

## ОТЗЫВ

официального оппонента доктора физико-математических наук,  
профессора Садовского Владимира Михайловича  
на диссертационную работу Барботько Максима Андреевича  
«Исследование терморелаксационных процессов в условиях неоднородной  
структуры стекло-металлических соединений»,  
представленную на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук по специальности  
1.1.8. «Механика деформируемого твердого тела»

Диссертационная работа Барботько Максима Андреевича посвящена анализу термомеханических свойств слоистых композиционных материалов на основе стекла и стали. Работа включает в себя, как построение математических моделей, так и экспериментальное исследование, связанное с проектированием и изготовлением лабораторной установки для измерения линейного теплового расширения материалов в широком диапазоне температур.

Актуальность темы диссертации обусловлена потребностью в создании и исследовании новых материалов, сочетающих в себе свойства стекла и металла. К ним относятся стеклянные покрытия на металлах, слоистые конструкционные материалы на основе металла и стеклоткани или монослоев стекла, а также новый слоистый стекло-металлический материал – стеклометаллокомпозит. Исследования такого рода материалов связаны с комплексом актуальных фундаментальных проблем химии и физики стекла, механики и термомеханики, среди которых: структура стекла, стеклование, моделирование структурных изменений при высокотемпературных режимах обработки, моделирование совместного деформирования соединений из разнородных материалов.

Целью диссертационного исследования Барботько М.А. является анализ термомеханических свойств стекло-металлических соединений при получении и отжиге. Для достижения поставленной цели автором решены следующие задачи:

1. Разработан метод и алгоритм метода начального упругого аналитического приближения для моделирования термомеханического поведения стекло-металлических соединений в широком диапазоне температур с учетом неоднородной структуры материала, различной реологии и структурных превращений в интервале стеклования.
2. Спроектирована и изготовлена экспериментальная лабораторная установка для изучения влияния температурных режимов обработки на поведение стекло-металлического соединения в широком диапазоне температур.
3. На основе проведенных экспериментов установлены закономерности изменения коэффициента линейного температурного расширения в стеклометаллических соединениях в интервале стеклования при различных скоростях изменения температуры.

4. Разработана методика расчета термонапряженного состояния стекло-металлических материалов при различных технологических параметрах. Проведены расчеты стеклометаллокомпозитного стержня с использованием полученных экспериментальных данных.

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации составляет 150 страниц с 50 рисунками и 17 таблицами. Список использованной литературы содержит 181 наименование работ российских и зарубежных авторов.

Во введении обоснована актуальность и степень разработанности темы диссертации, определены цель и основные задачи работы, отражена научная новизна и практическая значимость. Кратко представлено содержание диссертации по главам.

В первой главе описаны виды стекло-металлических соединений методом температурной обработки в процессе изготовления, в результате которой в стекле происходят структурные изменения и структурная релаксация в интервале стеклования.

Указаны основные направления и проблемы исследования терморелаксационных процессов в интервале стеклования в стеклянной составляющей и описаны определяющие механические характеристики стекло-металлического соединения.

Представлены модельные подходы релаксационной теории стеклования, в рамках которых в дальнейшем определяется напряженно-деформированное состояние стекло-металлических соединений и стеклометаллокомпозита в условиях структурных изменений в интервале стеклования.

Во второй главе поставлена и решена краевая задача теплообмена в стекло-металлических цилиндрических соединениях при различных режимах получения с учетом индукционного нагрева и излучения с поверхности. Выделены скорости изменения температуры и геометрические параметры, при которых в стеклюющемся слое наблюдается неоднородное распределение температурного поля, и стеклование в разных областях происходит в разные временные интервалы. Разработан алгоритм и компьютерная программа для численного решения поставленной задачи теплообмена.

В третьей главе диссертации сформулированы задачи экспериментального исследования стекло-металлических соединений, решение которых в интервале стеклования позволяет определить параметры, оказывающие основное влияние на технологические и остаточные напряжения в этих соединениях. Для измерения линейных размеров стекло-металлических соединений в интервале стеклования спроектирована экспериментальная установка – дилатометр горизонтального направления с индукционным нагревом, который обеспечивает высокую скорость нагрева образцов. Проведена серия экспериментов с образцами из стекла С-52-1 и стекло-металлического композита на основе этого

стекла при разных скоростях нагрева. Получены параметры аналитического представления приведенного времени релаксации и вязкости в формуле Вильямса–Ландела–Ферри для модельных представлений термомеханического поведения слоистого композита на основе стеклующегося и упруго-пластичного слоев.

В четвертой главе поставлена краевая задача об эволюции температурных напряжений в цилиндрических стекло-металлических соединениях с учетом процесса стеклования и необратимого деформирования. Краевая задача сформулирована в рамках квазистатической наследственной теории термовязкоупругости. Разработан алгоритм численно-аналитического метода начального упругого аналитического приближения для расчета механической релаксации в слоистых цилиндрических материалах со стеклующимися слоями, которые могут существенно отличаться по структуре, как за счет диффузионных процессов в стекле на границе контакта слоев, так и за счет неоднородного распределения температуры.

Для определенных типов стекло-металлических соединений рассчитаны структурные и механические релаксационные процессы при индукционном нагреве и отжиге. Для стекломаталлокомпозитного конструкционного стержня расчеты проведены с использованием полученных экспериментальных данных.

В пятой главе проведено исследование сходимости предлагаемого метода начального упругого аналитического приближения при определении напряженно-деформированного состояния в сравнении с аналитическим решением для экспоненциального ядра с постоянным временем релаксации, и в сравнении с численным решением при использовании квадратурных формул для решения системы интегро-алгебраических уравнений.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

Практическая значимость диссертации заключается в том, что полученные результаты направлены на использование в производственном процессе при изготовлении слоистых стекло-металлических композитных материалов и при анализе термомеханических свойств готовых изделий из них. Лабораторная установка для дилатометрических измерений, спроектированная и изготовленная в ходе выполнения работы, может быть внедрена в приборостроении.

Научная новизна диссертационного исследования заключается в следующем. Впервые спроектирована экспериментальная установка и проведена серия экспериментов по определению коэффициента линейного температурного расширения стеклянной составляющей в составе стекло-металлического соединения. На основе расчетов релаксации термомеханических напряжений при отжиге установлено влияние используемых в модели параметров аналитического представления приведенного времени релаксации в формуле Вильямса–Ландела–Ферри для стекла С52-1 и этого же типа стекла в составе стекло-металлокомпозита.

По диссертации имеются следующие вопросы и замечания:

1. На какой стадии доработки или патентования находится экспериментальная лабораторная установка? Имеются ли в установке недостатки, которые необходимо доработать, в том числе для повышения точности измерений?
2. Неоднородность структуры стекло-металлических соединений связана не только с различием физико-химических свойств соединяемых материалов, но и с неравномерным распределением температуры по стеклюющемуся слою. В этих условиях в разные моменты времени через интервал стеклования проходят разные объемы. Не ясно, насколько эффективно технологически задавать неравномерный температурный режим. Как это влияет на технологические и остаточные напряжения?
3. Прочность стекло-металлических соединений определяется как технологическими и остаточными напряжениями, так и особенностями контактного взаимодействия слоев. По-видимому, при оценке конечных характеристик стеклометаллокомпозита необходимо учитывать адгезионную прочность соединения стекла с металлом.

Приведенные замечания не снижают общей положительной оценки диссертационной работы, выполненной на высоком научно-квалификационном уровне на актуальную тему с перспективными научно-техническими приложениями.

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

Основные результаты диссертации достаточно полно представлены в 9 опубликованных печатных работах. Из них 5 работ из списка Web of Science, Scopus, ВАК.

Таким образом, диссертация Барботько М.А. является законченной научно-квалификационной работой, выполненной на высоком научном и методическом уровне. Результаты, полученные в диссертационной работе, имеют важное научное и прикладное значение, а проделанная работа соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям по физико-математическим наукам.

Диссертация полностью удовлетворяет требованиям, установленным пунктами 9-11, 13 и 14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» (постановление Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 в редакции от 18.03.2023 г.), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук. Автор диссертационной работы «Исследование терморелаксационных процессов в условиях неоднородной структуры стекло-

металлических соединений», Барботько Максим Андреевич, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.8. «Механика деформируемого твердого тела».

Официальный оппонент,  
член-корреспондент РАН,  
доктор физико-математических наук (01.02.04), профессор,  
зав. отделом Вычислительной механики деформируемых сред Института  
вычислительного моделирования – обособленного подразделения ФИЦ КНЦ СО  
РАН

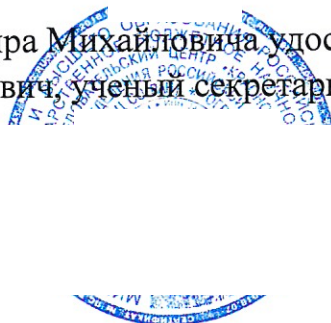
Садовский Владимир Михайлович

20 ноября 2023 г.

Телефон: +7 (391) 290–74–65

E-mail: [sadov@icm.krasn.ru](mailto:sadov@icm.krasn.ru)

Подпись Садовского Владимира Михайловича, удостоверяю:  
Вяткин Александр Владимирович, ученый секретарь ИВМ СО РАН



Вяткин А.В.

Институт вычислительного моделирования Сибирского отделения Российской  
академии наук – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН

Адрес: 660036, Красноярск, Академгородок, дом. 50, стр. 44

Телефон организации: (391) 243–27–56 Факс: (391) 290–74–76

E-mail: [sadov@icm.krasn.ru](mailto:sadov@icm.krasn.ru)

Адрес оф.сайта: [icm.krasn.ru](http://icm.krasn.ru)