

ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора физико-математических наук,
профессора Князевой Анны Георгиевны
на диссертационную работу Любимовой Ольги Николаевны
**«Стеклометаллокомпозит: механические свойства,
структурные механизмы деформации при повышенных температурах,
моделирование процессов формирования структуры и свойств»,**
представленную на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук по специальности
01.02.04 – механика деформируемого твердого тела.

Диссертационная работа Любимовой Ольги Николаевны посвящена всестороннему исследованию стеклометаллокомпозитов, изучению их свойств, особенностей соединения с металлами. Работа является комплексной, включает как экспериментальные исследования, так и моделирование разнообразных сопутствующих явлений. Стеклометаллокомпозиты – пример конструкционных композиционных материалов с уникальным комплексом свойств и многообразием функциональных назначений. Свойства композиционных материалов зависят от составляющих их компонентов, количественного соотношения и особенностей соединений и контактов между ними, могут сочетать в себе как свойства составляющих, так и приобретать в процессе изготовления особые уникальные свойства, которыми составляющие не обладают.

Актуальность исследования обусловлена как необходимостью разработки новых материалов с уникальными свойствами, так и поиском путей усовершенствования их свойств и изучением возможностей применения в разных сферах. Несмотря на то, что стеклометаллокомпозиты появились достаточно давно, до сих пор остаются недостаточно исследованными их свойства в зависимости от конкретных условий изготовления, механизмы формирования контактов между составляющими, механизмы формирования остаточных напряжений в них и др.

Результаты исследования важны как для оптимизации существующих технологий изготовления стеклометаллокомпозитов, для расширения сферы их применения так и для расширения представлений о механизмах формирования свойств композиционных материалов.

Цель диссертационного исследования Любимовой О.Н. состоит в разработке научных основ направленного синтеза нового слоистого конструкционного материала – стеклометаллокомпозита

Для достижения поставленной цели автором были решены следующие задачи:

1. Осуществлено комплексное исследование многостадийного процесса получения стеклометаллокомпозита. Среди них экспериментальные исследования физико-химических процессов в зоне соединения стекла и стали и изучение влияния физико-химических процессов на структуру и свойства стеклометаллокомпозита.
2. Проведены экспериментальные исследования влияния наиболее важных факторов в технологии получения композитов: температуры, скорости нагрева и охлаждения, методов дополнительной химической обработки и времени выдержки при максимальной температуре на механические свойства стеклометаллокомпозита.
3. Разработаны математические модели и новых алгоритмы 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. Проанализированы возможности прогнозирования изменений свойств стеклометаллокомпозита при модификации материалов, входящих в его состав.
5. Обоснованы области применения стеклометаллокомпозита.

Диссертационная работа Любимовой О.Н. «Стеклометаллокомпозит: механические свойства, структурные механизмы деформации при повышенных температурах, моделирование процессов формирования структуры и свойств» состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы. Текст работы изложен на 337 страницах. Диссертация содержит 221 рисунок и 51 таблицу. Список использованной литературы включает 290 наименований работ российских и зарубежных авторов.

Во введении сформулированы основные положения, выносимые на защиту, научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

Первая глава диссертации содержит информацию об особенностях влияния различных дефектов на прочность стекла и его прочностных свойствах. Указывается, что прочность силикатного стекла после удаления поверхностных дефектов выше, чем прочность сталей наиболее популярных марок. В разделе описаны основные методы упрочнения стекла, дан краткий обзор существующих технологий изготовления слоистого стеклометаллического композиционного материала. Выделены методы баллонизации и центробежного литья. Отмечено, что многие теоретические задачи, сопутствующие решению технологических задач по изготовлению стеклометаллокомпозитов, являются фундаментальными проблемами в науке. Далее выбран объект исследования - стеклометаллокомпозитные стержни, которые могут представлять самостоятельный практический интерес, как армирующие элементы в гидротехническом строительстве.

Описаны особенности метода пайки стекла и металла с использованием косвенного и индукционного нагрева. Подчеркнуто, что технология получения СМК стержней методом пайки включает этапы, каждый из которых требует отдельного теоретического и экспериментального изучения. Проанализированы имеющиеся теоретические подходы к объяснению процессов, происходящих на границе соединения стекла и металла. Проанализированы основные технологические условия (параметры), определяющие свойства соединения (температура, давление, время выдержки, режим отжига, химический состав). Описано оборудование, применяемое при проведении экспериментальных исследований. В разделе 1.3. описаны характеристики диффузионной зоны и возможные механизмы ее формирования при разных режимах получения соединения стекло-сталь. В разделе 1.4. сформулированы задачи исследования.

Вторая глава диссертации посвящена описанию практической значимости проблемы соединения стекла с металлом. Как перспективная область применения стеклометаллокомпозитной арматуры рассматривается гидротехническое строительство, где до сих пор арматура из стали остается самым популярным материалом. Для обоснования применимости стеклометаллокомпозитной арматуры решены ряд задач. Осуществлен анализ свойств и эксплуатационных характеристик изделий из бетона со стеклометаллокомпозитной арматурой и поэтапное моделирование композиционных конструкций. Проанализировано напряженно-деформируемое состояние в балке и плите из бетона, армированного стеклометаллокомпозитом. Задавались разные условия закрепления и нагружения. На первом этапе моделировались механические свойства ячеек периодичности (повторяющихся элементов структуры бетона), которые были определены в форме кубиков, армированных одним и двумя стержнями из стеклометаллического композита. Материал рассматривался как ортотропный. Эффективные характеристики мезоэлементов находились из численных экспериментов по одноосному сжатию и чистому сдвигу. Далее в программной среде ANSYS рассчитывается упругое напряженно-деформированное состояние балочной сваи и плиты для разных вариантов закрепления и приложения нагрузки. На основе анализа численных расчетов замечено, что бетонные изделия, армированные СМК, по прочности не уступают бетонным изделиям, армированным сталью. Однако существенного повышения прочностных характеристик обнаружено не было. Далее осуществлено экспериментальное исследование поведения бетонной балки, армированной стеклометаллокомпозитом. Подтверждено теоретически прогнозируемое поведение бетонной балки, армированной СМК. С целью выявления областей с максимальной интенсивностью напряжений моделировалось упругое поведение балки при нагружении до средней экспериментальной нагрузки, при которой появлялась первая трещина. Подобные теоретические и экспериментальные исследования проведены и для плит. Выяснено, что определяющей является нагрузка, при которой

бетонная шпунтовая свая, армированная стеклометаллокомпозитом, теряет несущую способность. В рамках выполнения ФЦПИР «Разработка технологии изготовления нового композиционного материала стеклометаллокомпозита, как перспективного материала на основе стекла для решения актуальных задач индустрии наноматериалов» проведено экономическое обоснование актуальности применения стеклометаллокомпозита. Дан сравнительный анализ стальной и композитных арматур. Сделан вывод, что наиболее эффективным является армирование СМК в бетонных конструкциях, работающих на сжатие, сжимающие напряжения в шпунтовой плите и шпунтовой сваи в среднем, более чем на 20% меньше, чем для аналогичных бетонных изделий, армированных сталью.

Третья глава диссертации посвящена всестороннему анализу механических и физико-химических свойств стеклометаллокомпозитного стержня на основе стекла и стали, а также выделению оптимальных параметров технологии его получения с целью улучшения свойств стеклометаллокомпозита. В параграфе 3.1 представлены результаты определения микротвердости и модуля упругости поверхности шлифа стеклометаллокомпозита (переходной зоны и композита в целом). Выяснено, что стекло, содержащее оксиды железа, и основное стекло имеют одинаковые модули упругости, но отличаются по значениям микротвердости на 30 % в зоне соединения, которая является железосодержащим стеклом. Сделан вывод о том, что в стеклянном слое в составе стеклометаллокомпозита внутренние напряжения более высокие, чем в обычном закаленном стекле. Отмечено, что результаты измерения микротвердости и модуля упругости при индентировании не позволяют однозначно утверждать о существенном изменении свойств стекла в составе стеклометаллокомпозита. В разделе 3.2 осуществлены статические испытания стеклометаллокомпозитных стержней (одноосное растяжение, сжатие, трехточечный изгиб, кручение). Экспериментальные исследования микротвердости и механического поведения при одноосном растяжении одновременно с экспериментальными исследованиями технологических режимов и контроле качества зоны соединения позволили оптимизировать технологические режимы. При одноосном растяжении установлено, что условная диаграмма для образцов стеклометаллокомпозита аналогична диаграмме деформирования металлов при одноосном растяжении. Проведены исследования стеклометаллокомпозита на ударную вязкость и усталостную прочность, а также исследования стержней на коррозионную стойкость с трением. Для последних испытаний была спроектирована и изготовлена специальная установка. Замечено, что скорость истирания у композиционных стержней и стали на начальных стадиях примерно одинакова, однако после того как на стеклометаллокомпозитном стержне остается металлическая оболочка скорость изменения массы у стальных образцов сохраняется, а у образцов СМК понижается и стремится к нулю.

При исследованиях стеклометаллокомпозитных стержней на термическую прочность подчеркнуто, что известные приближенные формулы для оценки термостойкости стекол не способны описать влияние таких механических свойств, как модули упругости и коэффициенты линейного температурного расширения. Экспериментальные исследования термостойкости СМК проводились методом косвенного нагрева и резкого охлаждения.

Четвертая глава диссертации посвящена математическому моделированию особенностей термомеханического поведения образцов в разных технологических условиях изготовления. Сформулированы и решены задача об описании эволюции термоапрессированного состояния для двух- и трехслойного цилиндрического СМК при получении методом центрифугирования с учетом проплавления и кристаллизации внешних металлических слоев и задача о формировании стеклометаллокомпозитных стержней и цилиндров методом запрессовки при нагреве вязкой стекломассы в жесткой трубке или между жесткими оболочками до образования физического контакта.

В первой модели (сформулированной в несвязанной постановке) изучаются технологические напряжения, сопутствующие нагреву и локальному плавлению стеклометаллокомпозита для цилиндрической формы, состоящего из двух или трех слоев. Отсутствие связности позволяет автору разбить задачу на две – тепловую задачу и задачу об определении характера НДС. Автор предлагает свой алгоритм задачи о плавлении-затвердевании, который сводится к введению подвижного объемного источника и стока тепла, положение которого связывается с границей раздела фаз. При решении задач о проплавлении металлического слоя при сварке плавлением стекла и металла через промежуточный слой и об остекловывании металлических оболочек методом центрифугирования изучено поведение границ раздела фаз в зависимости от условий. Термомеханическая задача об определении технологических и остаточных напряжений при получении стеклометаллокомпозита методом плавления промежуточного слоя формулировалась как эволюционная граничная задача для растущего тела. Принималось, что при охлаждении слоистого материала происходит непрерывное изменение объема и массы твердой фазы в отдельных расплавляющихся и затем кристаллизующихся слоях. Перемещения считались малыми, накопленная пластическая деформация для всех напряженных состояний определялась одной функцией интенсивности деформаций и температуры. На границе растущей твердой фазы учитывались структурные деформации, которые связывались с давлением жидкой фазы. Задача о плоской деформации формулировалась в перемещениях и решалась численно. Подобный алгоритм использован и при решении задачи определения технологических и остаточных напряжений при получении методом остекловывания металлических оболочек при центрифугировании.

Раздел 4.2. посвящен моделированию процесса соединения стекла и металла методом пайки. Используется гидромеханический подход. Задача формулируется так, чтобы приблизить постановку к известной задаче Рейнольдса в гидромеханике. Такая задача (задача об определении времени образования физического контакта в цилиндре большого радиуса и малой высоты, состоящем из внешнего металлического цилиндра и внутреннего стеклянного) в первом приближении решается аналитически. Аналитические оценки автор получает и при учете зависимости вязкости от температуры. Для апробации модели проведена серия экспериментальных исследований по специально разработанной методике. Определялась величина усадки и время, за которое происходит заполнение стеклом свободного объема в металлическом цилиндре. Даны оценки величины свободного объема, связанного с величиной на которую изменяется толщина деформируемого слоя в процессе заполнения объема, осуществлены экспериментальные измерения усадки стекла с помощью микрометра часового типа с учетом изменения линейных размеров штока при температурной обработке. Проведена статистическая обработка результатов измерений.

В пятой главе теоретически изучалась эволюция напряженно-деформируемого состояния при получении стеклометаллокомпозита с учетом структурных изменений при стекловании. В работе на основе анализа литературных данных обоснован выбор подхода к математическому моделированию структурной и механической релаксации в стеклюющих слоях стеклометаллокомпозита в рамках релаксационной теории стеклования. Изложены основные этой теории, выделены основные параметры определяющие изменение свойств стекла в процессе стеклования. В разделе 5.2. предпринята попытка объяснения термодинамического смысла подхода к описанию изменения свойств стекла при стекловании с помощью структурного параметра. Далее автором предлагается математическая модель теплообмена в стеклометаллокомпозитах с учетом стеклования. Разделяя процесс отжига на три последовательные стадии, автор подчеркивает, что именно при охлаждении стекло проходит через температурный интервал стеклования, и учитывает этот факт в математической модели процесса. Численно реализованы частные задачи о косвенном нагреве и охлаждении с разными скоростями стеклянного цилиндра бесконечной длины; стеклянной толстой стенки; стеклянного цилиндра конечной длины; тонкой стеклянной панели, а также последовательного индукционного нагрева и охлаждения с последующим отдельным отжигом

В шестой главе автор поставил задачу математического моделирования эволюции напряженно-деформируемого состояния при получении стеклометаллокомпозита, с учетом структурных изменений при стекловании. Учитываются диффузионные процессы на границе соединения, структурные изменения в стекле в интервале стеклования, структурная и механическая релаксация в стекле и пластическое течение металла, сопутствующие технологии изготовления. В том числе, решена краевая задача об эволюции

напряженно-деформированного состояния при отжиге плоского спая стекла с металлом с учетом структурной релаксации с учетом наличия в зоне соединения новых фаз в стекле (раздел 6.2). При моделировании напряженно-деформированного состояния в плоских стеклометаллокомпозитах был использован метод расчета в стекле термических напряжений в плоских спаях, основанный на предположениях об однородности температурного поля во всем спае и напряжений и деформаций в каждом спаиваемом элементе. Определен температурный интервал, на котором возможны структурные и механические релаксационные процессы. Использованный метод позволяет анализировать основные параметры процесса отжига: верхнюю и нижнюю температуры отжига, скорость изменения температуры от верхней до нижней температуры отжига, время выдержки при нижней температуре отжига, влияние структурных, механических параметров и размеров диффузионной зоны на эволюцию напряжений в плоском спае. В разделе 6.3 аналитически решена одномерная задача о релаксации механических напряжений в длинных цилиндрических спаях стекла с металлом. Задача проанализирована для разных условий нагрева, типичных для разных технологий получения спаев. Автор использует последовательные приближения, операционный метод. В разделе 6.4. описывается алгоритм численного расчета механических напряжений в совместно деформируемой сопряженной системе с учетом релаксации напряжений в стекле и пластического деформирования в металле, построенный в рамках подходов релаксационной теории. Алгоритм включает несколько этапов, каждый из которых зависит от предыдущего. Метод по своей сути является дискретным, однако показывает хорошую сходимость к аналитическому решению, полученному при решении термовязкоупругой задачи. Делается вывод о том, что полученные аналитические решения имеют самостоятельную практическую значимость в задачах о технологических и остаточных напряжениях при температурной обработке в процессе нанесения вязкоупругих стеклянных, керамических и полимерных покрытий на упругих подложках. В разделе 6.5. описывается метод определения температурных напряжений в соосных сопряженных цилиндрических системах и материалах, позволяющий понизить размерность задачи и одновременно учесть возможность деформаций в определенном направлении на границе сопряжения разных слоев, деформирующихся в условиях повышенных температур.

В заключении диссертации сформулированы основные результаты и выводы работы.

Новизна диссертационного исследования заключается в следующем.

(1) Получен новый конструкционный и функциональный материал на основе неорганического стекла и малоуглеродистой стали и обоснована

практическая применимость СМК-стержня как армирующего элемента в бетонных конструкциях для строительной отрасли.

(2) Получены новые данные о физико-химических процессах и структурных изменениях, происходящих при спайвании 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) Разработана новая феноменологическая модель термомеханического поведения слоистых материалов с релаксационными переходами для описания технологических и остаточных напряжений в СМК при термических воздействиях

(5) Разработаны и верифицированы алгоритмы для численного решения краевых задач механики слоистых композитов, выполненных из стеклюющихя и пластичных материалов, при температурной обработке и структурных изменениях в зоне соединения стекла и металла.

Научная и практическая значимость работы определяется разработкой единого подхода к количественному описанию изменений свойств СМК при произвольных сочетаниях термических и механических воздействий. Диссертационная теоретико-экспериментальная работа отличается ярко выраженной практической направленностью. 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. Возможные области практического применения стеклометаллокомпозитов - использование более дешевой композитной арматуры, возможно замещение чугуна.

Достоверность результатов исследований обеспечивается корректным использованием методов экспериментальных исследований, методов планирования эксперимента и статистической обработки; использованием классических подходов механики сплошных сред; сравнением результатов моделирования с экспериментальными исследованиями и результатами классических решений механики деформируемого твердого тела.

Диссертационная работа и автореферат написаны с использованием принятой научной терминологии. Автореферат отражает наиболее важные моменты диссертационной работы и полностью ей соответствует. Оформление авторефера отвечает требованиям положения ВАК РФ.

Основные результаты диссертации достаточно полно представлены в более чем в 50 опубликованных печатных работах, в том числе в 2 монографиях и 1 учебном пособии, написанных в соавторстве с аспирантами, работающими под руководством Любимовой О.Н. Из них 15 работ из списка

ВАК , 9 работ проиндексированы в базах данных Web of Science и Scopus, 4 патента РФ на изобретение. Результаты неоднократно обсуждались на международных и всероссийских научных конференциях.

По диссертации возникли следующие замечания и вопросы:

1. Недостаточен анализ современной англоязычной литературы по теме исследования.
2. Проблема соединения разнородных материалов, в том числе, керамик со сталью, известны и далеко не решена. Например, в 2000-е годы в литературе большое внимание уделялось разработке соединений кубического нитрида бора со сталью и сплавами. В некоторых случаях проблема решалась выбором подходящих припоев, содержащих элементы, способствующие формированию диффузионных слоев. Хотелось бы видеть, в чем состоит отличие проблемы с той, которая обсуждается в работе.
3. Математическому моделированию процесса отжига и расчету сопутствующих остаточных напряжений посвящено достаточно много работ. Часто для оценки напряжений используются сопряженные задачи термоупругости, примеры которых содержатся в [В.А. Кудинов, Э.М. Карташов, В.В. Калашников Аналитические решения задач тепломассопереноса и термоупругости для многослойных конструкций: учеб. Пособие для вузов.-М.: Выш. Шк., 2005-430 с.: ил]. Полезно было бы сравнить выводы о характере напряжений, следующие из простых моделей, и из моделей, учитывающих неупругие деформации.

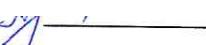
Указанные замечания имеют частный характер и не умаляют общей положительной оценки диссертационной работы, качества проведенных исследований, ее научную и практическую ценность.

Рекомендации по использованию. Предложенные в диссертации экспериментальные методики, модели и численные алгоритмы могут быть рекомендованы к использованию в лабораториях, проводящих изучение способов получения и свойств композиционных материалов, а также в соответствующих учебных заведениях: в Пермском государственном техническом университете, в Институте механики сплошных сред УрО РАН, в Институте гидродинамики СО РАН, в Томском политехническом университете, в Институте теоретической и прикладной механики СО РАН, МВТУ им. Баумана и др..

Таким образом, диссертация Любимовой О.Н. является завершенной научно-квалификационной работой, в которой разработаны теоретические основы синтеза и изучены свойства нового конструкционного материала -

стеклометаллокомпозита, что позволяют сделать вывод о том, что разработано крупное научное достижение, заключающееся в новом подходе к конструированию слоистых композитов на основе неорганических стекол и металлов. По важности решаемых задач, уровню развитых подходов и полученных выводов исследование Любимовой Ольги Николаевны соответствует всем требованиям п.п. 9-14 «Положения о порядке присуждении ученых степеней» (постановление Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 в редакции от 01.10.2018 г.), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук. Автор диссертационной работы «Стеклометаллокомпозит: механические свойства, структурные механизмы деформации при повышенных температурах, моделирование процессов формирования структуры и свойств» достойна присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.04 – механика деформируемого твердого тела.

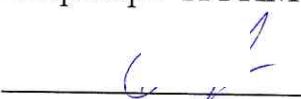
Официальный оппонент,
доктор физико-математических наук (01.02.04 и 02.04.07), профессор,
главный научный сотрудник Института физики прочности и
материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук

 Князева Анна Георгиевна
01 марта 2021 г.

Телефон: +7-3822-286-831
E-mail: anna-knyazeva@mail.ru

 Подпись Князевой Анны Георгиевны удостоверяю.

Матолыгина Н.Ю., Ученый секретарь ИФПМ СО РАН

 Матолыгина Н.Ю.

 Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт физики прочности и материаловедения
Сибирского отделения Российской академии наук (ИФПМ СО РАН)
Адрес: 634055, г. Томск, просп. Академический, 2/4
Телефон организации : +7 (3822) 49-18-81 Факс: +7 (3822) 49-25-76.
E-mail: root@ispms.tomsk.ru
Адрес оф.сайта: <http://www.ispms.ru/ru/main/more>