

«УТВЕРЖДАЮ»

Ректор ВолгГТУ,

академик РАН

Лысак Владимир Ильич



«18» апреля 2017 г.

О Т З Ы В

**ведущей организации — Волгоградского государственного
технического университета (ФГБОУ ВО "ВолгГТУ")**
на диссертационную работу Солоненко Элеоноры Павловны
«Моделирование напряженного состояния в стеклометаллокомпозитных
материалах при температурной обработке»,
представленную на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук по специальности
01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела.

Актуальность работы

Ряд уникальных и практически ценных свойств стекла (прозрачность, высокая коррозионная стойкость, твердость, абразивоустойчивость) ставят этот материал в один ряд с наиболее перспективными современными материалами не только в традиционных для него областях строительной, химической, медицинской, пищевой промышленности, общего машиностроения, электроники и т. д., но и для специфических приложений, в том числе связанных с созданием стеклометаллических композиций (например, остеклованные сосуды и трубы для нефтяной, химической, атомной промышленности, многослойные стеклометаллокомпозитные корпуса глубоководных аппаратов и др.). При этом эффективность практического

применения таких композитов связана с теоретическим и экспериментальным обоснованием технологических приемов реализации высокой теоретической прочности стекла, получения бездефектных границ, обеспечения качественного соединения с металлом, формирования благоприятных остаточных напряжений.

Для решения подобных задач требуется, в том числе, разработка современных адекватных математических моделей напряженно-деформированного состояния и механического поведения сложных многослойных композиций в условиях интенсивных технологических воздействий с учетом существенно различающихся структуры и физико-механических характеристик составляющих, наличия переходных областей с изменяющимися в ходе получения и обработки композита геометрией и свойствами, неидеальных условий контакта и сцепления слоев и т. д.

Сегодня существует богатая библиография работ, посвященных теоретическим и прикладным вопросам получения и использования спаев стекла и керамики с металлами, в том числе, отечественных ученых: в области физико-химических процессов формирования соединений — работы Преснова В.А., Новодворского Ю.Б., Казакова Н.Ф., Бачина В.А., Любимова М.Л.; в области теории стеклования — Мазурина О.В., Бартенева Г.М., Тропинина Т.В., Аксенова В.Л.; в области исследования напряженного состояния и механических характеристик спаиваемых материалов — Мазурина О.В., Старцева Ю.К., Бачина В.А., Пикуля В.В., Позднякова В.А., Гончуковой Н.О., Жорник В.А. и др.

Однако число публикаций, в которых рассматривалось бы полномасштабное математическое моделирование спаев стекла с металлом в процессе их получения, последующей обработки (например, при закалке, отжиге и т. д.) и эксплуатационного нагружения с учетом специфических особенностей структуры и механического поведения соединяемых материалов крайне ограничено. Как правило, существующие подходы к решению указанных задач завязаны на аналитические модели с упрощенным представлением конфигурации рассматриваемых тел (решения без учета

реальной конфигурации изделия), граничных условий на стыке областей (решения без учёта частичного проскальзывания контактирующих слоев) и реологических свойств компонент композиции при высоких температурах (решения без учета переходных зон в области смятия и релаксационных процессов в материалах композиции при высоких температурах).

В этой связи диссертационная работа Солоненко Элеоноры Павловны посвящена моделированию процесса отжига нового композитного материала — стеклометаллокомпозита (СМК) и оценке термических напряжений в его компонентах с учетом меняющейся вязкости в стекле и наличия диффузионного слоя на границе раздела с металлом, представляется весьма своевременной и актуальной.

Новизна исследования, полученных результатов, выводов и рекомендаций

В диссертации Солоненко Э.П. выполнены оригинальные исследования по разработке и анализу методов расчета эволюции технологических и остаточных напряжений в многослойных стеклометаллокомпозитах цилиндрической формы при нестационарных термических воздействиях (характерных для процессов отжига рассматриваемых изделий), с учетом релаксационных эффектов во взаимодействующих материалах при высоких температурах, а также строения и свойств зоны соединения стекла и металла.

В диссертационном исследовании автором впервые разработан комплекс аналитических и численно-аналитических методик расчета напряженно-деформированного состояния двух- и трехслойного композитного полого цилиндра, составленного из чередующихся слоев стали и стекла, в процессе его термической обработки с учетом релаксации напряжений в стекле и степени сцепления составляющих на границе раздела.

В рассмотрение дополнительно вводится переходная (диффузионная) зона, формирующаяся между слоями стекла и металла при высоких температурах, для которой автором предложены условия назначения ее теплофизических и механических характеристик и разработана методика их

учета при построении аналитических и дискретных методов расчета напряжений в исследуемом СМК.

Впервые получены и описаны результаты расчета технологических и остаточных напряжений в объеме стеклометаллокомпозита в ходе его отжига с анализом степени влияния указанных выше особенностей задачи (учет релаксации напряжений в стеклянном слое, влияние толщины и диффузионной зоны на границе «стекло–сталь», влияние степени сцепления слоев) на величину технологических и остаточных напряжений. Подобный анализ также проведен для напряженного состояния двухслойных и трехслойных стеклометаллокомпозитов при высоких скоростях охлаждения с учетом реологических свойств стеклянного слоя.

Практическая значимость результатов исследования

Диссертационное исследование имеет выраженную практическую направленность и значимость в приложениях к задачам управления структурой и свойствами современных композиционных материалов при их получении и обработке:

– при разработке и оптимизации технологии изготовления новых перспективных композиционных материалов на базе стекла и металла в области судостроения (корпуса глубоководных аппаратов, тяжелое судостроение и т.д.), строительных конструкций (высокопрочная, коррозионностойкая арматура), химического и общего машиностроения, добывающих производств, электроники и в других приоритетных областях промышленности;

– при разработке методик расчетно-экспериментального определения и анализа физико-механических характеристик сварных соединений, спаев, покрытий, слоев, пленок и т. д. из существенно разнородных материалов (металл — пластик, металл — стекло, стекло — пластик, аморфное покрытие — металл и т.п.);

– при разработке аналитических и численно-аналитических методов решения прямых (по определению напряженного состояния сопряженных материалов) и обратных (идентификация неизвестных механических

характеристик отдельных составляющих; установление оптимальных режимов технологических воздействий при обработке и т. д.) задач.

Разработанные рекомендации по постановке и решению задач выделенного класса, обоснованию допущений, а также особенностей и условий, требующих учета при моделировании, могут использоваться в расчетной практике при моделировании механического поведения слоистых композиционных материалов.

Результаты работы используются сегодня в практической деятельности Лаборатории стеклометаллических композиционных материалов при разработке и внедрении новых перспективных композиционных материалов на базе стекла и металла с различной геометрией исполнения. Практическая апробация результатов теоретических разработок и внедрение исследуемых композиционных материалов в настоящее время ведутся: на ЗАО НПО «Порт» (г. Владивосток) — применительно к гидротехническим сооружениям; в Арсеньевской авиационной компании «Прогресс» им. Н.И.Сазыкина (г. Москва) — в авиастроительном комплексе; в ООО Научно-производственное предприятие «Металл-Композит» (г. Ульяновск) и других предприятиях и научных центрах Российской Федерации.

Общее содержание и структура диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключений и списка литературы, содержащего 158 наименований. Текст работы изложен на 152 страницах. Диссертация содержит 65 рисунков и 4 таблицы.

Во введении дается литературный обзор базовых подходов и современного состояния проблем в области технологии и физики спаев стекла с металлами и расчетных моделей определения механических характеристик спаиваемых материалов.

В первой главе представлены технологии изготовления рассматриваемых стекломатериалов (листового и цилиндрического СМК) и результаты изготовления экспериментальных стеклометаллокомпозитных образцов. Далее представлены основные этапы физической и математической

постановки задачи, включая: постановку задачи определения температурного поля в композите на стадии охлаждения в ходе отжига; постановку краевой задачи определения вязкоупругих напряжений в слоистых материалах со структурой и свойствами составляющих, зависимыми от термической предыстории. Приводится анализ основных методов решения поставленных задач.

Во второй главе автор описывает численный алгоритм решения температурной задачи локально-одномерным методом с помощью неявной схемы. Приведено решение деформационной задачи в упругой области с учетом переходного слоя в стекле. Рассмотрен численный метод расчета вязкоупругих напряжений для плоского и цилиндрического сая. Проведен расчет напряжений в двухслойном материале с учетом релаксационных процессов. Проведено сравнение результатов расчета напряжений, полученных из аналитического решения и дискретным методом.

В третьей главе приведен расчет напряженного состояния слоистого композита в зависимости от степени сцепления слоев, задаваемой коэффициентом сцепления (проскальзывания) в выражениях для осевых деформаций на границе раздела слоев. Приводятся результаты решения указанной задачи в упругой и в вязкоупругой постановках в процессе остывания СМК при различных значениях коэффициента проскальзывания слоев.

В четвертой главе разработанные модели используются для определения напряжений в двух и трехслойных СМК при больших скоростях охлаждения на примерах решения задач охлаждения двухслойной оболочки (стекло-металл), трехслойной оболочки (металл-стекло-металл), а также расчета термостойкости сплошных и полых СМК стержней.

В целом следует отметить, что работа написана технически грамотным языком, хорошо вычитана и аккуратно оформлена. Содержание автореферата соответствует тексту диссертации, отражает ее основные идеи и выводы.

Замечания по диссертационной работе

В основу диссертационного исследования Солоненко Э.П. положена идея разработки аналитических и полуаналитических методов (удобных для теоретического анализа и инженерной практики) решения проблемы описания эволюции напряженно-деформированного состояния композитного тела, включая определение технологических и остаточных напряжений, в ходе его термической обработки. Это потребовало от автора введения ряда упрощений, например, принятия гипотез о постоянстве большинства теплофизических и механических характеристик материалов, отказа от исследования краевых эффектов в цилиндрических СМК сосудах (которые могут играть существенную роль при формировании напряженно-деформированных состояний в реальных изделиях) и др. В силу этого возникает необходимость исследования и описания областей применимости предложенных моделей, убедительного расчетно-экспериментального обоснования принятых допущений и выделения характерных технических объектов и эксплуатационных условий их нагружения, для которых разработанные методы расчета и принятые гипотезы оправданы. Поскольку на часть этих вопросов мы не нашли ответа в тексте диссертации, выскажем их в форме следующих замечаний.

1. В диссертации отсутствует обоснование областей применимости используемых в работе моделей механического поведения материалов, составляющих стеклометаллокомпозит, при интенсивных термических воздействиях. В рассмотренных задачах использовался линейный упругий, либо вязкоупругий (для стекла) расчет в предположении малых деформаций. При этом за рамками исследования остались, например, эффекты пластичности и ползучести (в том числе, металлической части композиции), анализ их роли в формировании общей картины технологических и остаточных напряжений при длительных высокотемпературных воздействиях (характерных для исследуемых процессов отжига стеклометаллокомпозита), а также температурные интервалы проявления обсуждаемых механических эффектов в столь разнородных материалах, как сталь и стекло. Насколько оправданы такие

допущения в плане достоверности качественной картины, количественной погрешности получаемых результатов и трудоемкости требуемых вычислительных операций?

2. Как нам показалось, в работе недостаточно полно использован потенциал численных методов как в плане учета особенностей решаемой задачи при построении собственных численных моделей рассматриваемых процессов, так и в плане верификации полученных результатов на основе их сопоставления с расчетными данными, полученными, например, при помощи современных конечно-элементных комплексов.

Например, при построении автором конечно-разностной модели тепловых полей и дискретного метода расчета напряжений с учетом релаксационных процессов при отжиге СМК большая часть теплофизических и механических характеристик полагались постоянными за исключением (по одной из компонент композита) удельной теплоемкости, коэффициента теплового расширения, вязкости. Обоснования таких допущений не приводятся.

С другой стороны, отсутствует какой-либо сопоставительный верификационный анализ результатов полученных при помощи разработанных в диссертации методов с аналогичными расчетами на основе альтернативных подходов, экспериментальных исследований, литературных данных и т.д. Возможно ли оценить достоверность полученных в диссертации результатов о распределении температурных полей, полей остаточных напряжений, механическом поведении рассматриваемого стеклометаллокомпозита?

3. Важной особенностью разработанных в диссертации моделей является учет структуры, свойств и влияния на качество сцепления слоев переходной (диффузионной) зоны на границе раздела стеклянных и металлических слоев. Однако в работе не приводится методик определения или обоснований параметров этой зоны (размеров, теплофизических и механических характеристик) и их эволюции на различных стадиях отжига.

4. Некоторая техническая неясность у нас возникла при попытке сопоставить выражения для осевых деформаций ε_{zz} (2.11), (2.17) с принятой чуть выше (на стр.63) гипотезой о плоском деформированном состоянии.

Данные замечания в целом не снижают научного уровня диссертационной работы и значимости полученных результатов, а скорее подчеркивают сложность решаемой задачи, большой объем необходимых исследований и перспективность избранного автором научного направления.

Заключение

Диссертация Солоненко Э. П. «Моделирование напряженного состояния в стеклометаллокомпозитных материалах при температурной обработке» является завершенной научно-квалификационной работой, в которой методами механики деформируемых сред дано решение актуальной задачи моделирования механических свойств нового композитного материала при температурных воздействиях с учетом упругого и релаксационного поведения его составляющих, имеющей важное значение для приоритетных областей промышленности России.

Работа выполнена на высоком научном уровне, содержит новые результаты, обладающие теоретической и практической ценностью и опубликованные в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях (всего 12 работ, из них: 2 статьи в изданиях, определенных ВАК Минобрнауки России, 1 статья в журнале индексируемом в *Scopus* и 1 зарегистрированная программа для ЭВМ).

Диссертация соответствует паспорту специальности 01.02.04 — механика деформируемого твердого тела, а по объему и содержанию отвечает требованиям Положения ВАК РФ о порядке присуждения научным и научно-педагогическим работникам ученых степеней, предъявляемым к кандидатским диссертациям. Ее автор, Солоненко Элеонора Павловна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 — механика деформируемого твердого тела.

Отзыв обсужден и утвержден на расширенном заседании кафедры сопротивления материалов Волгоградского государственного технического университета 23 марта 2017 г. Протокол № 7.

доктор технических наук (специальность 01.02.04 – механика деформируемого твердого тела), профессор, академик Академии инженерных наук РФ, Заслуженный работник высшей школы РФ, профессор кафедры сопротивления материалов Волгоградского государственного технического университета

_____ Багмутов Вячеслав Петрович

доктор технических наук (специальность 01.02.04 – механика деформируемого твердого тела), доцент, заведующий кафедрой сопротивления материалов Волгоградского государственного технического университета

_____ Захаров Игорь Николаевич

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волгоградский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «ВолГТУ»).
400005, г. Волгоград, проспект им. В.И. Ленина, д. 28.
Официальный сайт: <http://www.vstu.ru/>
Телефон: 8 (8442) 23-00-76,
e-mail: rector@vstu.ru.