

О Т З Ы В

официального оппонента

на диссертационную работу Морковина Андрея Витальевича
«Структурно-деформационные процессы в зоне соединения стекла
и стали при получении стеклометаллокомпозита»,
представленную на соискание ученой степени
кандидата технических наук по специальности
01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела.

Актуальность работы

Стеклометаллические композитные материалы благодаря ряду уникальных и практически ценных свойств стекла (высокая химическая, коррозионная, тепловая и радиационная стойкость, твердость, абразивоустойчивость и др.) находят все более широкое применение в перспективных, современных и ответственных приложениях, например, при изготовлении остеклованных сосудов и труб для нефтяной, химической, атомной промышленности, многослойных стеклометаллокомпозитных корпусов 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 проведение масштабных экспериментальных исследований (включая микроструктурный анализ, оценку микротвердости, остаточных напряжений, механические испытания) с выявлением закономерностей и механизмов формирования параметров структуры и свойств составляющих стеклометаллокомпозита в зависимости от режимов его получения и последующего нагружения. С другой стороны необходима 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.

Существует достаточно широкая 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.; в области исследования характеристик спаев стекла и стали — Макаровой Н.О., Татаринцевой О.С., Шмидта Т. и Кипкера Б.; в области создания стеклометаллокомпозита — Пикуль В.В., Гончарук В.К., Любимова О.Н., Гридасова Е.А. и Солоненко Э.П.

Однако число публикаций, в которых рассматривалось бы полномасштабное математическое моделирование спаев стекла с металлом в процессе их получения 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, граничных условий на стыке областей и реологических свойств компонент композиции при высоких температурах.

В этой связи диссертационная работа Морковина Андрея Витальевича, посвященная комплексному расчетно-экспериментальному исследованию структурно-деформационных процессов, протекающих в зоне спая стекла и стали в ходе получения стеклометаллокомпозита (СМК), с анализом эволюции структуры, механических свойств и напряженно-деформированных состояний в его компонентах с учетом диффузионных процессов в переходной зоне, релаксации напряжений в стекле и пластического течения в металле, представляется весьма своевременной и актуальной.

Степень обоснованности результатов

Основные положения и выводы диссертации базируются на тщательных теоретических и экспериментальных исследованиях влияния технологических параметров изготовления СМК на структуру, напряженно-деформированное состояние и механические свойства зоны соединения стекла со сталью, а также определение эффективных режимов технологии.

Автором выработан и реализован системный подход к изучению физико-химических, структурных и механических процессов, происходящих при спаивании стекла со сталью в зоне их соединения, который заключается в последовательном рассмотрении основных этапов и особенностей формирования СМК — от образования физического контакта по поверхности соединения стекла и стали, возникновения и развития диффузионной зоны на поверхности контакта компонент до формирования системы остаточных

напряжений в готовом композите и его механического поведения при различных видах нагружения (растяжении, сжатии, изгибе).

На каждом из этапов расчетный анализ сопровождается подробными экспериментальными исследованиями, которые дополняют разработанный комплекс математических моделей (гидромеханики, диффузии, механики деформируемого твердого тела) в качестве элементов системы адаптации моделей, идентификации их параметров и верификации результатов расчетов. Разрабатываемые подходы выверяются на основе литературного обзора отечественных и зарубежных научных источников.

Адекватность разработанных в диссертации подходов обеспечивается, с одной стороны, использованием современных технологий экспериментального изучения структуры и свойств материалов (электронная микроскопия, рентгенодифрактометрический анализ, динамическое микроиндентирование и т.д.), применением эффективных математических моделей и расчетных методов, а с другой – прикладным характером полученных результатов, ориентированных на внедрение в инженерную практику.

Различные аспекты работы докладывались и обсуждались на семинарах и конференциях в ведущих научных коллективах в области механики, компьютерного моделирования, материаловедения. Результаты диссертации опубликованы в 13 публикациях, из них: 6 статей — в изданиях из перечня ВАК; 2 статьи — в зарубежных журналах (Scopus), 2 — патенты РФ. Исследования по тематике диссертации поддерживались грантами ФЦП и РФФИ.

Все это дает возможность говорить о достаточной обоснованности научных положений диссертации, полученных в работе результатов и сформулированных выводов и рекомендаций.

Достоверность полученных результатов

Достоверность результатов при решении поставленных задач обеспечивается:

использованием научно обоснованных расчётных схем, адекватных математических и физических моделей, применением эффективных численных методов, подробно описанных в научной литературе и соответствующих современному уровню исследований в области рассматриваемых явлений;

использованием результатов натурных экспериментов при определении параметров моделей и их зависимости от температурно-временных условий получения композитного материала и его структурных состояний;

соответствием расчётных результатов, полученных автором, экспериментальным данным — оценка уровня точности получаемых численных результатов на количественном уровне производилась из сопоставления

расчётных картин структурных областей, химических элементов, остаточных напряжений с их экспериментальными распределениями в реальных лабораторных образцах.

Новизна и практическая значимость научных положений, выводов и рекомендаций

В диссертации Морковина А.В. выполнены оригинальные исследования по экспериментальному изучению и математическому моделированию структуры и свойств зоны соединения стекла со сталью в многослойных стеклометаллокомпозитах цилиндрической формы при нестационарных термомеханических воздействиях.

Автором впервые на основе гидромеханической аналогии разработана модель заполнения вязко-текучей средой (размягченное стекло) свободного пространства внутри стальной цилиндрической обоймы и выявлены закономерности образования полного физического контакта по всей поверхности соединения стекла и металла в зависимости от скорости нагрева, температуры выдержки и механического давления на стеклянную массу.

На основе тщательного микроструктурного анализа с использованием оптической и растровой электронной микроскопии, энергодисперсионного флуоресцентного анализа, измерений микротвердости экспериментально доказано наличие на границе контакта стекла и стали переходного диффузионного слоя, представляющего собой стекло, насыщенное оксидами железа. Установлены зависимости толщины, химического состава и микротвердости этого слоя от технологии подготовки контактирующих поверхностей и режимов термического воздействия при изготовлении СМК.

С использованием полученных опытных данных выстраивается модель образования переходной (диффузионной) зоны, формирующейся между слоями стекла и металла при высоких температурах, которая описывает процесс диффузии железа в стекле и оксидном слое. По результатам численного расчета получены картины распределения железа в указанных зонах при различных режимах изготовления СМК и проведено их сопоставление с экспериментальными данными.

Учет особенностей структуры СМК является ключевым элементом новизны разработанной автором конечно-разностной модели технологических и остаточных напряжений в объеме стеклометаллокомпозита в ходе его получения. Впервые на основе математического моделирования и прямого экспериментального измерения (при помощи рентгеновского анализатора) получены картины распределения технологических и остаточных напряжений по сечению цилиндрического СМК с описанием влияния на их величину

указанных выше особенностей задачи (учет релаксации напряжений в стеклянном слое, влияние толщины и свойств диффузионной зоны на границе «стекло–сталь», учет пластических деформаций металла), а также температурных режимов получения СМК.

Такой комплексный подход позволил приблизиться к решению проблемы получения спаев стекла со сталью в окислительной среде с минимальным содержанием хрупких фаз на границе соединения за счет управления размерами, структурой и напряженным состоянием переходной зоны и снижением вредного влияния некачественных границ контакта на механические свойства соединения.

Диссертация Морковина А.В. имеет выраженную практическую направленность и значимость в приложениях к задачам управления структурой и свойствами современных композиционных материалов при их получении и обработке, например, 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.

Предложенные в работе методики расчета отдельных параметров технологического режима и подробные описания результатов натуральных экспериментов могут быть использованы для оптимизации процессов получения и термической обработки слоистых композитов и при соединении металла с керамикой, металла с пластиком и стекла с керамикой.

Замечания по диссертационной работе

В основу диссертационного исследования Морковина А.В. положена идея комплексного расчетно-экспериментального решения проблемы описания эволюции структуры, свойств и напряженно-деформированного состояния (включая определение остаточных напряжений) композитного стекло-металлического тела в ходе его формирования в условиях действия высоких температур и давлений.

В этой связи подробные экспериментальные исследования особенностей строения и механического поведения СМК являются базой для разрабатываемых автором аналитических и численных моделей описания и прогнозирования структурно-деформационных процессов в компонентах такого композита и на границах их соединения при различных условиях технологических воздействий. При этом возникает необходимость анализа областей применимости

предложенных моделей, убедительного расчетно-теоретического и экспериментального обоснования принятых допущений и выделения характерных условий температурно-силового нагружения, для которых разработанные методы расчета и принятые допущения оправданы. Поскольку некоторые из этих вопросов не в полной мере раскрыты в тексте диссертации, выскажем их в форме следующих замечаний.

1. Одной из ключевых в работе является конечно-разностная модель формирования напряженно-деформированного состояния материала СМК стержня в процессе его изготовления. Однако многие особенности постановки данной задачи (выбор расчетной схемы, размерности задачи, формы записи основных уравнений и граничных условий) и развернутое обоснование и описание конечно-разностной схемы ее решения остались за рамками текста диссертации.

Почему, при наличии осевой нагрузки на стеклянную сердцевину внутри стальной обоймы задача рассматривается как плоская осесимметричная? Не ясно, как учитывается влияние режима нагрева и охлаждения тела на распределение напряжений в материале в отсутствие модели теплопроводности? Какие именно уравнения и функции аппроксимируются по методу конечных разностей? Как в рамках данного метода задаются смешанные граничные условия на границе раздела слоев композита и почему контакт считается идеальным? Каким методом ищется решение полученной системы разностных уравнений в многосвязной области?

2. Важной особенностью разработанных в диссертации моделей является учет структуры, свойств и влияния на качество сцепления слоев тонкой (толщиной несколько десятков микрон) переходной зоны на границе раздела стеклянных и металлических слоев. Как производится построение конечно-разностной сетки для такого тонкого слоя с переменными свойствами и для остальной расчетной области?

3. В работе недостаточно полно использован потенциал численных методов как в плане учета особенностей решаемой задачи при построении собственных численных моделей рассматриваемых процессов (используется упрощенная одномерная конечно-разностная дискретизация расчетной области), так и в плане верификации полученных результатов на основе их сопоставления с расчетными данными, полученными, например, при помощи современных конечно-элементных комплексов.

Отсутствует развернутый сопоставительный верификационный анализ результатов, полученных при помощи разработанных в диссертации методов, с аналогичными расчетами на основе альтернативных подходов — аналитических и численных решений тестовых задач, литературных данных и т.д. Например,

работоспособность модели напряженно-деформированного состояния СМК и достоверность картины остаточных напряжений оценивается на основе сопоставления расчетной и экспериментальной интенсивности напряжений в одной точке вблизи наружной поверхности стальной обоймы.

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 Морковина А. В. «Структурно-деформационные процессы в зоне соединения стекла и стали при получении стеклометаллокомпозита» является завершенной научно-квалификационной работой, в которой расчетными и экспериментальными методами механики деформируемых сред дано решение актуальной задачи моделирования механического поведения нового композитного материала при температурно-силовых воздействиях с учетом упруго-пластического и релаксационного поведения его составляющих, имеющей важное значение для приоритетных областей промышленности.

Работа выполнена на высоком научном уровне, содержит новые результаты, обладающие теоретической и практической ценностью и опубликованные в рецензируемых научных журналах и изданиях.

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, Морковин Андрей Витальевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.02.04 — механика деформируемого твердого тела.

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

_____ Захаров Игорь Николаевич

Россия, 400005, г. Волгоград, пр. Ленина, 28, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волгоградский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «ВолГТУ»), www.vstu.ru, тел. (8442) 24-81-37, E-mail: sopromat@vstu.ru.

Я, Захаров Игорь Николаевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Морковина Андрея Витальевича, и их дальнейшую обработку.

26.11.18