

**О Т З Ы В**  
**официального оппонента**  
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.

**Актуальность работы**

Уникальные и практически ценные свойства стекла (коррозионная, тепловая, радиационная стойкость, твердость, абразивоустойчивость, прозрачность и др.) 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 (СМК). Например, такие композиции применяются при получении остеклованных сосудов и труб для нефтяной, химической, атомной промышленности.

В диссертации Любимовой О. Н. разрабатываются и исследуются СМК объёмного типа, в которых слои стекла располагаются между слоями металла (стали, алюминия), имеют сопоставимую с ними (или большую) толщину и выполняют роль прочных прослоек. При этом металлическая оболочка вокруг стеклянного слоя призвана способствовать его существенному упрочнению в результате устранения, «залечивания», сдерживания микродефектов в структуре стекла за счёт образования качественной границы раздела в спае с металлом и формирования сжимающих остаточных напряжений при совместной управляемой деформации композита при заданных режимах его получения и последующей термической обработки.

Впервые перспективность подобных СМК (на основе теоретического анализа) для изготовления многослойных стеклометаллокомпозитных корпусов глубоководных аппаратов была показана в работах В. В. Пикуля в 1990-х годах. В работах О. Н. Любимовой и её учеников идеи создания слоистых СМК доведены до практического воплощения, расширены области применимости СМК для элементов конструкций. 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, с одной стороны, проведение масштабных экспериментальных исследований, направленных на отыскание и апробирование различных вариантов технологии получения работоспособных СМК с выявлением закономерностей, механизмов и особенностей формирования структуры и свойств составляющих СМК в зависимости от режимов его получения и последующего нагружения.

С другой стороны, необходима разработка современных математических моделей, способных адекватно описать процессы взаимодействия, соединения и совместного деформирования существенно различающихся по структуре и физико-механических характеристиках материалов. При этом, помимо основных моделей формирования напряженно-деформированного состояния (НДС) и механического поведения сложных многослойных композиций при интенсивных термо-силовых воздействиях, особое значение для построения моделирующего комплекса приобретают, казалось бы, вспомогательные задачи плавления, стеклования, заполнения формы, диффузии на границе раздела стекла и металла, без которых описание истории нагружения и эволюции структуры, свойств и НДС создаваемого материала (а точнее — материала-конструкции) становится невозможным.

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., Солоненко Э.П., Морковин А.В.

Однако сегодня отсутствуют работы, в которых, подобно рассматриваемой диссертации, математическое описание процессов соединения стекла с металлом в ходе получения СМК и его механического поведения при технологических и эксплуатационных воздействиях (с учетом специфических особенностей исследуемых материалов, наведённых полей остаточных напряжений и структурной неоднородности) было бы доведено до практического соответствия

экспериментальным данным на уровне лабораторных образцов и готовых изделий.

В этой связи диссертационная работа Любимовой Ольги Николаевны, посвященная полномасштабному расчетно-экспериментальному исследованию физических, структурных и механических процессов, протекающих в стекле и металле в ходе получения и последующего нагружения СМК, с анализом трансформаций 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, НДС и механические свойства композита, его составляющих и зоны раздела с определением эффективных режимов технологии.

В диссертации выработан и реализован системный подход к изучению физико-химических, структурных и механических процессов, происходящих при спайвании стекла с металлами в зоне их соединения, который заключается в последовательном рассмотрении основных этапов и особенностей формирования СМК — от образования физического контакта по поверхности соединения стекла и металла, их сплавления, возникновения и развития диффузионной зоны на поверхности раздела компонент до формирования системы остаточных напряжений в готовом композите и его механического поведения при различных видах нагружения (растяжении, сжатии, изгибе, кручении, ударе и др.).

На каждом из этапов расчетный анализ сопровождается подробными экспериментальными исследованиями, которые дополняют разработанный комплекс математических моделей (теплофизики, плавления, стеклования, гидромеханики, диффузии, вязкоупругости, пластичности) 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 сканирующая микроскопия, рентгеноспектральный анализ, динамическое микроиндицирование и т.д.), уникальных приспособлений при исследовании

процессов получения и деформации экспериментальных образцов и их сборок, применением эффективных математических моделей, расчетных методов, современных средств компьютерного моделирования, а с другой — прикладным характером полученных результатов, ориентированных на апробацию и 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 53 публикациях (по данным РИНЦ), из них: 2 — монографии, 17 статей — в изданиях из перечня ВАК; 7 статей — в журналах, индексируемых в Scopus и Web of Science, 4 — патенты РФ. Исследования по тематике диссертации поддерживались грантами ФЦП, РФФИ, Минобрнауки.

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

### **Достоверность полученных результатов**

Достоверность результатов при решении поставленных задач обеспечивается:

использованием научно обоснованных расчётных схем, адекватных математических и физических моделей, классических подходов математической физики, термодинамики и механики сплошных сред, применением эффективных аналитических и численных методов, подробно описанных в научной литературе и соответствующих современному уровню исследований в области рассматриваемых явлений;

использованием результатов натурных экспериментов при установлении исходных данных, определении параметров моделей и их зависимости от температурно-временных режимов получения СМК и трансформаций структурных состояний с применением методов планирования и статистической обработки эксперимента;

соответствием расчётных результатов, полученных автором, собственным экспериментальным данным — оценка уровня точности получаемых численных результатов на количественном уровне производилась из сопоставления расчётных картин структурных областей, распределения химических элементов в объёме СМК, усадки образцов при охлаждении, деформации образцов при нагружении и разрушающих напряжений с их экспериментальными распределениями в реальных лабораторных образцах.

## **Новизна и практическая значимость научных положений, выводов и рекомендаций**

Диссертация Любимовой О. Н. является одной из первых масштабных работ, в которой закладываются основы самостоятельного научного направления в области получения и исследования функционально-градиентных и конструкционных композитных материалов на базе неорганического стекла и ряда металлов (стали, алюминия). При этом центральной идеей данной работы является комплексное описание процессов формирования структуры, свойств и механического поведения таких материалов на всех этапах технологического цикла их получения и при последующем нагружении в составе отдельных элементов конструкций или конструкции в целом. Для этого выстаивается система математических моделей физико-механических процессов, протекающих в составляющих композита при интенсивных термо-силовых воздействиях, которая, опираясь на оригинальные экспериментальные результаты, становится инструментом целенаправленного синтеза новых материалов и прогнозирования их эксплуатационного поведения.

Учёт особенностей структуры, трансформации свойств и сложных механизмов деформирования СМК является ключевым элементом научной новизны разработанных автором численных и численно-аналитических моделей технологических и остаточных напряжений в объеме стеклометаллокомпозита в ходе его получения. Впервые получены картины распределения технологических и остаточных напряжений по сечению цилиндрического СМК с описанием влияния на их величину ключевых особенностей задачи (учёт релаксации напряжений в стеклянном слое, влияние толщины и свойств диффузионной зоны на границе «стекло–металл», зависимость теплофизических и реологических свойств стёкол от температуры и скорости её изменения, учёт пластических деформаций металла, проскальзывания на границе раздела). Всё это позволило впервые установить зависимости максимальных интенсивностей остаточных напряжений в СМК от температурно-скоростных режимов его получения при различных схемах технологического процесса.

Указанные выше модели НДС стеклометаллокомпозита потребовали достоверного описания тепловых, гидромеханических, диффузионных процессов, а также стеклования, фазовых переходов, протекающих в компонентах композита и на границах их раздела, что позволило установить необходимые особенности строения исследуемых тел и их механического поведения при термо-силовом нагружении.

В частности, на основе гидромеханической модели автором выявлены закономерности усадки стеклянной массы и 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 разработанных моделей сложного теплообмена в слоистых СМК с учетом возможного проплавления, кристаллизации, стеклования отдельных слоев, поглощения (выделения) скрытой теплоты при фазовых переходах, зависимости теплофизических свойств материалов от температуры впервые получены картины распределения температур в объеме СМК в ходе операций его получения и последующего отжига, установлены параметры областей сплавления материалов, а также скоростей изменения коэффициентов теплового расширения стекла и металла. Это позволило выявить критические диапазоны температур и скоростей нагрева/охлаждения для получения качественного соединения стекло-металл при различных вариантах технологии (медленный нагрев, индукционный нагрев, баллонизация, центрифугирование).

Опираясь на полученные в работе экспериментальные данные о распределении химических элементов на границе соединения стекла и металла, автором выстраивается оригинальная модель образования переходной (диффузионной) зоны, в которой процессы диффузии железа в стекле и оксидном слое рассматриваются по аналогии с фазовыми переходами первого рода. По результатам численного расчета впервые получены картины распределения железа в указанных зонах при различных режимах изготовления СМК, соответствующие экспериментальными данными, что даёт возможность установить границы характерных фазовых областей в стекле с изменёнными свойствами.

Такой комплексный подход позволил сформировать расчётно-экспериментальную базу для целенаправленного синтеза нового композитного материала и приблизиться к решению проблемы упрочнения стекла и получении качественных его спаев с металлами с минимальным содержанием поверхностных дефектов и хрупких фаз на границе соединения за счет управления размерами и структурой переходной зоны, снижения вредного влияния некачественных границ контакта на механические свойства соединения и формирования благоприятных эпюр остаточных напряжений в объеме СМК.

Диссертация Любимовой О. Н. 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 в области судостроения (корпуса глубоководных аппаратов, тяжелое судостроение и т.д.), строительных конструкций (высокопрочная, коррозионностойкая арматура, балочные элементы), химического и общего машиностроения, добывающих производств, электроники, медицине и в других приоритетных областях промышленности.

Разработанные модели процессов деформирования с учётом сложных термо-механических эффектов, предложенные методики расчета отдельных параметров технологического режима и подробные описания результатов натурных экспериментов могут быть использованы для оптимизации процессов получения и термической обработки широкого круга слоистых композитов — при соединении металла с керамикой, металла с пластиком и стекла с керамикой. Другой важной областью приложения результатов работы могут стать исследования общих проблем деформирования и разрушения стеклообразных и аморфных материалов, скелетирующихся слоёв, горных пород, где СМК рассматривался бы в качестве модельного материала.

### **Замечания по диссертационной работе**

В основу диссертационного исследования Любимовой О. Н. положена идея полномасштабного описания и решения проблемы целенаправленного формирования структуры, свойств и напряженно-деформированного состояния композитного стеклометаллического тела в процессе его получения и последующей эксплуатации в условиях действия высоких температур и давлений.

Разработка физических основ рассматриваемых сложных процессов соединения и совместной работы стекла и металла потребовала, с одной стороны, подробных экспериментальных исследований особенностей строения и механического поведения СМК, а с другой — построения целого комплекса аналитических, численных и численно-аналитических моделей описания теплофизических и структурно-деформационных процессов в компонентах такого композита при различных условиях термо-силовых воздействий, который позволил бы расширить существующие рамки экспериментальных исследований в область достоверного прогнозирования и оптимизации свойств СМК материала-конструкции.

Столь серьёзная задача требует тщательного анализа областей применимости предлагаемых 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. В целом автору удалось раскрыть большинство из этих вопросов в тексте диссертации, некоторые же из оставшихся выразим в форме следующих замечаний.

1. В разделе 2.1 рассматривается моделирование механических характеристик бетона, армированного СМК стержнями. При этом используется идея представительного объёма (в виде бетонного кубика 100×100 мм, армированного одним или двумя такими стержнями Ø20 мм), эффективные упругие характеристики которого устанавливаются из численных экспериментов

с использованием системы конечно-элементного анализа *Ansys*. Работоспособность этого подхода проверяется из сопоставления величин разрушающих нагрузок, найденных из натурных экспериментов с модельными балкой и плитой, армированных одним и четырьмя стержнями соответственно, и расчётным путём в *Ansys* для балки и плиты, составленных из представительных элементов с эффективными модулями.

Стоит ли ожидать, что материал, наделённый той же жёсткостью (в упругой области), что и рассматриваемый композит, будет обладать близкими ему прочностными характеристиками?

Какой критерий прочности использовался при оценке прочности материала представительных элементов? Насколько он эффективен для оценки разрушения композиции «бетон — СМК-арматура»?

Кажется, что в данном случае (как и в работе в целом) потенциал современных вычислительных систем (типа *Ansys*) был использован недостаточно полно. Более рациональным видится создание средствами *Ansys* полноценных (без отсылки к мезомеханике) моделей балок и плит, армированных СМК и стальными стержнями, их отладка и верификация на серии натурных экспериментов, и дальнейшее использование для расчётного исследования влияния параметров и особенностей СМК-арматуры (толщина и прочность стальной оболочки, проскальзывание слоёв, остаточные напряжения, наличие оребрения на поверхности и т.д.) на прочность конструктивных элементов. Интересным было бы и построение на этой основе эффективного критерия прочности для таких материалов.

2. В разделе 4.1.2 автором разрабатывается оригинальная модель теплопроводности в многослойном теле с учётом тепловыделения при фазовом переходе в процессе плавления / кристаллизации материала одного (или нескольких) из слоёв. Для отыскания функции, характеризующей удельное количество теплоты при фазовом превращении, в точке перехода записывается квазистационарное уравнение теплопроводности с дополнительным источником тепла, определяемым этой функцией.

Какому объёму соответствует это удельное тепло, если граница фазового перехода «острая»? Насколько такой подход соответствует «физике» процесса? Может ли он быть получен из термодинамических соотношений, рассмотренных автором в разделе 5.2 применительно к процессам стеклования? Почему не использовался единый энталпийный (как в 5.2) подход к описанию подобных явлений (что тем более актуально, например, при одновременном оплавлении металлического и стеклянного слоя)?

3. В уравнениях теплопроводности для жидкой фазы отсутствуют слагаемые, учитывающие скорости движения расплава. Расплав считается

неподвижным? Насколько это допущение критично (например, при описании процессов получения СМК центрифугированием)?

4. В некоторых разделах (4.1.2, 5.4) автором используется приём автоматизированного измельчения шага конечно-разностной сетки по времени для уточнения момента фазового превращения. Предусмотрены ли процедуры контроля избыточного измельчения шага по времени, зацикливания, накопления погрешности округления, например, в случаях, когда превращения последовательно начинаются в нарастающем числе соседних точек тела? Как согласуются в таком случае шаги конечно-разностных сеток при совместном решении рассматриваемых в диссертации задач (тепловой, диффузионной, термо-механической)?

5. При конечно-разностном решении задачи о расчёте НДС в слоистом композите при плавлении одной из компонент на границе жидкой и твёрдой фазы возникает интересная ситуация, когда одному и тому же узлу разностной сетки соответствуют разные состояния материала: жидкое с одной стороны, твёрдое — с другой и переходное — в самом узле. В диссертации не показано, как в таких узлах записываются конечно-разностные представления граничных условий, например, по совместности напряжений, и как, в рамках этого метода, отыскиваются неизвестные значения этих напряжений.

6. Несмотря на богатый экспериментальный материал, полученный в диссертации, в работе крайне скромно представлен сопоставительный верификационный анализ результатов, полученных при помощи разработанных в диссертации методов, с опытными данными и аналогичными расчетами на основе альтернативных подходов — аналитических и численных решений тестовых задач, литературных данных и т.д. Например, работоспособность ключевых моделей теплопроводности, напряженно-деформированного состояния СМК, а также достоверность картин остаточных напряжений подобным анализом не подкрепляются.

7. Работа не лишена ряда технических недостатков — по тексту встречаются опечатки, неточности в нумерации формул, рисунков, литературных источников. Например, в формулах (5.31), (5.39) неверно записаны неравенства, определяющие состояние стеклянного слоя, в таблицах 2.1, 2.2 — путаница с размерностью деформаций  $\Delta l$ , а на рисунках 2.4–2.8 — с размерностью сосредоточенной силы  $P$ .

Данные замечания в целом не снижают научного уровня диссертационной работы и значимости полученных результатов, а скорее подчеркивают сложность и многосторонность решаемых задач, большой объем диссертационного исследования и перспективность избранного автором научного направления.

## Заключение

Диссертация Любимовой О. Н. «Стеклометаллокомпозит: механические свойства, структурные механизмы деформации при повышенных температурах, моделирование процессов формирования структуры и свойств» 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, существенно нелинейного характера изменения их структуры и свойств, 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 докторским диссертациям. Ее автор, Любимова Ольга Николаевна, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических 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](http://www.vstu.ru), тел.(8442) 24-81-37, E-mail: [sopromat@vstu.ru](mailto:sopromat@vstu.ru).

Я, Захаров Игорь Николаевич даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Любимовой Ольги Николаевны, и их дальнейшую обработку.