напряжений составила 127 МПа (Рисунок 4), образец с амплитудой нагрузки 64 МПа достиг предельного числа циклов без разрушения, модифицированное уравнение Баскина имеет вид

 $\sigma_{\rm a} = 245 \cdot (N_f)^{-0.09}, N_f$ – число циклов до разрушения.

В результате стандартных испытаний на ударную вязкость образцов на основе Ст3сп и С49-1 на копре МК-30 при комнатной температуре значения ударной вязкости лежат в интервале 18-19 кН/м и существенно меньше для Ст3сп.

Электрохимический механизм протекания коррозионных процессов исследовался в **п.3.4** по методике гравиметрических коррозионных испытаний металлов (ГОСТ 9.308.85) в трех растворах электролита: (a) 5% (*NaCl*), (б) 0,3% (*NaCl*) и «ускоренном» (в) 0,4%(*NaCl*) + 0,6% (*CuSO*₄) при постоянной температуре $T = (20 \pm 2)$ °C, для образцов на основе CH-1 и стали 20 с теми же геометрическими размерами, что и при одноосном сжатии. Показатели коррозии и коррозионной стойкости определялись сплошной коррозией с контролем потери массы на единицу площади и скорости ее убывания. Замечено, что скорость коррозии постоянна, не зависит от начальной массы образцов (8,242 ± 0,001 г) и составляет в среднем для: (a) 8,2 · 10⁻⁵ г/ч; (b) 6,9 · 10⁻⁵ г/ч; (в) 3,89 · 10⁻² г/ч, при (в) скорость убыли массы в стальном образце вдвое выше (Рисунок 5 а). В растворе (в) в течение 5-7 дней металлическая оболочка полностью «снимается» и появляется возможность визуального исследования технологических дефектов на поверхности и по объему стеклянного сердечника (Рисунок 5 а); замечено, что после удаления металлического слоя возникают и начинают довольно быстро, в течение 2-3 часов, распространяться дефекты, формируя визуально наблюдаемую блочную структуру разрушения в стекле.

В п.3.5 проведены результаты единичных экспериментов по абразивному износу в агрессивной среде на специально спроектированной установке в растворе электролита 0,03 $\%(NaCl) + 0,06\% (CuSO_4)$, истирание проводилось при вращении со скоростью 895 об/мин и соприкосновении с платформой с абразивом (шкурка с показателем истирания эталона в 1,20±0,02 мм³/м), убыль массы контролировалась с шагом в 5,37 · 10⁴ об. Замечено, что скорость убыли массы уменьшается при приближении к стеклянному сердечнику (Рисунок 5 б).

В п.3.6 теоретическая оценка термостойкости проводилась в рамках разработанного в работах Куляминой Л.Л., Жорник А.И. и Жорник В.А подхода оценки осевых напряжений при исследованиях термостойкости стеклянных покрытий на внутренней поверхности металлических труб, полученных баллонным методом. Экспериментальные исследования термостойкости СМК проводились методом косвенного нагрева и резкого охлаждения со скоростью (20 ± 5) °C/ мин при ступенчатом повышении температуры и циклическом нагружении, контролировалось накопление дефектов и снижение временного сопротивления разрыву при одноосном растяжении; при 1-2 циклах нагружения величина термической стойкости при 1 цикле оказалось на 20-25 % выше. На Рисунке 6 а, б приведены результаты поведения дефектов при нагреве до теоретической величины термостойкости 598±20°C.

Проводились единичные эксперименты по быстрому охлаждению образцов СМК от 800 °С со скоростью 90 °С/мин. Кроме заметного увеличения предела временного сопротивления разрыву, максимальное значение которого составило 270 МПа, замечен специфический характер разрушения образца при одноосном растяжении: в месте разрыва не отделяется стеклянный диск, поперечный срез имеет разрушенный стеклянный слой, примыкающий к металлической оболочке, и стеклянный сердечник по центру без дефектов (Рисунок 6 в).

Результат представляет интерес для развития технологии получения СМК и теоретического описания разрушения стекла при сложном напряженном состоянии.



Рисунок 5. а) «ускоренная» коррозия фотографии образцов для сравнения: СМК до исследований, после полного снятия металлического слоя и образец из стали 20; б) скорость изменения массы при абразивном износе в агрессивной среде



Рисунок 6. Фотография срезов экспериментальных образцов при исследованиях на термостойкость: а) охлаждение от 650 °C, 1 цикл; б) охлаждение от 600 °C, 5 циклов; в) после разрушения при одноосном растяжении после быстрого охлаждения от 800 °C

В следующих главах предложены математические модели и методы их решения для разных задач процесса получения стеклометаллокомпозитов.

B п. 4.1 четвертой главы рассмотрена задача о моделировании эволюции термонапряженного состояния для двух- и трехслойного цилиндрического СМК при получении методом центрифугирования с учетом проплавления и кристаллизации внешних металлических слоев (Рисунок 1). Задача формулируется в несвязной постановке, считается, что движение фронта фазового перехода 1 рода (ФП) является следствием изменения температуры и скорости движения фронта < 1 м/с. Изменение температуры и структуры приводит к формированию специфического напряженно-деформированного состояния на границах контакта разных материалов и разных фаз. Предлагается рассматривать эволюцию фронта ФП в рамках нестационарной задачи теплопроводности неизвестной энергетической функцией «источникового» с типа, характеризующей движение границы фронта ФП при фиксированной температуре. Условие Стефана следует из этого уравнения, которое по существу является развитием подхода Тихонова А.Н. и Самарского А.А., предлагающих скрытую теплоту фазового перехода, сосредоточенно выделяющуюся на поверхности раздела фаз, характеризовать вводимым понятием «эффективной» теплоемкости. В слабой формулировке предлагаемое уравнение может быть записано в виде

$$\rho(M,T)c(M,T)(1-\gamma(M,T))\frac{\partial T(M,t)}{\partial t} = div(\Lambda(M,T)gradT(M,t)) - \gamma(M,T)\frac{\partial Q(M,t)}{\partial t}, \quad (1)$$

$$\gamma(M,T) = \begin{cases}
1, T = T_k^* & \Pi - \rho_k^+ Q_k^* < \bar{Q}(M,t) < \rho_k^- Q_k^*, & M \in \Omega_k, \\
0, T \neq T_k^* & \Pi\Pi & \bar{Q} = \rho_k^- Q_k^*, & \Pi\Pi & \bar{Q} = -\rho_k^+ Q, & M \in \Omega_k, \\
Q(M,t) = \begin{cases}
\bar{Q}(M,t), & \gamma(M,T) = 1, \\
0, & \gamma(M,T) = 0, \\
c(M,T), \rho(M,T) = \begin{cases}
c_k^+(T), & \rho_k^+(T), & ес\Pi\Pi & T < T_k^* & \Pi & M \in \Omega_k, \\
c_k^-(T), & \rho_k^-(T), & ес\Pi\Pi & T > T_k^* & \Pi & M \in \Omega_k, \\
\Lambda_k^+, & еС\Pi\Pi & T \le T_k^* - T_k', & M \in \Omega_k, \\
\Lambda_k^-, & еС\Pi\Pi & T \ge T_k^* + T_k', & M \in \Omega_k, \\
\Lambda_k^-, & еС\Pi\Pi & T \ge T_k^* + T_k', & M \in \Omega_k,
\end{cases}$$

здесь Ω_k – объем, T_k^* – температура $\Phi\Pi$, Q_k^* – теплота $\Phi\Pi$ k –ого слоя, индексами « +» и « –» отмечены разные фазы, в рассматриваемых процессах – жидкая и твердая фазы, соответственно, функции γ и Q – обобщенные функции, которые позволяют учесть непрерывное накопление (выделение) энергии, затрачиваемой (или выделяемой) при $\Phi\Pi$. Дополняя уравнение (1) начальными и краевыми условиями на свободных поверхностях и на сопряжении слоев, получаем замкнутую краевую задачу.

Предложенный для численной реализации модели конечно-разностный метод является симбиозом сквозных методов и метода ловли фронта в узел сетки. Сетка по времени динамически адаптируется к процессу ФП, так что Δ_t – основной шаг по времени, пока на *j* –ом временном слое $T^j < T_k^* - \delta' \, \text{или} \, T^j > T_k^* + \delta'$ или пока при $T_k^* - \delta' \leq T^j \leq T_k^* + \delta'$ выполняется $-\rho^+ Q_k^* - \delta'' \leq \overline{Q}^j \leq \rho^+ Q_k^* + \delta''$; если выполняются условия $-\rho^+ Q_k^* - \delta'' \geq \overline{Q}^j \, \text{или} \, \overline{Q}^j \geq \rho^+ Q_k^* + \delta''$ при $T_k^* - \delta' \leq T^j \leq T_k^* + \delta'$, тогда начинаются итерации с уменьшающимся шагом по времени, например, как $\frac{\Delta_t}{2^s}$, здесь *s* –номер итерации. Если \overline{Q}^j попадает в интервал $[-\rho^+ Q_k^* - \delta'', -\rho^+ Q_k^* + \delta'']$ или $[\rho^- Q_k^* - \delta'', \rho^- Q_k^* + \delta'']$, то изменяется положение границы ФП и

итерации прекращаются. Метод показал хорошую сходимость к автомодельному решению задачи Стефана, максимальная относительная погрешность при $\Delta_t = 10^{-2}$ и $\Delta_t = 5 \cdot 10^{-3}$ меньше 4% и 2 %, соответственно. Кроме рассматриваемой конкретной технологической задачи предлагаемая модель и метод доказали свою эффективность при решении задач с заранее неизвестным количеством фронтов; для областей произвольной геометрии; для задач со сложными граничными условиями, например, с периодически изменяющейся температурой среды, с дополнительными внутренними источниками, например, при импульсном нагреве и для анизотропных материалов.

Напряженно-деформированное состояние тела формируется как следствие неоднородного изменения температуры, скачка коэффициента линейного температурного расширения разных материалов, модулей упругости и ФП в отдельных слоях. Краевая задача рассматривается в квазистатическом приближении. Ввиду движения границы фронта ФП и пластического деформирования отдельных слоев задача формулируется как эволюционная краевая задача для растущего тела (Манжиров А.В., Аратюнян Н.Х., Быковцев Г.И.). На границе роста новой твердой фазы, ограниченной материалами в разных фазах с отличающимися механическими и теплофизическими характеристиками, рассмотрено классическое условие идеального контакта (равенство перемещений и напряжений в направлении нормали к границе ФП), учитывающее в том числе влияние заранее неизвестного давления со стороны жидкой фазы, для которой принята гипотеза о малых деформациях. Уравнения состояния в разных фазах записаны в виде

$$\sigma_{ij} = \begin{cases} 2G_k^- \left(\varepsilon_{ij}^e + \left(\frac{3K_k^-}{2G_k^-} - 1\right)\varepsilon^e \delta_{ij}\right), M \in \Omega_k^-, \\ 3K_k^+ \varepsilon^e \delta_{ij}, & M \in \Omega_k^+, \end{cases}$$

здесь *G* и *K* — упругий модуль сдвига Кулона и объемный модуль упругости Бриджмена соответствующей фазы и слоя, $\varepsilon^e = \frac{1}{3} \varepsilon_{ii}^e$. Полные деформации в каждой фазе (для задачи о росте кристаллической фазы из расплава) представлены как

$$\varepsilon_{ij} = \begin{cases} \varepsilon_{ij}^{e} + \varepsilon_{ij}^{p} + \varepsilon_{ij}^{T} + \varepsilon_{ij}^{s} \delta(t - t_{*}), & M \in \Omega_{k}^{-} \\ \varepsilon_{ij}^{e} + \varepsilon_{ij}^{T}, & M \in \Omega_{k}^{+}, \end{cases}$$

индексами *е,р,Т,s* обозначены упругие, пластические, температурные и структурные деформации, соответственно, t_* – время зарождения новой фазы, $\delta(t - t_*)$ – дельта-функция Дирака, $\varepsilon_{ij}^T = \alpha_k^{\pm}(T - T_0)\delta_{ij}$ (закон Дюамеля-Неймана), δ_{ij} – символ Кронекера. Пластические деформации считались малыми и описывались в рамках теории пластического неизотермического течения для идеального упругопластического материала без упрочнения. Уравнение поверхности текучести было задано как уравнение Мизеса с пределом текучести, зависящим от температуры. Структурная деформация возникает в момент зарождения новой фазы малого объема и является следствием сохранения массы. В рамках гипотезы ее изотропного характера, при кристаллизации

из расплава предлагается записать ее в виде: $\varepsilon_{ij}^{s} = \frac{1}{3} \left(\frac{\rho_{k}}{\rho_{k}} - 1 \right) \delta_{ij}$, здесь ρ – плотность соответствующего слоя и фазы. Задача решалась численно в конечных приращениях по времени с

привлечением итерационного метода дополнительных деформаций для определения приращений пластических деформаций. На Рисунке 7 представлены результаты моделирования при остывании трехслойной оболочки стеклометаллокомпозита (алюминий-стеклоцилиндрической ИЗ алюминий) от температуры 1,57^{*} после формования методом центрифугирования. Данные по конкретным технологическим параметрам, геометрии и свойствам материалов брались из работ Гончарука В.К. и Пикуля В.В. Показано, что при заданных геометрических и технологических экспериментальных параметрах образцов СМК цилиндров, полученных методом центрифугирования, металлические алюминиевые оболочки проплавляются полностью.



Рисунок 7. Технологические (слева) напряжения и положение границы кристаллизации в СМК цилиндре с внешними кристаллизующимися слоями (1) и (3) (в момент, когда слои полностью кристаллизовались (≈5,5 мин от начала охлаждения)) и остаточные напряжения (справа)

Напряженно-деформированное состояние определялось при остывании, с учетом кристаллизации внешних слоев, в металлических слоях развивается пластическое течение, в стеклянном слое формируются значительные растягивающие напряжения, что объясняет не только дефекты, визуально наблюдаемые в экспериментальные образцах со стороны внутреннего металлического слоя, но и их низкую прочность.

В п.4.2 рассматривалась задача о моделировании закономерностей образования СМК стержней и цилиндров методом запрессовки при нагреве вязкой стекломассы в жесткую трубку или между жесткими оболочками до образования полного контакта. Математическая модель рассматривалась с позиций гидромеханической аналогии. Предлагалось уточнение задачи Рейнольдса о сжатии вязкой круглой пластины (толщины h_0) с изменяющейся температурой (*T*) между двумя жесткими пластинами (радиуса *R*), из которых нижняя неподвижна, а к верхней прикладывается постоянная нагрузка *Q*, которая заставляет ее перемещаться со скоростью $\vartheta(t)$, при этом изменяется толщина вязкой пластины h(t). Получено нелинейное интегральное уравнение относительно коэффициента вязкости η

$$\int_{0}^{t_{\phi}} \frac{1}{\eta(t)} dt = f, \qquad f = \frac{3\pi R^4}{4Q} \left(\frac{1}{h_{\phi}^2} - \frac{1}{h_0^2} \right), \tag{2}$$

здесь t_{ϕ} – время образования физического контакта, за которое вязкая пластина заполняет весь свободный объем (ее толщина при этом принимает значение h_{ϕ}). При теоретическом определении t_{ϕ} приближение коэффициента вязкости выполнялось функцией Аррениусовского типа в виде формулы Фогеля-Фулчера-Таммана (ФФТ):

$$\eta(T) = \eta_0 \exp\left(\frac{B}{T - T_0}\right).$$

Параметры в формуле определялись через связь с параметрами в эквивалентной формуле Вильямса–Ландела-Ферри (ВЛФ)

$$lna_T = -C_1 \frac{T - T_g}{T - T_g + C_2}, a_T = \frac{\tau(T)}{\tau(T_g)} = \frac{\eta(T)}{\eta(T_g)}$$

здесь T_g –температура стеклования, a_T –относительное время релаксации (относительная вязкость), $B, C_1, C_2, T_0 = 3$ мпирические параметры, связанные следующими соотношениями $B = C_1C_2, T_0 = T_g - C_2$, количественные оценки параметров подбирались для определенного типа стекол из работ Бартенева Г.М. и Сандитова Д.С. Аналитическое решение уравнения (2) получено при приближении показателя степени в ФФТ линейной частью ряда Тейлора, при линейном изменении температуры в интервале $(T_p, T_s), T_p$ –температура, при которой возможна деформация стекла под действием давления, T_s –температура размягчения, $\eta_p (\approx 10^8), \eta_s (\approx 10^{5.5})$ – соответствующие им вязкости. Линии уровня поверхности $\Phi(t_{\phi}, \eta_p, \eta_s) = f$ характеризуют: тип стекол, у которых (η_p, η_s) принадлежат определенной линии при $t_{\phi} = const$ (Рисунок 8 а); для $\eta_p = const$ стекла, у которых для разных $\eta_s = const$ (Рисунок 8 б), и стекла, у которых значения t_{ϕ} близки для разных η_p при $\eta_s = const$ (Рисунок 8 в). При анализе влияния скорости изменения температуры (q) и Q на t_{ϕ} для С49-1 замечено, что при $q \le 15$ °С/мин и $Q \le 10$ кПа образование контакта происходит в интервале стеклования до T_s , а при $q \ge 15$ °С/мин и Q > 10

Для апробации модели проведена серия экспериментальных исследований по специально разработанной методике на стенде, построенном по аналогам вискозиметра грузового типа. Определялась величина усадки $h^{\text{экс}}$ и t_{ϕ} , за которое происходит заполнение стеклом свободного объема V^{экс} в металлическом цилиндре (Рисунок 9 а). Введены масштабирующие коэффициенты, характеризующие геометрию перехода от экспериментальных к теоретическим значениям. Проведены две серии экспериментов для образцов разной начальной высоты $h_0^{\text{экс}} = 20$ и 15 $\cdot 10^{-3}$ м (Рисунок 9 б). Отклонения экспериментально определенных значений t_{ϕ} и $h^{3\kappa c}$ от теоретических, полученных при решении (2), не превышали 8% и 3%, соответственно. При проведении экспериментальных исследований был зафиксирован плавный перегиб при измерении положительных приращений перемещений в стекле до максимального значения, после которого перемещения изменяли знак на противоположный, границы выделяемого интервала по температуре совпадают с интервалом стеклования используемого в эксперименте стекла. Результаты были сопоставлены с расчетными значениями коэффициента линейного температурного расширения в стекле в интервале стеклования (п. 5.3) (Рисунок 9 в).



Рисунок 8. Линии уровня: a) t_{ϕ} , c: (1)1225, (2)1302, (3)1379, (4)1456, (5)1533, (6)1610, (7)1687, (8)1764, (9)1841, (10)1918; б) $\eta_s \cdot 10^{-4}$, Па · с: (1)6.5, (2)10, (3)13.5, (4)17, (5)20.5, (6)24, (7)27.5, (8)31, (9)34.5, (10)38; 6) $\eta_p \cdot 10^{-8}$, Па · с: (1)9.5, (2)8.5, (3)7.5, (4)6.5, (5)5.5, (6)4.5, (7)3.5, (8)2.5, (9)1.5, (10)0.5



Рисунок 9. Экспериментальные результаты измерения усадки (высоты) $h^{3\kappa c}$ стеклянного цилиндра: а) схема эксперимента; б) средние $h_0^{3\kappa c}$ значения в двух сериях исследований; в) результаты экспериментальных исследований по усадке (Δ ,+, \Box , \circ) и численной аппроксимации коэффициента линейного температурного расширения (**п.5.3**) (сплошная линия, нагрев со скоростью $q = 10 \, {}^{\circ}C/{}_{\text{МИН}}$)

Перспективным в развитии предложенного интегрального уравнения (2) и экспериментального метода измерения усадки является уточнение параметров в эмпирических формулах ФФТ и ВЛФ, а также метод определения интервала стеклования (δT_g) в предложенной технологии получения СМК.

В п.5.1 пятой главы последовательно рассмотрены и изложены основные особенности и закономерности изменения свойств стеклующихся материалов в интервале стеклования. Стеклование остается нерешенной и актуальной проблемой физики, выделяются два основных теоретических направления его описания: отдельная релаксационная, кинетическая теория стеклования, и развитие подходов в теории фазовых переходов второго рода. В работе обоснован выбор подхода к математическому моделированию структурной и механической релаксации в стеклующихся слоях стеклометаллокомпозита в рамках релаксационной теории стеклования. Перспективность выбранного направления подтверждается многочисленными экспериментальными и теоретическими исследованиями. Активно продолжается разработка и критериальных подходов к описанию стеклования, основы которых заложены в уточнение работах Бартенева Г.М., Ритланда Г.Н, Сандитова Д.С., Волькенштейна М.В. и Птицына О.Б.

В п.5.2 в рамках краткого обзора работ Мазурина О.В., Немилова С.В., Шмельцера Ю.В.П. Дебенедетти П. изложены термодинамические основы стеклования, в том числе И термодинамический смысл «структурной» температуры T_f как внутреннего параметра, характеризующего процесс стеклования. В п.5.3. разработана модель сложного теплообмена в слоистых композитах со стеклующимися слоями с применением модельных представлений Тула-Нарайанасвами-Мазурина-Мойнихана (ТНММ). При нагреве до температуры Т_{тах}, которая может совпадать или быть несколько меньше температуры плавления стекла T₁, и последующем охлаждении изменяются структура и свойства стекла, такой процесс называют стеклованием и он протекает в некотором интервале (T_g^-, T_g^+) , одна из температур, находящаяся в средней части интервала, называется температурой стеклования T_g. Ее положение зависит от скорости нагреваохлаждения, границы интервала стеклования обычно определяют по границам гистерезисной петли, характеризующей, например, изменение энтальпии при равномерном охлаждении и нагреве от равновесного состояния расплава (участок кривой обозначенный *l*) к замороженной структуре (участок кривой, обозначенный g) (Рисунок 10 а). За основной структурный параметр, характеризующий изменение свойств в стеклообразных материалах, принят феноменологический параметр, введенный А. Тулом, «структурная» или «фиктивная» температура T_f , которая в стабилизированном состоянии совпадает с фактической температурой, а в условиях замороженной структуры постоянна. Понятие структурной температуры используется при анализе экспериментальных данных в дифференциально сканирующей калориметрии (ДСК) при определении температуры стеклования T_g как предельной структурной температуры $T_f^* = T_g$, по данным ДСК температура T_f^* «замороженного» состояния стекла определяется как интегральная характеристика кривой теплоемкости с_р

$$\int_{T^+}^{T_f^*} (c_p^l - c_p^g) dT_f = \int_{T^+}^{T^-} (c_p - c_p^g) dT_f$$

здесь $T^+ \gg T_g^+$ – температура за интервалом стеклования, где теплоемкость c_p^l принимает значение, соответствующее равновесному состоянию, а T^- , соответственно, значительно ниже интервала стеклования $T^- \ll T_g^-$, c_p^g – теплоемкость стекла в «замороженном» состоянии. С учетом основного предположения релаксационной теории, что изменения свойств стекла и их скоростей при скачке температуры при стекловании представляет сумму «мгновенного» (g) и «структурного» (релаксационного) (r) изменений, температурные коэффициенты свойства *P* записываются в виде $\beta_g = \frac{\Delta P_g}{\Delta T}$, $\beta_r = \frac{\Delta P_r}{\Delta T}$, $\beta_l = \beta_g + \beta_r$, здесь β_l –равновесный температурный коэффициент свойства *P*. Вклады «*g*» и «*r*» при изменения энтальпии (Рисунок 10 б) позволяют записать удельную теплоемкость для стекла и жидкости в виде

$$c_p^g = \lim_{\substack{\Delta T \to 0 \\ t - t_1 \to 0}} \frac{H - H_0^l}{\Delta T} = \lim_{\Delta T \to 0} \frac{\Delta H_g}{\Delta T}, \qquad c_p^l = \lim_{\substack{\Delta T \to 0 \\ t - t_1 \to \infty}} \frac{H - H_0^l}{\Delta T} = \lim_{\Delta T \to 0} \frac{\Delta H_g + \Delta H_r}{\Delta T},$$

тогда эволюция структурной температуры может быть записана, как

$$\frac{dT_f}{dT} = \frac{c_P(T) - c_p^g(T)}{c_p^l(T) - c_p^g(T)},$$
(3)

при $T \gg T_g^+$, $\frac{dT_f}{dT} = 1$, а при $T \ll T_g^-$, $\frac{dT_f}{dT} = 0$. Уравнение (3) позволяет описать отклонения удельной теплоемкости от стабилизированного (замороженного) и равновесного состояний (выделенные интервалы ΔT_1 и ΔT_2 (Рисунок 10 а), которые являются результатами внутренних экзо- и эндотермических процессов.



Рисунок 10. а) температурная зависимость энтальпии при равномерном нагреве и охлаждении: T_g^- и T_g^+ – границы интервала стеклования, T_g температура стеклования при \uparrow – нагреве и \downarrow – охлаждении (изменение удельной теплоемкости); б) Изменение энтальпии при температурном скачке ΔT

Аналитический вид изменения структурной температуры из основного уравнения релаксационной теории при использовании принципа термореологической простоты и суперпозиции может быть записан в виде

$$T_f = T_0 + \int_0^t (1 - M_r(\xi - \xi)) \frac{dT}{d\xi} d\xi,$$
(4)

где $M_r(\xi) = \exp\left(-\left(\frac{\xi K_r}{\eta_r}\right)^{b_r}\right)$ – эмпирическая функция Кольрауша, ξ – «приведенное» время, связаное с текущим временем и записанное через соотношение ВЛФ в виде $\xi(t) = \int_0^t \frac{\eta_r}{\eta(t)} dt$, где η_r – так называемая вязкость сравнения при температуре T_r , $\eta(t)$ – текущая вязкость, K_r и b_r постоянные, характерные для релаксационных процессов структуры, $0 < b_r < 1$ (характеристика ширины временного интервала релаксационного процесса), для модуля перехода от вязкости к времени релаксации часто используют выражение $K_r = \frac{\eta_r}{\tau_r}$, которое дополняется модельными представлениями для времени релаксации τ_r при T_r и η_r , для промышленных стекол $lgK_r =$ 10.7 ± 0.2 . Приближение вязкости функциями аррениусовского типа в физике и химии стекла привело к исследованиям зависимости вязкости от температуры в координатах $(T^{-1}, lg\eta)$, зависимость вязкости от структурных изменений предложено рассмотреть в виде обобщения зависимости логарифма вязкости от структурной и текущей температуры, предложенной Нарайанасвами О.С. при расчетах отжига «флоат» стекла

$$lg\frac{\eta}{\eta_0} = B_l (T_f^{-1} - T_0^{-1}) + B_g (T^{-1} - T_f^{-1}),$$
(5)

здесь B_l и B_g – характеристики в условиях равновесной и замороженной структур, зависящие от энергии активации в соответствующем состоянии и газовой постоянной, η_0 – вязкость при температуре T_0 – начальной температуре, которая должна отвечать условию $T_{f0} = T_0$, т.е. температуре расплава.

Уравнение для определения удельной теплоемкости записано с учетом (3) в виде

$$c = c_g + (c_l - c_g) \frac{dT_f}{dT}.$$
(6)

Кроме уравнений (3)–(6) математическая модель теплообмена в слоистом стеклометаллокомпозите содержит модифицированное уравнение теплопроводности (1) и дополняется граничными условиями, характеризующими температурный технологический режим. Выделяются три типа граничных условий: I_1 – нагрев, в том числе индукционный; I_2 – выдержка при определенной температуре и I_3 – охлаждение с переменными скоростями

$$\begin{split} \Lambda \frac{\partial T}{\partial \bar{n}} \Big|_{\Gamma} &= \nu (T - T_e) - \sigma \varepsilon (T^4 - T_e^4) + 10^{-3} \cdot H^2 \cdot \sqrt{\rho \mu f}, \quad t \in I_1, \\ T \Big|_{\Gamma} &= T_{max}, \quad t \in I_2, \\ \Lambda \frac{\partial T}{\partial \bar{n}} \Big|_{\Gamma} &= \nu (T - T_e) - \sigma \varepsilon (T^4 - T_e^4), t \in I_3, \end{split}$$
(7)

здесь ν – коэффициент теплопроводности, σ – постоянная Больцмана, ε – коэффициент излучения, Н – амплитуда магнитного поля, ρ – электромагнитное сопротивление нагреваемого тела, μ – коэффициент магнитной проницаемости, f – частота электромагнитного поля, $T_e=T_e(t)$ – температура среды. Задача (1), (3)-(7) является существенно нелинейной, поэтому решалась численно конечно-разностным методом с применением неявных схем и метода последовательных итераций на каждом временном слое. Применение принципа суперпозиции к описанию структурной релаксации может быть описано следующим образом: описание температурных полей в каждой точке стеклообразующей области может быть реализовано как набор постоянных значений T_i^n на малых временных интервалах Δt , при переходе с одного (n-1) интервала на другой n –ый происходит скачок температур ΔT_i^n и фактическая температура T_i^n изменяется мгновенно. При этом T_{fi}^n мгновенно измениться не может, поэтому возникает разность между структурной и фактической температурой $\Delta T_{fi}^n = T_{fi}^n - T_i^n$, которая релаксирует в следующих интервалах, поэтому значение T_{fi}^n равно начальному значению структурной температуры и сумме всех релаксационных процессов от начального до заданного момента времени, релаксация структуры приводит к изменению всех свойств (4)-(6), в том числе и вязкости, которая в свою очередь оказывает влияние на релаксацию структуры

$$T_{fi}^{n+1} = + \sum_{m=1}^{n+1} \left(1 - e^{-\left(\frac{K_r}{\eta_r} (\xi_i^{n+1} - \xi_i^{m-1})\right)^b} \right) (T_i^m - T_i^{m-1}),$$

$$\xi_i^{n+1} = \sum_{m=1}^{n+1} \frac{\eta_r}{\eta_i^{m-1}} \Delta t_m,$$

$$lg \frac{\eta_{ji}^{n+1}}{\eta_0} = B_l \left(\frac{1}{T_{fi}^{n+1}} - \frac{1}{T_0} \right) + B_g \left(\frac{1}{T_i^{n+1}} - \frac{1}{T_{fi}^{n+1}} \right), n = 0, \dots, N.$$

Аппроксимация граничных условий проводилась с учетом сохранения погрешности аппроксимации второго порядка по координатам. В одномерном случае решение системы сеточных уравнений допускает аналитическое решение нелинейного сеточного уравнения для уравнений (7) интервалах I_1 и I_3 . На Рисунке 10 приведены результаты моделирования для данных по стеклу C52-1, близкому к CH-1 (из работ Мазурина О.В. и Старцева Ю.К.), стали 20, $T_0 = 800 \,^{\circ}$ С, $R_1 = 4 \cdot 10^{-3}$ м, $R_2 = 5 \cdot 10^{-3}$ м, $f = 50 \,\Gamma$ ц, $\sigma = 5,670367 \cdot 10^{-8} \,\text{BT} \cdot \text{M}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$, $H = 4 \cdot 10^4 \,\text{A/m}$. В начале охлаждения после нагрева до T_0 структурная температура совпадает с текущей температурой, а далее начинает отставать и стабилизируется, становится постоянной, детальное поведение фиктивной температуры приведено на отдельных графиках (Рисунок 11 а и 6). С увеличением скорости нагрева верхняя температура отжига (принятая как верхняя граница интервала стеклования) смещается в сторону более высоких температур (700,750)°С, в то время как при нагреве с меньшими скоростями она принадлежит интервалу (650,700)°С, нижняя температура отжига (нижняя граница интервала стеклования) для всех режимов практически одинакова и принадлежит интервалу (480,530)°С.

Можно выделить температуру, при которой графики коэффициентов линейного температурного расширения стекла и металла при нагреве и охлаждении имеют точку пересечения (Рисунок 11 *в*), при этой температуре напряжение в соединении меняет знак, режим охлаждения, температуру и время выдержки выбирают так, чтобы напряжения растяжения в стекле как можно больше снизились хотя бы за счет увеличения сжимающих напряжений. При сравнении зависимости изменения температуры и свойств от диаметра стекла (при одинаковом отношении толщины металлической оболочки к толщине стекла), замечено, что для диаметров < $2 \cdot 10^{-2}$ м разница в изменении температуры по радиусу не превосходит 2 °C, моделируемые в задаче свойства для всех точек по радиусу имеют практически одинаковое значение, при увеличении диаметра стеклянного цилиндра до $5 \cdot 10^{-2}$ м увеличивается разница в распределении температуры по радиусу, особенно заметная при нагреве (охлаждении) с высокими скоростями ($\geq 50^{\circ}$ С/мин). При экспериментальном получении СМК стержней методом индукционного нагрева замечен более медленный нагрев и более быстрое охлаждение образцов, чем в модельных расчетах, преодолеть разницу в эксперименте и при моделировании удалось за счет учета излучения с поверхности металлического цилиндра, что сказывается и на изменении свойств (Рисунок 11 *г*).



Рисунок 11. Изменение а) фактической и структурной температур; температурные зависимости б)скорости изменения фиктивной температуры; в)ТКЛР и вязкости на границе сопряжения слоев в стекле для СМК: — нагрев; — охлаждение; — · — ТКЛР стали 20; г) ТКЛР в стекле (режим 1):— с учетом излучения; …… без учета излучения

В п.5.4 рассмотрена задача о модельном представлениях диффузионных процессов на границе соединения стекла с металлом, с учетом выделения в стекле отдельных фаз с выраженными границами их раздела. Замечено, что переходный слой является следствием растворения и диффузии катионов железа в стекле, предполагается что ионы железа присутствуют в переходном слое в двух валентных состояниях Fe^{2+} и Fe^{3+} , что является определяющим в процессах стеклообразования и кристаллизации железосодержащих систем и оказывает значительное влияние на свойства стекол. При разных типах обработки замечено наличие в стекле двух разных по концентрации и структуре фаз (Рисунок 2 и 12). При (XO) выделяются 2 фазы: кристаллическая с высоким содержанием железа до 78% (до 5 мкм) и железосодержащего стекла до 10% (от 10 до 30 мкм). При (XO&B) также выделяются 2 фазы: железосодержащего стекла до 5% (до 125 мкм).

Рассматривалось два варианта моделирования изменения концентрации железа в стекле. Обе модели предполагали диффузию из слоя постоянной толщины. В первой модели учитывалась зависимость диффузионного коэффициента железа в стекле от изменяющейся концентрации и

температуры. Заметим, что нет единой теории, позволяющей описать температурную зависимость коэффициента диффузии в широком интервале температур, в том числе и при стекловании. В данной работе диффузионный коэффициент записывался через модифицированное Эйрингом соотношение Стокса-Энштейна $D = \frac{k_B T}{6\pi r \eta(C,T)}$, в котором множитель $(6\pi r)^{-1}$ заменен на $(\sqrt{\langle x^2 \rangle})^{-1}$, где расстояние между потенциальными ямами $\sqrt{\langle x^2 \rangle}$, которое преодолевает сфера радиуса r, принят диаметр иона кислорода, а вязкость зависит не только от концентрации, но и от температуры. Несмотря на актуальность и практическую значимость железосодержащих стекол экспериментальные исследования диффузии железа в стекле носят единичный характер, в данной работе при оценке диффузионного коэффициента ориентировались на данные, приведенные в работах (Евстропьева К.К. и Макаровой Н.О.), апроксимация вязкости стекла при изменении концентрации оксидов железа для определенных температур проводилась на основании экспериментальных данных из работы (Татаринцевой О.С.).

Во втором варианте моделирование диффузионых процессов железа в стекле предлагается рассматривать как задачу с фазовым переходом первого рода с особенностями, связанными с образованием и существованием фаз в определенных концентрационных интервалах и наличием «пустых» зон. Функция концентрации записывается в обобщенном виде: $C(x, t) = \{C_i(x, t): C_i^d \le C_i(x, t)\}$ $C_i(x,t) \leq C_i^u$, для $i - \phi$ азы}. Предельные значения выпадающих фаз определяются из эксперимента. Моделирование сразу проводилось в численном виде в конечно-разностной формулировке при следующих предположениях: изменение концентрации внутри каждой фазы описывается уравнением Фика; на границе раздела соединяемых фаз выполняются условия идеального контакта; изменение концентрации между фазами происходит скачком. По мере изменения концентрации и достижения предельных границ существования каждой фазы формируется система условных переходов, связанных с необходимостью «накопления» потока для фазы. На примере «зарождения» фазы С_i реализация возможного «выпадения» новой разработанного метода может быть описана следующим образом. Пусть достигнут нижний предел фазы C_{i-1}^d в точке (x,t) и $C(x - \Delta x, t) > C(x,t)$ (или $C(x + \Delta x, t) < C(x,t)$), тогда на следующем временном слое в этой точке вводится концентрация справа $C^+(x, t + \Delta t)$ и слева $C^{-}(x, t + \Delta t)$ и граничные условия записываются в виде

$$C^{-}(x,t+\Delta t)=C_{i-1}^{d},$$

 $D_{i-1}(C^-(x,t+\Delta t) - C(x-\Delta x,t+\Delta t)) = D_{i+1}(C(x+\Delta x,t+\Delta t) - C^+(x,t+\Delta t)),$

пока $C^+(x, t + \Delta t) > C_i^u$; если с течением времени достигается верхняя граница, т.е. $C^+(x, t + \Delta t) = C_i^u$, то далее закон сохранения массы в конечно-разностной формулировке при переходе через межфазные границы может быть записан в рамках подхода, развиваемого в **п.4.1** настоящей работы (уравнение (1)), в виде

$$(C^{-}(x,t+\Delta t) - C^{+}(x,t))\frac{1}{\Delta t} = \frac{1}{\Delta x}D_{i-1}(C^{-}(x,t+\Delta t) - C(x-\Delta x,t+\Delta t))/\Delta x - D_{i+1}(C(x+\Delta x,t+\Delta t))/\Delta x,$$

аналогично записывается условие при движении границы вправо. Формулировка краевой задачи диффузии в виде аналогичном (1) находится в разработке.

Результаты расчетов по модели с учетом движения границ выделяющихся фаз показали лучшее приближение к экспериментальным результатам даже в случае одинакового во всех фазах диффузионного коэффициента (Рисунок 12).



Рисунок 12. Экспериментальные (данные линейного сканирования зоны соединения в СМК (CH-1 и сталь20), режимы 1 (справа) и 2 (слева), CEM HitachiS-3400N) и теоретические результаты изменения концентрации железа в стекле для разных режимов: слева – XO&B; справа – XO (расчеты при моделировании диффузии с фазами выполнены для одинакового коэффициента диффузии во всех фазах $D = 10^{-13} \text{ м}^2/\text{с}$); а – моделирование с диффузионным коэффициентом, зависящим от вязкости и температуры

В шестой главе поставлены в п.6.1 и решены в пп.6.2, 6.3 и 6.4 краевые задачи об напряженно-деформированного состояния в слоистых цилиндрических эволюции конструкционных материалах при повышенных температурах и отжиге с учетом процесса стеклования и пластического деформирования в разных слоях. Процесс изготовления СМК, с одной стороны, в некоторых операциях родственен процессам получения плоских спаев стекла с металлом, процессам легирования и получения стеклянных и полимерных покрытий и протяжки оптового волокна из цилиндрических заготовок, с другой стороны, имеет ряд существенных отличий: в СМК стеклянный слой превосходит или сопоставим по размерам с металлическим; изменение свойств зоны соединения может существенно сказываться на конечных практических характеристиках готового конструкционного материала; возможно развитие пластических деформаций в металлическом слое и его разрушение при неправильно подобранных параметрах технологического процесса. Моделирование эволюции термонапряженного состояния В технологии получения СМК в данной работе в п. 6.1 развивается на основании трактовки структурного стеклования, как релаксационного процесса с характерным параметром «фиктивной» температурой T_f , определяемой из решения температурной задачи и формулируется в рамках квазистатической наследственной теории термовязкоупругости для стеклянных слоев и термоупругопластичности для металлических слоев. Соотношения для девиатора тензора напряжений в вязкоупругих и упругопластических слоях записаны в виде

$$s_{ij}(X,t) = \begin{cases} 2G_k \left(e_{ij}(X,t) - \int_0^t M_{\sigma k} (T, T_{kf}, \xi - \xi') e_{ij}(X,\xi') d\xi' \right), \\ 2G_k e_{ij}(X,t), \end{cases}$$
(8)

для неорганических стекол гипотеза о возможности пренебрежения объемной релаксацией доказала свою экспериментальную состоятельность, поэтому уравнение Бриджмена с учетом температурных деформаций переписано как уравнение Дюамеля-Неймана

$$\sigma(X,t) = 3K_k \varepsilon(X,t), \tag{10}$$

здесь $s_{ij} = \sigma_{ij} - \sigma \delta_{ij}, \quad \sigma = \frac{1}{3}\sigma_0, \quad \sigma_0 = \sigma_{ii}, \quad e_{ij} = \varepsilon_{ij} - \varepsilon \delta_{ij}, \quad \varepsilon = \frac{1}{3}\varepsilon_0, \quad \varepsilon_0 = \varepsilon_{ii} - 3\varepsilon^T, \quad \varepsilon^T = \int_{T_0}^T \alpha(T, T_f) dT$ - температурные деформации, зависят от ТКЛР и температуры, в интервале стеклования $\alpha(T, T_f)$ записано по аналогии с уравнением (3)

$$\alpha = \alpha_g + (\alpha_l - \alpha_g) \frac{dT_f}{dT}.$$
(11)

Ядро релаксации в (7) записывается аналогично (4) в виде дробной экспоненты $M_{\sigma}(\xi) = \exp\left(-\left(\frac{\xi K_{\sigma}}{\tau_{\sigma}}\right)^{b_{\sigma}}\right)$, здесь τ_{σ} , K_{σ} и b_{σ} –характерные параметры механической релаксации, $\xi(t)$ – приведенное время, как и в (4), вязкость связана с T и T_{f} соотношением (5).

Уравнения состояния для металлического слоя (9) записаны в малых деформациях в рамках модели Прандтля – Рейса при учете тепловых явлений с разделением малых деформаций на обратимые (упругую) ε_{ij}^{e} и необратимую (пластическую) ε_{ij}^{p} составляющие, упругое состояние в пространстве напряжений ограничено поверхностью предельного состояния Мизеса и условием активного нагружения

$$f(\sigma,T) = \frac{1}{2}s_{ij}s_{ij} - \sigma_T^2(T) = 0, \qquad \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}}\dot{\sigma}_{ij} + \frac{\partial f}{\partial T}\dot{T} > 0, \qquad (12)$$

 $\sigma_T(T)$ – предел прочности при растяжении зависит только от температуры. Пластические составляющие компонент тензора деформаций определяются согласно закону ассоциированного записи граничных условий в общей постановке полагалось, что внешняя течения. При поверхность свободна от какого либо воздействия, кроме температурного, на границе сопряжения разных слоев, в одном из предельных случаев поставлены условия идеального контакта. Уравнения равновесия, записанные в перемещениях для соотношений (8) имеют интегродифференциальный вид, а в целом краевая задача с учетом (8)-(12) и краевых условий представлена системой взаимосвязанных интегро-алгебраических уравнений типа Вольтерра 2 рода, дифференциальных и алгебраических уравнений. Аналитические решения таких систем возможны только в частных случаях. Численные методы их решения связаны в первую очередь с линейных интегро-дифференциально-алгебраических уравнений теорией решения систем (ИДАУ), исследования которых редко встречаются в публикациях с начала 90-х и находятся в стадии развития. Основные подходы и результаты по численным схемам и качественные определения для линейных систем ИДАУ отражены в работах Чистякова В.Ф., Клиа В., Булатова М.В., Бриннера Г. и Будниковой О.С. При отсутствии общего метода их решения актуальным является разработка новых методов получения приближенных решений или сведения их к системам линейных и нелинейных алгебраических уравнений.

В п. 6.2 уточнен метод расчета релаксации напряжений, предложенный Мазуриным О.В. при отжиге плоских спаев с учетом изменяющихся в результате диффузионных процессов свойств в зоне соединения стекла и металла. Разница механических свойств компонент в плоском соединении является причиной напряжений, определяемых величиной обжатия стекла металлом. Релаксационные процессы в стекле влияют на изменение этих напряжений с течением времени и при изменении температуры. Проведенные по уточненному алгоритму расчеты релаксации напряжений при отжиге с учетом незначительно отклоняющихся от основного стекла (C52-1, C49-1) свойств диффузионной зоны показали не только качественное, но и совпадение по порядку релаксирующих напряжений при изотермической выдержке. При анализе метода расчета релаксации напряжений в плоских спаях в п.6.2. сформулирован численный подход к решению краевой задачи (7)-(11) в п.6.4.

В п.6.3 с целью апробации и контроля численных решений получены аналитические решения поставленной в п.6.1 краевой задачи, при осесимметричном нагреве, в условиях обобщенного плоского деформированного состояния ($\varepsilon_z = \varepsilon_z(t)$) для СМК стержня или цилиндра. В этих предположениях уравнения равновесия для каждого слоя с учетом (8)-(12) примут вид

$$\left(\frac{4}{3}G_1 + K_1\right)\left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial u}{\partial r} - \frac{u}{r^2}\right) - \frac{2}{3}G_1\int_0^t M_\sigma(T, T_f, t - t)\left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial u}{\partial r} - \frac{u}{r^2}\right)dt = F_1(r, t), \quad (13)$$

$$\left(\frac{4}{3}G_2 + K_2\right)\left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial u}{\partial r} - \frac{u}{r^2}\right) = 2G_2\left(\frac{\partial\varepsilon_r^p}{\partial r} + \frac{\varepsilon_r^p - \varepsilon_\varphi^p}{r}\right) + F_2(r, t),$$
(14)

здесь u(r, t), представляется важным в задачах о температурных напряжениях, в том числе и для сопряженных цилиндрических систем различать обобщенное плоское напряженное состояние

 $\varepsilon_z = \varepsilon_z(t)$, от его частного случая $\varepsilon_z = 0$, имеющего определенный физический смысл и определяющего качественно иную картину распределения напряжений. Анализ изменения температуры в **п.5.3** показал ее равномерность при режимах медленного нагрева и охлаждения (< 15 °С/мин). При больших скоростях или массивных стеклующихся слоях возможно применить метод физической дискретизации (т.е. разбиения на слои с однородным изменением температуры

по толщине). Для ядра Максвелла $M(t-t) = e^{-\frac{(t-t)K_{\sigma}}{\eta_r}}$ получено аналитическое решение интегрального уравнения Вольтерра 2 рода (13) и для дифференциального уравнения (14) при отсутствии пластических деформаций. При отсутствии внешних сил и условии идеального контакта (без проскальзывания вдоль образующей) краевые условия принимают вид

$$\varepsilon_{z}^{1}(t) = \varepsilon_{z}^{2}(t) = \varepsilon_{z}(t), \quad u(R_{1}, t) = u(R_{1}, t), \quad \sigma_{r}(R_{1}, t) = \sigma_{r}(R_{1}, t), \quad (15)$$

$$\sigma_r(R_0,t) = -P, \ \sigma_r(R_2,t) = 0, \ \ \int_0^{\kappa_1} \sigma_z(r,t) \, r \, dr + \int_{R_1}^{\kappa_2} \sigma_z(r,t) \, r \, dr = 0.$$
(16)

Уравнения (15)-(16) могут быть переписаны с учетом решений уравнений (13) и (14) и соотношений (8) в виде систем интегро-алгебраических и алгебраических уравнений, которые для ядра Максвелла решены методом Пикара (при $R_0 = 0$) и методом интегрального преобразования Лапласа (при $R_0 \neq 0$).

В п.6.4. в рамках конечно-разностных формулировок разработан метод численного расчета механических напряжений в совместно деформируемой сопряженной системе с учетом терморелаксационных процессов в стекле и пластического деформирования в металле. В совместных работах автора с Солоненко Э. П. предложен метод учета терморелаксации напряжений в цилиндрическом спае стекла с упругим материалом при осесимметричном нагреве через введение дополнительных «корректировочных» напряжений на текущем временном слое (k) в виде

$$\sigma_{cor,s}^{k} = \sum_{m=1}^{k-1} \left(1 - \exp\left(-\left(\frac{(\xi^{k} - \xi^{m})K_{\sigma}}{\eta_{r}}\right)^{b_{\sigma}}\right) \right) \Delta \sigma_{s}^{k}, s = r, \varphi, z,$$
(17)

полные напряжения в стекле определяются как разность между мгновенными упругими и «корректировочными» на каждом временном слое.

Особенностью задачи с учетом пластического деформирования является ее зависимость от истории термического нагружения, поэтому численная реализация всех уравнений записывается в приращениях по времени всех неизвестных. Для однородного уравнения Вольтерра (при $F_1 = 0$ в (13)) на каждом временном слое (k) приращение перемещений в в 1-ом слое (стекле) записываются как известные функции координат, в которых следует найти только приращение по времени констант интегрирования $\Delta u^k = \Delta C_{11}^k \cdot r + \Delta C_{12}^k \cdot 1/r$ и $\Delta \varepsilon_z^k$. Приращения перемещений во 2-ом слое (упругопластическом материале) рассматриваются как сеточные функции Δu_j^k , уравнение (13) аппроксимируется конечно-разностными неявными схемами. Приращение неизвестных ΔC_{11}^k , ΔC_{12}^k , $\Delta \varepsilon_z^k$ и Δu_j^k может быть найдено из решения конечно-разностных представлений уравнений (15)-(16), где приращения напряжений в стекле с учетом (17) находятся в виде

$$\begin{split} \Delta \sigma_r^k &= \left(\frac{2}{3}G_1 + 2K_1\right) \Delta C_{11}^k - \frac{2G_1}{r^2} \Delta C_{12}^k + \left(K_1 - \frac{2}{3}G_1\right) \Delta \varepsilon_z^k - 3K_1 \Delta \varepsilon_1^{Tk} - \Delta \sigma_{cor,r}^k, \\ \Delta \sigma_{\varphi}^k &= \left(\frac{2}{3}G_1 + 2K_1\right) \Delta C_{11}^k + \frac{2G_1}{r^2} \Delta C_{12}^k + \left(K_1 - \frac{2}{3}G_1\right) \Delta \varepsilon_z^k - 3K_1 \Delta \varepsilon_1^{Tk} - \Delta \sigma_{cor,\varphi}^k, \\ \Delta \sigma_z^k &= 2\left(K_1 - \frac{2}{3}G_1\right) \Delta C_{11}^k + \left(K_1 + \frac{2}{3}G_1\right) \Delta \varepsilon_z^k - 3K_1 \Delta \varepsilon_1^{Tk} - \Delta \sigma_{cor,z}^k. \end{split}$$

При определении пластических деформаций использована итерационная процедура метода дополнительных деформаций. Если напряжения на k –м шаге по времени удовлетворяют условиям (11), включается итерационный процесс по определению пластической деформации, при этом в 1-ом слое на каждой итерации уточняются ΔC_{11}^l , ΔC_{12}^l , $\Delta \varepsilon_z^l$ и переопределяются $\Delta \sigma_r^l$, $\Delta \sigma_{\phi}^l$ и $\Delta \sigma_z^l$. Задача и метод хорошо обобщается на произвольное число стеклующихся

слоев. При расчетах использованы стандартные процедуры, сопровождающие любой численный расчет, контроль невязок в уравнениях равновесия и краевых условиях, сходимость на сгущающихся сетках и при сравнении с аналитическим решением, полученным **в п.6.3** (Рисунок 13), проверка устойчивости при малых возмущениях нулевых начальных условий и малых отклонений некоторых коэффициентов. При расчетах использовались данные по стеклу C52-1, близкого к используемому стеклу CH-1 в CMK и данные по стали 20.



Рисунок 13. Сравнение результатов расчетов (слева) с аналитическим решением: 1 – аналитическое решение (12)-(16); численное $2 - \Delta_t = 0.01$, $3 - \Delta_t = 0.1$; (справа) численное решение на сгущающейся по времени сетке в 1 слое (стекле): а) $\varepsilon_z = 0$ и б) $\varepsilon_z = \varepsilon_z(t) : 1 - \Delta_t = 0.1$; $2 - \Delta_t = 0.01$; $3 - \Delta_t = 0.001$ (охлаждение от 600 °C со скоростью 3°C/мин)

Моделировались разные подходы к отжигу: отжиг сразу после нагрева и получения соединения и отдельный повторный нагрев после изготовления. При рассмотрении отжига как отдельного этап технологического процесса дополнительно моделировалось напряженнодеформированное состояние в композите для режимов охлаждения после изготовления – нагрева с разными скоростями и повторного охлаждения с выдержкой при определенной температуре. Отдельные результаты расчетов представлены на графиках Рисунков 13 и 14. Заметна разница на первом этапе охлаждения для разных скоростей в стекле почти в два раза; поскольку напряжения имееют положительный знак и являются растягивающими, то предпочтительно выбирать скорость охлаждения с меньшими растягивающими напряжениями. Приведено сравнение результатов моделирования для обобщенного плоского деформированного состояния и его частного случая (Рисунок 14).





Рисунок 14. Изменение σ_z и σ_i при разных гипотезах плоского деформированного состояния: $\varepsilon_z(t) \neq 0$ и $\varepsilon_z(t) = 0$, режим: охлаждение-нагрев-охлаждение с одинаковой скоростью $q = 3^{\circ}$ С/мин: а) в стекле; б) в металле

Из графиков Рисунка 14 заметен интервал температур и уровень напряжений, при которых во 2-ом слое развивается пластическое течение, на графике изменения интенсивности на всех этапах в этом интервале графики сливаются и соответствуют графику изменения предела текучести. В модели удалось учесть, что на уровень напряжений и величину выдержки влияет скорость нагрева (Рисунок 15). Замечено, что после повторного нагрева происходит большее снижение напряжений, чем при отжиге в процессе охлаждения, вместе с тем замечено, что и уровень растягивающих напряжений в стекле повышается и зависит от скорости повторного нагрева.



Рисунок 15. Отжиг после охлаждения от 600 °С и при повторном нагреве с разными скоростями до 560 °С, выдержке 2 часа и охлаждении с одинаковой скоростью 3 °С/мин

В **п.6.5** при анализе подхода к описанию механической релаксации в плоском спае при увеличении (уменьшении) температуры и работ Жорника А.И. по термической стойкости стеклометаллических труб с учетом перемещений по отслоениям, выделено перспективное условие, подчеркивающее важность гипотезы обобщенного плоского деформированного состояния при термических напряжениях в сопряженных цилиндрических системах с разными

ТКЛР и позволяющее учесть степень сцепления соединяемых поверхностей в направлении образующей. При свободном перемещении вдоль образующей $|\varepsilon_z^{(1)} - \varepsilon_z^{(2)}|$ достигает своего максимального значения $\Delta \varepsilon_z$, а при идеальном контакте $|\varepsilon_z^{(1)} - \varepsilon_z^{(2)}| = 0$, в остальных случаях $0 < |\varepsilon_z^{(1)} - \varepsilon_z^{(2)}| < \Delta \varepsilon_z$, тогда краевые условия (17) могут быть дополнены условием

$$\left| \varepsilon_{z}^{(1)} - \varepsilon_{z}^{(2)} \right| = \begin{cases} \aleph \Delta \varepsilon_{z}(t) & \text{и} \ \int_{R_{0}}^{R_{1}} \sigma_{z}(r,t) \, r dr = 0 \, \text{и} \ \int_{R_{1}}^{R_{2}} \sigma_{z}(r,t) \, r dr = 0, & \text{если } 0 < \, \aleph \leq 1, \\ 0 & \text{и} \ \int_{R_{0}}^{R_{1}} \sigma_{z}(r,t) \, r dr + \int_{R_{1}}^{R_{2}} \sigma_{z}(r,t) \, r dr = 0, & \text{если } \aleph = 0, \end{cases}$$

здесь X — характерная степень сцепления слоев, определяемая из экспериментальных измерений перемещений в каждом слое при изменении температуры.



Рисунок 16. Изменение напряжений: (слева) в стекле- --- σ_z , $-\sigma_r$, σ_{φ} ; (справа) в металле - ---- - σ_z , $-\sigma_r$, $-\sigma_{\varphi}$ для разных значений \aleph

Качественная картина изменения напряжений при расчетах по аналитическим решениям, полученным в **п.6.2** для различных значений \aleph и при охлаждении от 600°С/мин со скоростью q = 3°С/мин, соответствует моделируемой, значения всех напряжений лежат между двумя критическими значениями от максимальных напряжений при $\aleph = 0$ (идеальный контакт) до минимальных при $\aleph = 1$ (свободное проскальзывание вдоль образующей). Для количественного анализа значений \aleph требуется доработка методики экспериментальных исследований по измерению перемещений при нагреве, описанной в п.4.2 (Рисунок 16).

В заключении приведены основные результаты выполненной работы.

Синтезирован новый конструкционный и функциональный материал – стеклометаллокомпозитный стержень, при проведении комплексных теоретических и экспериментальных исследованиях получены следующие результаты.

1. Проведены экспериментальные исследования физико-химических процессов, протекающих при формировании соединений на основе боросиликатного стекла (марок CH-1 и C49-1) и стали (марок 20 и ст3сп), и установлены физико-химические факторы, определяющие скорость образования соединения на воздухе при температурах 740 – 850 °C. Оптимизированы параметры режимов и выделены два основных метода предварительной химической обработки стальной поверхности: холодное химическое травления поверхности стали азотной кислотой (*XO*) и дополнительное нанесение стеклянного припоя на основе тетрабората натрия (*XO&B*). На

примере соединений стекла CH-1 и стали 20 установлено влияние времени выдержки, температуры и метода обработки на протяженность зоны стекла, насыщенной оксидами железа. Показано, что при дополнительной обработке тетраборатом натрия в зоне соединения отсутствуют кристаллические фазы оксидов железа и железосодержащего стекла.

2. Исследовано и обосновано предложение практического применения СМК стержней как арматуры для бетонных конструкций в строительной отрасли.

При математическом моделировании эффективных характеристик бетона, армированного СМК, предложен метод представительного объема, метод апробирован на расчетах эффективных характеристик железобетона. При моделировании текущих прочностных характеристик СМК стержней показано, что по прочности бетонные изделия (балка и плита), армированные СМК, не уступают армированным сталью Ст3, при этом не замечено и существенного повышения прочностных характеристик. Доказано, что наиболее эффективно армирование СМК в бетонных конструкциях, работающих на сжатие. Сжимающие напряжения в шпунтовой плите и шпунтовой свае в среднем более чем на 20% меньше, чем для аналогичных бетонных изделий, армированных сталью. Отдельные экспериментальные исследования бетонных плиты и балки, армированных СМК, показали отклонение от теоретических расчетов в пределах 15-20 %, в отдельных образцах удалось достичь более высоких показателей несущей способности при нагрузке почти на 30 % превышающей расчетную.

Анализ экономической эффективности применения СМК арматуры показал, что поскольку масса СМК арматуры меньше стальной и существенно уменьшается при утончении стальной оболочки, на ее расчетную стоимость существенно влияют толщина и тип используемых стальных труб, а также уменьшение затрат на сырьевые составляющие стекла. При использовании для внешней оболочки водогазопроводных труб происходит удешевление стоимости до 15%, в то время как использование электросварных труб приводит к незначительному росту стоимости, а использование горячедеформированных труб делают СМК арматуру существенно дороже стальной.

3. Проведены систематические экспериментальные исследования механических свойств и особенностей деформирования СМК стержней на основе: стали 20 и стекла CH-1; стали CT3сп и стекла C49-1. На примере стеклометаллокомпозита из стали 20 и стекла CH-1 при исследованиях микротвердости и статического одноосного растяжения выделены оптимальные параметры технологического режима: $T_{max} = 800$ °C и время выдержки 100 минут для двух типов дополнительной обработки стальной поверхности XO& B и XO. При выделенных параметрах замечена наиболее регулярная структура зоны соединения. Условия проведения исследований микротвердости позволяют предположить, что измеренные значения характеризуют «мгновенную» микротвердость в стекле – сопротивление стекла к обратимому уплотнению, для оптимальных режимов значения HV: в стекле – 590; в зоне соединения – 530.

Доказан различный характер деформирования образцов под нагрузкой при проведении экспериментальных исследований на растяжение, сжатие, изгиб и кручение. При статическом растяжении и трехточечном изгибе материал ведет себя как упругопластический, на условной диаграмме растяжения площадка текучести выражена слабо и имеет незначительные скачки напряжений (пилообразный профиль), при этом зона нелинейного упрочнения имеет протяженный вид с максимальным значением и разрушением после его достижения. Для оптимальных режимов $\sigma_T = 142$ МПа и $\sigma_B = 216$ МПа. Замечено, что относительное удлинение после разрыва на порядок меньше, чем у аналогичных образцов из стали 20. Показано, что при растяжении дефекты в стекле распространяются перпендикулярно образующей, что приводит к формированию в стекле доказано, что материал ведет себя как хрупкий: максимальное предельное временное сопротивление сжатию – 500 МПа, среднее значение ударной вязкости 18,5 кН/м, приведенный модуль сдвига образцов на основе СтЗсп и С49-1 составил 0,56·10⁵ МПа, что является средним между С49-1 (0,305·10⁵ МПа) и СтЗсп (0,8·10⁵ МПа).

Исследования механических свойств стеклометаллокомпозита при действии циклического нагружения растяжения-сжатия доказали эффективность оценки пластической амплитуды деформации при определении предела усталости.

Показан различный характер распространения дефектов при исследованиях на термостойкость, коррозионную стойкость и статическое растяжение: если в первых двух испытаниях распространение дефектов приводит к формированию блочной структуры в стекле, то для растяжения характерно распространение макродефектов, приводящих к слоистой структуре.

Замечено формирование специфической структуры в стекле при резком охлаждении СМК стержней от 800 °C со скоростью 90 °C/мин. До и после испытаний на растяжение при поперечном срезе наблюдается выделение почти равномерной толщины слоев: дефектной и бездефектной (макро- и микротрещин) структуры стекла, с нетипичной «выемкой» параболической формы в месте разрыва. Проведенные эксперименты представляют перспективу дальнейших теоретических и экспериментальных исследований механизма разрушения стекла в зависимости от предыстории температурной и механической обработки. Одним из важных теоретических приложений является представление стеклометаллокомпозита как модельного образца при исследовании механизма разрушения сильно сжатых хрупких горных пород.

4. Предложен новый метод численного решения задач эволюции границ фазовых переходов первого рода вследствие теплообмена. Метод основан на введении в уравнение теплопроводности дополнительной неизвестной функции источникового типа, которая характеризует движение фронта фазового перехода при плавлении (кристаллизации). Теоретическая значимость заключается в упрощении численной реализации при решении задач для областей произвольной геометрии, размерности, сложных краевых условий и возможностей наличия одновременно существующих несколько границ фронта фазового перехода.

5. Решены задачи механики деформируемого твердого тела об изменении термодеформированного состояния в слоистых материалах цилиндрической формы с учетом фазового перехода первого рода (кристаллизации) в отдельных слоях в приближении упругого и упругопластического деформирования слоев. Приведенные постановки краевых задач и их решения имеют практическую значимость в технологических задачах о формировании слоистых композитов при высоких температурах с возможностью фазовых переходов во всех слоях.

6. Предложено уточнение гидромеханической модели Рейнольдса для теоретического определения параметров технологического процесса: температуры выдержки, скорости нагрева, давления и времени образования физического контакта. Для апробации результатов математического моделирования разработан лабораторный стенд и методика измерения усадки при деформации стеклянных стержней. Показано, что разработанная экспериментальная методика эффективна при определении температуры стеклования и границ интервала стеклования при нагреве с разными скоростями. Практическая значимость математической модели, кроме описываемой технологии получения стеклометаллокомпозита, принадлежит технологии соединения упругих материалов через вязкоупругий слой при изменении вязкости, температуры и давления.

7. На основании обзора и анализа основных положений релаксационной теории стеклования выбрана модель Тула-Нарайанасвами-Мазурина-Мойнихана с фиктивной температурой как фундаментальным параметром структурных изменений при стекловании. Поставлена и решена задача сложного теплообмена в слоистых композитах с учетом стеклования в слоях и возможности теплообмена излучением при изменении условий температурной обработки от индукционного нагрева до изотермической выдержки.

8. Предложена математическая модель для описания диффузионных процессов в зоне соединения разнородных материалов с учетом выделения новых фаз при изменении концентрации в заданных пределах. Модель представляет собой модификацию модельных представлений о задачах с фазовыми переходами первого рода, дополненную новыми условными переходами на границе раздела фаз. Приведены результаты сопоставления результатов моделирования с экспериментальными данными. Модель имеет самостоятельную теоретическую и практическую

значимость при описании диффузии в различных материалах с возможностью образования новых фаз.

9. Уточнен метод Мазурина для расчета релаксации напряжений при нанесении стеклующихся покрытий на упругую подложку, с учетом отличающихся от основных материалов свойств зоны соединения, которая может являться как упругим слоем, так и стеклующимся с возможностью релаксации напряжений.

10. Предложен метод определения механической релаксации, решены задачи об эволюции температурных напряжений в СМК для разных методов их синтеза с учетом процесса стеклования и пластического деформирования. Метод апробирован при решении задач о технологических и остаточных напряжениях при получении и отжиге стеклометаллокомпозита. Проведено сравнение с аналитическими решениями. Полученные аналитические решения имеют самостоятельную практическую значимость, в том числе при оценке характерных параметров механической релаксации.

11. Развивается условие совместного деформирования соосных цилиндров при разных условиях сопряжения по боковым поверхностям: от свободного проскальзывания вдоль оси до идеального контакта, с учетом частичного (ограниченного) проскальзывания. Метод позволяет существенно упростить задачу при условии термоупругого деформирования слое, а в случае вязкоупругого поведения с простыми ядрами релаксации позволяет получить аналитическое решение. Практическая значимость метода заключается в возможности моделирования технологических и остаточных напряжений не только в СМК, но и в слоистых конструкционных цилиндрических системах, работающих в условиях циклического нагрева—охлаждения до высоких температур.

12. Перспектива проведения дальнейших исследований по заявленной тематике получения и изучения свойств СМК лежит, прежде всего, в области дальнейшего экспериментального исследования их поведения под воздействием разного рода нагрузок в зависимости от технологии получения с целью накопления обширного экспериментального материала, расширения области практического применения, верификации и уточнения предложенных математических моделей и методов. Интересным представляется замеченное экспериментально в стекле разрушение (расположение макродефектов) разных типов в зависимости от технологии получения и вида воздействия. Представляется, что стеклометаллокомпозит — актуальный экспериментальный материал для решения фундаментальных проблем хрупкого разрушения, в том числе в задачах геомеханики при описании поведения массивов сильносжатых горных пород.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора наук:

1. Любимова, О.Н. Метод расчета эволюции напряжений в стеклометаллокомпозите с учетом структурных и механических релаксационных процессов/ О.Н. Любимова, М.А. Барботько // Вычислительная механика сплошных сред. -2019. - Т. 12. - № 2. - С. 215-229.

2. Пестов, К.Н. Об одном численном методе решения задач типа Стефана/ К.Н. Пестов, О.Н. Любимова, М.В. Останин// Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И.Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. - 2019. - № 3 (41). - С. 51-60.

3. Буренин А.А. Релаксация напряжений в цилиндрических спаях стекла с металлом с учетом качества зоны соединения /А.А. Буренин, О.Н. Любимова, Э.П. Солоненко//прикладная механика и техническая физика.-2018- Т. 59. - № 6. - С. 155-164. (Burenin, A.A. Stress relaxation in cylindrical glass-to-metal junctions with account for the quality of a junction region/ A. A. Burenin, O.N. Lyubimova, E. P. Solonenko// Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. - 2018. - Т. 59. - № 6. - Р. 1095-1103)

4. Любимова, О.Н. Моделирование размера диффузионной зоны при изменении условий режима изготовления стеклометаллокомпозита/О.Н. Любимова, А.В. Морковин, В.В. Сиськов//

Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. - 2018. - № 1 (34). - С. 11-22.

5. Любимова О.Н. Моделирование параметров температурного режима при изготовлении стеклометаллокомпозита/ О.Н. Любимова, С.А. Дрюк//Теплофизика и аэромеханика.-2017.-Т.24.- №1.-С. 127-135. (Lyubimova O.N., Dryuk S.A. Simulation parameters of temperature in the process of manufacturing a glass-metal composite // Thermophysics and Aeromechanics. - 2017. - Т. 24. - № 1. - Р. 125-133)

6. Любимова, О.Н. Особенности структуры зоны соединения стекла и стали в технологии получения стеклометаллокомпозита/ О. Н. Любимова, А.В. Морковин, С.А. Дрюк // Материаловедение. - 2017. - № 4. - С. 3-7.

7. Любимова, О.Н. Моделирование поведения несогласованного спая стекла с металлом с учетом свойств зоны соединения/ О. Н. Любимова, Э.П. Солоненко// Физическая мезомеханика. - 2016. - Т. 19. № 2. - С. 114-120.

8. Любимова, О.Н. Математическое моделирование процесса получения цилиндрических спаев стекла с металлом/ С.А. Дрюк, О.Н. Любимова// Известия Самарского научного центра Российской академии наук. - 2016. - Т. 18. - № 1-2. - С. 197-200.

9. Любимова О.Н. Математическое моделирование процесса теплообмена в слоистых материалах с учетом фазовых превращений в отдельных слоях/ О.Н. Любимова, К.Н. Пестов//Теплофизика и аэромеханика.-2015.-Т. 22.-№4.-С.511-519. (Lyubimova, O.N. Mathematical modelling of heat transfer process in layered materials accounting for phase transitions in individual layers/ O.N. Lyubimova, K.N. Pestov// Thermophysics and Aeromechanics. - 2015. - T. 22. - № 4. - P. 491-499)

10. Любимова, О.Н. Термические напряжения в стеклометаллокомпозитном стержне с учетом свойств зоны соединения/ О. Н. Любимова, А.В. Морковин, Э.П. Солоненко// Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И.Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. - 2015. - № 3 (25). - С. 131-137.

11. Любимова, О.Н. Метод определения термических напряжений в процессе сварки разнородных материалов/ О. Н. Любимова, А.В. Морковин, К.Н. Пестов// Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И.Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. - 2013. - № 2 (16). - С. 99-105.

12. Гридасова, Е.А. Исследование поведения стеклометаллокомпозитного стержня при испытании на осевое сжатие/ Е.А. Гридасова, О.Н. Любимова, Н.Е. Путырин// Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И.Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. - 2013. - № 2 (16). - С. 90-98.

13. Гридасова, Е.А. Практические результаты создания стеклометаллокомпозитного стержня/ Е.А. Гридасова, О.Н. Любимова // Вестник МГСУ. - 2012. - № 7. - С. 136-140.

14. Любимова, О.Н. Математическое моделирование теплового процесса диффузионной сварки стекла с металлом/ О.Н. Любимова, К.Н. Пестов, Е.А. Гридасова// Сибирский журнал индустриальной математики. - 2010. - Т. 13. - № 4 (44). - С. 52-63.

15. Любимова, О.Н. Метод упрочнения стекла при его диффузионной сварке с металлом/ О.Н. Любимова, Е.А. Гридасова // Сварка и диагностика. - 2010. - № 6. - С. 38-42.

16. Любимова, О.Н. Численное решение задачи о проплавлении металлического слоя при сварке плавлением стекла и металла/ О.Н. Любимова, К.Н. Пестов, Е.А. Гридасова // Вычислительная механика сплошных сред. - 2010. - Т. 3. - № 1. - С. 63-72.

17. Любимова, О.Н. К вопросу упрочнения стекла методом диффузионной сварки с металлом/ О.Н. Любимова, К.Н. Пестов, Е.А. Гридасова // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И.Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. - 2010. - № 2 (8). - С. 318-325.

Патенты РФ:

18. Любимова О.Н., Любимов Е.В., Лапо Е.Г., Мартыненко А.В., Морковин А.В. Термическая печь // Патент на изобретение RU 2604083 C1, 10.12.2016.

19. Любимова О.Н., Любимов Е.В., Гридасова Е.А., Никифоров П.А. Способ изготовления стеклометаллокомпозитного стержня // Патент на изобретение RU 2555982 C1, 10.07.2015.

20. Гридасова Е.А., Любимова О.Н., Пестов К.Н., Каяк Г.Л. Способ изготовления стеклометаллокомпозита // Патент на изобретение RU 2428388 C1, 10.09.2011.

21. Гридасова Е.А., Любимова О.Н., Пестов К.Н., Каяк Г.Л. Способ изготовления стеклометаллокомпозита // Патент на изобретение RU 2428389 C1, 10.09.2011.

Монографии:

22. Любимова, О. Н. Термические напряжения в слоистых стекло-металлических композитах: монография/ О. Н. Любимова, Э.П. Солоненко; Инженерная школа ДВФУ. – Владивосток: Дальневост. федерал. ун-т.- 2019. –89 с.

23. Любимова, О. Н. Метод расчета термоупругих напряжений для оболочек из стеклометаллокомпозита: монография / О.Н. Любимова; Дальневост. федерал. ун-т. – Владивосток: Издат. Дом ДВФУ, 2012. – 90 с.

Публикации в других изданиях:

24. Любимова, О.Н. Исследование стеклометаллокомпозита с помощью методов микроскопического и микрорентгеноспектрального анализа: учебное пособие для вузов/ О.Н. Любимова, В.В. Андреев, А.В. Морковин; Инженерная школа ДВФУ. – Владивосток: Дальневост. федерал. ун-т, 2020. -48 с.

25. Lyubimova, O.N. Characteristics of diffusion zone in changing glass-metal composite processing conditions/ O.N. Lyubimova, A.V. Morkovin, V.V. Andreev// IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Processing Equipment, Mechanical Engineering Processes and Metals Treatment. - 2018. - P. 42 -66.

26. Lyubimova, O.N. The characteristics of the structure of the glass-steel junction zone in the technology of obtaining glass-metal composite/ O.N. Lyubimova, A.V. Morkovin, S.A. Dryuk // Materials Science. - 2017. - P. 379-382.

27. Lyubimova, O.N. Modeling of the kinetics of diffusion processes in the formation of a junction glass-steel/ O.N. Lyubimova, A.V. Morkovin, V.V. Andreev// Journal of Physics: Conference Series. - 2017. - T. 894. - № 1. - P. 12 - 55.

28. Lyubimova, O. Characterisation of the mechanical and corrosive properties of newly developed glass-steel composites/ O. Lyubimova, E. Gridasova, A. Gridasov, G. Frieling, M. Klein, F. Walther // Materials in Technologies. - 2016. - T. 50. - № 1. - P. 95-100.

29. Lyubimova, O.N. Thermo-mechanical relaxation of stresses in a glass-metal junction/ O.N. Lyubimova, E.P. Solonenko// Journal of Physics: Conference Series. - 2016. - T. 754. - P. 82 -102. - № 8. 30. Lyubimova, O.N. Research of structure, mechanical and operation properties of glass-metal composites/ O.N. Lyubimova, E.V. Lyubimov, E.P. Solonenko, A.V. Morkovin, S.A. Dryuk// ASEE Annual Conference Proceedings. - 2016. - T. 1783. - P. 102-141.

31. Любимова О.Н., Сиськов В.В. Результаты экспериментальных исследований коррозионной стойкости стеклометаллокомпозита // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. - 2016. - № 4 (29). - С. 66-72.

32. Барботько, М.А. Метод определения эффективных свойств бетонных изделий, армированных различными материалами/ М.А. Барботько, О.Н. Любимова, К.Н. Пестов// Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. - 2015. - № 4 (25). - С. 13-21.

33. Lyubimova O.N., Morkovin A.V., Dryuk S.A., Nikiforov P.A. Structure and constitution of glass and steel compound in glass-metal composite // AIP Conference Proceedings. - 2014. - C. 379-382.

34. Любимова, О.Н. Численное решение контактной задачи термомеханики для трехслойного композита с учетом фазовых переходов первого рода в отдельных слоях/ О.Н. Любимова, К.Н. Пестов// Динамика сплошной среды – 2012. – Т.З. – С. 82-88.

Любимова Ольга Николаевна

СТЕКЛОМЕТАЛЛОКОМПОЗИТ: МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА, СТРУКТУРНЫЕ МЕХАНИЗМЫ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ, МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ

Автореферат

Выход в свет. Заказ № 37 Формат 60х84/16 Объем 2 п.л. Тираж 100 экз. Отпечатано в издательстве ФГАО ДВФУ 690950, г. Владивосток, ул. Суханова, 8