

ОТЗЫВ

официального оппонента Сенашова Сергея Ивановича на диссертационную работу Любимовой Ольги Николаевны «Стеклометаллокомпозит: механические свойства, структурные механизмы деформации при повышенных температурах, моделирование процессов формирования структуры и свойств», представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела.

Актуальность работы определяется использованием в различных отраслях промышленности конструкционных композиционных материалов на основе стекла и металла и развитием методов получения новых материалов на их основе. Поиск рациональных температурно-скоростных режимов их получения связан с теоретическими проблемами описания явления стеклования, моделирования структурных изменений и свойств композитов при высоких температурах, моделирование совместного деформирования соединений из разнородных материалов и изменение их свойств под нагрузкой.

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

Во введении обоснована актуальность, кратко охарактеризована степень разработанности проблемы, сформулированы: цель, задачи, научная новизна, положения, выносимые на защиту, теоретическая и практическая значимость и достоверность. Приведено краткое содержание работы по главам.

В первой главе выполнен краткий обзор по методам повышения прочности стекла и обзор по существующим технологиям изготовления стеклометаллокомпозита методами баллонизации, центрифугирования и косвенного нагрева.

Описаны экспериментальные результаты трех новых направлений в технологии получения соединений стекла и стали методом пайки в окислительной среде. Предложено объяснение структурным изменениям в зоне соединения стекла и стали при разных методах дополнительной обработки. Приведены результаты статистического и факторного анализа изменения размеров диффузионной зоны в зависимости от времени

выдержки, максимальной температуры нагрева и способа дополнительной обработки стали.

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

Во второй главе выполнено математическое и экспериментальное моделирование механического проведения балок и плит, армированных новой композитной арматурой. Проведен анализ экономической эффективности от замены стальной арматуры на стеклометаллокомпозитную и определены перспективные направления исследований. Математическое моделирование проведено методом последовательного моделирования с определением эффективных механических характеристик в выделенном объеме с характерным типом армирования и затем их использованием при расчетах на масштабном уровне. Моделирование проводилось конечно-элементным методом. Показана экономическая эффективность от внедрения нового конструкционного материала даже с текущими механическими характеристиками.

В третьей главе приведены результаты комплексных экспериментальных исследований стеклометаллокомпозита при одноосном растяжении и сжатии, кручении, сложном изгибе, циклических нагрузках, коррозионной и термической стойкости, износа при абразивном трении в агрессивной среде. Все методики исследования механических свойств стеклометаллокомпозита адаптированы и уточнены в технической части и теоретических расчетах. При исследованиях микротвердости и механического поведения при одноосном растяжении оптимизированы режимы получения стеклометаллокомпозита.

Получены результаты о характере поведения и разрушения нового материала при различных воздействиях. Для экспериментальных образцов на основе неорганического стекла и малоуглеродистой стали определены: микротвердость, пределы текучести, временного сопротивления разрыву и сжатию, ударная вязкость, модуль упругости, амплитуда нагрузки при ступенчатом нагружении для предельного числа циклов, термическая стойкость при растяжении.

В четвертой главе последовательно решены две задачи о термомодеформационных процессах в стеклометаллокомпозитах при разных методах получения при высоких температурах. Математическое моделирование при получении стеклометаллокомпозита методом центрифугирования осложнено фазовыми переходами в металлических

слоях. Предложен новый метод определения положения границы фазового перехода, основанный на введении дополнительной функции типа источников. При определении напряженно-деформированного состояния для эволюционной граничной задачи для растущей массы твердой фазы при кристаллизации предложено краевое условие на границе твердой и жидкой фаз. В рамках предлагаемых подходов решены задачи об эволюции напряженно-деформируемого состояния для стеклометаллокомпозитов состоящих из разного количество слоев.

Теоретическое и экспериментальное исследование второй задачи четвертой главы связано с проблемой оптимизации максимальной температуры, скорости нагрева, давления и время образования физического контакта в процессе заполнения вязкой стекломассы металлического цилиндра. Получено интегральное уравнение для определения времени образования физического контакта при изменяющихся свойствах стекла в результате непрерывного изменения температуры. Приведено сравнение результатов математического моделирования с экспериментальными исследованиями.

В пятой главе Рассмотрены термодинамические основы процесса стеклования. Предложены модельные представления для теплофизических и механических параметров стеклующихся слоев в интервале стеклования на основе определения структурной температуры. Поставлена и решена краевая задача сложного теплообмена в стеклометаллокомпозите. Сложность при моделировании обусловлена процессом стеклования, индукционным нагревом и учетом излучения на внешней поверхности металла. Приведены результаты математического моделирования для конкретных материалов, геометрии и температурных режимов.

Предложена математическая модель для описания диффузионных процессов сопровождающихся фазовыми переходами. Модель записана в конечно-разностной постановке и представляет модификацию модельных представлений о задачах с фазовыми переходами первого рода (типа Стефана) с новым кинетическим уравнением на границе раздела фаз. Результаты численного моделирования показали качественное и количественное совпадение с экспериментальными данными.

В шестой главе поставлены и решены краевые задачи об эволюции напряженно-деформированного состояния в слоистых конструкционных материалах при повышенных температурах и отжиге с учетом процесса

стеклования и пластического деформирования в разных слоях. Развита метод расчета релаксации напряжений в плоском спале при нанесении стеклующихся покрытий на упругую подложку, с учетом отличающихся от основных материалов свойств зоны соединения. Получены аналитические решения задач о температурных напряжениях для слоистых цилиндрических композитов и сопряженных цилиндрических систем при условии вязкоупругого деформирования одного или нескольких слоев при совместной деформации с упругими слоями.

Предложен численный метод решения термдеформационной задачи о совместном деформировании вязкоупругих стеклующихся и упругопластичных кристаллизующихся материалов.

Рассмотрено условие в рамках гипотезы обобщенного плоского состояния позволяющее учесть условия сопряжения по границам слоев в слоистых цилиндрических композитах: от свободного проскальзывания вдоль оси до идеального контакта, с учетом частичного (ограниченного) проскальзывания по границам соединения.

Научная новизна результатов, полученных в диссертации состоит в основном в следующем:

- при проведении математического моделирования и экспериментальных исследований по получению нового конструкционного материала - стеклометаллокомпозита выявлены закономерности изменения структуры и свойств, особенности деформирования и разрушения при различных видах воздействий: механических, тепловых и химических. Определены оптимальные параметры его технологического процесса получения из определенных материалов;
- построена модель термомеханического поведения слоистых материалов с релаксационными структурными переходами в стеклующихся слоях и пластическом деформировании и фазовых переходах в металлических слоях. Предложено условие частичного проскальзывания на поверхности сопряжения слоев в соосных цилиндрических сопряженных системах при постановке задачи в рамках обобщенного плоского деформированного состояния при температурном воздействии;
- предложены методы численного решения краевых задач механики для слоистых композитов, выполненных из стеклующихся и пластичных материалов при температурной обработке и структурных изменениях с учетом зависимости теплофизических и реологических свойств материалов от температуры;

- решен ряд новых прямых задач об эволюции напряженно-деформируемого состояния, даны рекомендации по выбору технологических параметров получения стеклометаллокомпозитов.

Достоверность и обоснованность научных положений и выводов

Все научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, обоснованы численно и экспериментально. Экспериментальные исследования проводились с использованием сертифицированных и лицензированных устройств. Полученные экспериментальные данные соотносятся с теоретическими расчетами выполненными автором лично. При численных расчетах приведены данные по сходимости на сгущающихся сетках и в сравнении с аналитическими решениями.

Основное содержание диссертации изложено в 34 научных работах, в том числе: 17 публикаций в российских рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК, 4 патента РФ на изобретение, 2 монографии и 1 учебное пособие.

Практическая и теоретическая значимость результатов. Полученные результаты могут служить основой для технологий формирования новых конструкционных материалов на основе стекла и металла, в частности стеклометаллокомпозита. Построенные математические модели позволяют точнее описывать процессы деформирования при решении задач высокотемпературной обработки материалов со структурными изменениями. Получены новые сведения об особенностях структурных изменений в зоне соединения стекла и стали. Показана экономическая эффективность от внедрения стеклометаллокомпозита в гидротехническое направление строительной отрасли. Полученные результаты, методы экспериментальных исследований и математического моделирования могут быть полезны при решении технологических задач по получению стеклюющихся покрытий на упругопластических оболочках и при сварке разнородных материалов.

Соответствие содержания диссертации указанной специальности и требованиям оформления. По методам исследования и направленности диссертация может быть отнесена к физико-математическим наукам. По следующим областям паспорта специальности 01.02.04:

- Постановка и решение краевых задач для тел различной конфигурации и структуры при механических, электромагнитных, радиационных, тепловых и прочих воздействиях, в том числе применительно к объектам новой техники;

- Экспериментальные методы исследования процессов деформирования, повреждения и разрушения материалов, в том числе объектов, испытывающих фазовые структурные превращения при внешних воздействиях;
- Механика композиционных материалов и интеллектуальных материалов и конструкций;
- Математические модели и численные методы анализа применительно к задачам, не допускающим прямого аналитического исследования.

Список замечаний по диссертации и автореферату

1. В работе экспериментально изучается структура зоны соединения, но не приводятся сведения об адгезионной прочности соединения стекла с металлом, этот параметр должен влиять на механические характеристики нового материала.

2. Прочность стекла, определяется как технологическими и остаточными напряжениями, так и микродефектами, возможно на оценку конечных характеристик стеклометаллокомпозита большее значение имел бы учет поврежденности стеклянных слоев.

3. В главах 3,4 приведены таблицы интересных экспериментов, проведенных автором, но там, к сожалению, не всегда указывается количество испытанных образцов. Имеются замечания и к линиям регрессии, где нет величины стандартной ошибки коэффициентов. На графиках 4.33, 4.34 явно видна «сезонная составляющая», накладываемая на прямую линию тренда, но она не выявлена.

4. Не понятно отсутствие конвективных членов, например, в уравнениях (6.7), (6.33), хотя компоненты вектора деформации зависят от времени (6.32).

5. В работе имеются опечатки.

Отмеченные недостатки не снижают общей положительной оценки работы и не ставят под сомнение основные выводы диссертации.

Заключение

Диссертация «Стеклометаллокомпозит: механические свойства, структурные механизмы деформации при повышенных температурах, моделирование процессов формирования структуры и свойств» является законченной научно-квалификационной работой, выполненной на высоком научном уровне в которой разработаны теоретические основы и практические рекомендации по получению нового

конструкционного материала-стеклометаллокомпозита. Полученные новые результаты имеют важное теоретическое и прикладное значение. Результаты работы хорошо опубликованы и апробированы, автореферат полно и правильно отражает ее основное содержание и выводы.

Диссертация соответствует требованиям п.п. 9-14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» (постановление Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 в редакции от 01.10.2018 г.), а ее автор - Любимова Ольга Николаевна - заслуживает присуждения ей ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.04 - Механика деформируемого твердого тела.

Официальный оппонент:

заведующий кафедрой информационных экономических систем
Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования «Сибирский государственный университет науки и
технологий имени академика М.Ф. Решетнева»,
профессор по кафедре математического моделирования в механике,
доктор физико-математических наук по специальности 01.02.04 - Механика
деформируемого твердого тела

06.03.2021 С С

Сенашов Сергей Иванович

Почтовый адрес: 660037, г. Красноярск, проспект
им. газеты «Красноярский рабочий», д. 31, а/я 1075

Телефон: +7 (391) 264-00-14

E-mail: sen@mail.sibsau.ru

Веб-сайт ФГБОУ ВО СибГУ им. М.Ф. Решетнева: <https://sibsau.ru>

подпись Сенашова С.И.
заверено
Проректор по НИИ

Ю.Ю. Лошнов

