

На правах рукописи



Барботько Максим Андреевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОРЕЛАКСАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В  
УСЛОВИЯХ НЕОДНОРОДНОЙ СТРУКТУРЫ СТЕКЛО-  
МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ**

Специальность 1.1.8 – «Механика деформируемого твердого тела»

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Комсомольск на Амуре – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Дальневосточный федеральный университет»

**Научный руководитель:** доктор физико-математических наук, доцент, профессор Отделения машиностроения, морской техники и транспорта Инженерного департамента Политехнического института (школы) ДВФУ, г. Владивосток

**Любимова Ольга Николаевна**

**Официальные оппоненты:** член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник, зав. отделом вычислительной механики деформируемых сред Института вычислительного моделирования – обособленного подразделения ФИЦ КНЦ СО РАН, г. Красноярск.

**Садовский Владимир Михайлович**

кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Института машиноведения и металлургии Дальневосточного отделения Российской академии наук ФГБУН Хабаровского Федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения Российской академии наук, г. Комсомольск-на-Амуре.

**Ткачева Анастасия Валерьевна**

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный университет», г. Воронеж

Защита состоится «22» декабря 2023 г. в 11 часов на заседании диссертационного совета 24.2.316.03 в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный университет» по адресу 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, проспект Ленина, 27, факс (4217) 5361-50, [dis@knastu.ru](mailto:dis@knastu.ru).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет» и на сайте [knastu.ru](http://knastu.ru).

Отзывы на автореферат в двух экземплярах (заверенных печатью учреждения) просим присылать по адресу: 81013, г. Комсомольск-на-Амуре, проспект Ленина, д. 27, ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет», ученому секретарю диссертационного совета 24.2.316.03 и по адресу [diss@knastu.ru](mailto:diss@knastu.ru)

Автореферат разослан « » 2023 г.

Ученый секретарь  
Диссертационного совета  
к.ф.-м.н., доцент

Григорьева А.Л.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность исследования.** Стекло-металлические соединения и материалы на их основе широко применяются в различных областях промышленности. Используются механические, клеевые, сварные и спаянные соединения, выбор способа соединения напрямую зависит от критически важных параметров соединения. Например, при создании микрооптических элементов основными требованиями являются: герметичность, отсутствие загрязняющих компонентов и высокая химическая стойкость соединения, в нефтяной и химической промышленности, перечисленные требования дополняются прочностью и термостойкостью. Технологические подходы к получению стекло-металлических соединений в конструктивных элементах для приборостроения развиваются одновременно с проектированием и получением новых материалов на основе стекло-металлических соединений (оптоволокно, стеклометаллокомпозит, стекло-металлические трубы и панели).

Одним из важных для практической реализации технологий стекло-металлических соединения направлений научных исследований является температурная обработка соединения, при которой стекло в состоянии высоковязкой жидкости смачивает металлическую поверхность обеспечивая механическое сцепление и формируется прочное адгезионное соединение. При этом критически важным являются требования хорошего смачивания и малых остаточных напряжений в стекле после отверждения, кроме того актуальной проблемой остается проблема формирования в зоне соединения специальных свойств, с тем, чтобы приложенная в последствии внешняя нагрузка не вызвала опасных концентраций напряжений, ведущих к преждевременному разрушению. Поскольку основной причиной в формировании напряженно-деформируемого состояния в зоне соединения и в соединяемых материалах является разный характер изменения линейных размеров и объема стекла и металла при температурной обработке, актуальным остается экспериментальное и теоретическое исследование этих изменений в соединениях. Моделирование и экспериментальные исследования механического поведения стекло-металлических соединений, связанного со структурными изменениями в стеклянной составляющей при переходе через интервал стеклования остаются актуальными фундаментальными проблемами физики и механики материалов и находятся в стадии накопления экспериментальных материалов, выдвижения новых теорий, развития и проверки существующих модельных представлений.

**Степень разработанности.** Развитие технологий получения стекло-металлических соединений и новых материалов на основе соединения стекла и металла происходит преимущественно экспериментальным путем. Сложность моделирования связана с отсутствием единых теоретических подходов к описанию структурных изменений в интервале стеклования, особенностей совместного

деформирования и механических свойств зоны соединения. Перечисленные проблемы изучаются как правило отдельно и разными группами исследователей. Развитие теоретических подходов к описанию структуры и структурных переходов в стеклах связано с работами Бартенева Г.М., Малкина А.Я., Александрова А.П., Лазуркина Ю.С., Немилова С.В., Тула А., Нарайанасвами О., Мойнихана К., Мазурина О.В., Сандитова Д.С. Теоретические основы получения стекло-металлических и керамико-металлических соединений развивались в работах Преснова В.А., Якубени М.П., Бачина В.А. и Новодворского Ю.Б. Отдельные задачи позволяющие теоретически описать технологические напряжения и механические свойства стекло-металлических соединений решались в работах: Мазурина О.В., Гончуковой Н.О. и Жорника А.И. (остаточные напряжения в стекло-металлических плоских спаях); Старцева Ю.К. (технологические напряжения в поверхностных слоях стекла при ионном обмене); Буренина А.А., Любимовой О.Н. и Солоненко Э.П. (термомеханические напряжения в конструктивных элементах стекломаталлокомпозита); Труфанова Н.А. и Сметанникова О.Ю. (моделирование технологических напряжений и деформаций при протяжке оптоволокна). Кроме исследователей занимающихся конкретными технологическими задачами в теории стеклования и получения стекло-металлических соединений, большое количество работ которые могут быть полезны при моделировании рассматриваемых соединений развивают теоретические подходы к описанию сложно – напряженных состояний, в том числе, при силовых воздействиях на слоистые конструкции с учетом неоднородных свойств, фазовых переходов и изменяющегося объема: Буренин А.А. и Ковтанюк Л.В. (теория больших упругопластических деформаций); Багмутов В.П., Баландин Г.Ф., Ефимов В.А., Захаров И.Н. и Скобло С.Я. (консолидация расплавов); Булгаков В.К., Быковцев Г.И. и Чехонин К.А. (моделирование с учетом полимеризации); Арутюнян Н.Х., Манжиров А.В. и Радаев Ю.Н. (механика растущих сред). Несмотря на большое количество исследователей для стекло-металлических соединений остаются актуальными задачи экспериментального исследования их механического поведения на широком температурном интервале при разных скоростях изменения температуры и уточнения на основе экспериментальных исследований модельных представлений и расчетов технологических параметров процесса их получения и отжига.

**Целью работы** является экспериментальное исследование и моделирование термомеханических свойств стекло-металлических соединений при получении и отжиге.

**Основными задачами исследования** являлись:

1. разработка метода и алгоритма расчета для моделирования термомеханического поведения стекло-металлических соединений в широком диапазоне температур с учетом неоднородной структуры, разной реологии и структурных изменений в интервале стеклования;

2. проектирование и изготовление экспериментальной лабораторной установки для изучения закономерностей изменения линейного размера стекло-металлического соединения на широком интервале температур;
3. экспериментальные исследования и установление закономерностей поведения коэффициента линейного температурного расширения в стекло-металлических соединениях при различных скоростях изменения температуры в интервале стеклования.

**Научная новизна** полученных автором результатов заключается в:

1. экспериментальных исследованиях термомеханических параметров в интервале стеклования, в том числе, для аналитического представления приведенного времени релаксации и вязкости в формуле Вильямса-Ландела-Ферри и времени релаксации в уравнении Бартенева для стекло-металлического соединения в виде конструктивного элемента стекломаталлокомпозита; для стекломаталлокомпозита при скорости изменения температуры 10 и 15 °С/мин установлено изменение направления выпуклости кривой температурного коэффициента линейного расширения и увеличение значений полосы и интервала стеклования; экспериментальное исследование изменения температурного линейного расширения в стекломаталлокомпозите проведено впервые;
2. на основе релаксационной теории стеклования, с использованием модельных представлений Тула-Нарайанасвами-Мазурина-Мойнихана о структурных изменениях в интервале стеклования разработан метод расчета напряженно-деформированного состояния в стекло-металлических соединениях, с учетом зависимости их физико-механических свойств от температуры и структурных изменений, а также термоупругопластического деформирования металлической составляющей; разработан алгоритм расчета для неоднородных структурных изменений в стеклующемся цилиндрическом слое.

**Положения, выносимые на защиту:**

- 1) лабораторная установка для дилатометрических исследований с индукционным нагревом и горизонтальной загрузкой экспериментальных образцов;
- 2) экспериментальные исследования термомеханических параметров в интервале стеклования на двух группах экспериментальных образцов: стекла марки С52-1 и стекломаталлокомпозита с разными скоростями нагрева: 10 и 15 °С/мин;
- 3) алгоритм метода начального упругого аналитического приближения для послойных неоднородных структурных изменений в стеклующемся слое при упругопластическом деформировании металлического слоя в условиях циклического изменения температуры;
- 4) результаты расчетов напряженно-деформированного состояния для цилиндрических стекло-металлических соединений при получении и отжиге.

**Достоверность результатов работы** обеспечивается: корректным применением методик экспериментальных измерений линейного расширения; моделированием в рамках классических подходов термодинамики и механики сплошных сред; выбором экспериментально апробированных теоретических направлений при математическом моделировании; исследованием сходимости предлагаемого численно-аналитического метода расчета термомеханических процессов.

**Теоретическая значимость исследования.** Экспериментальное исследование закономерностей деформирования в условиях термосилового нагружения стекло-металлических соединений расширяет представление о зависимости структурных изменений в стекло-металлических соединениях от предыстории их термомодеформирования.

**Практическая значимость исследования.** Разработка экспериментальной лабораторной установки - горизонтального дилатометра с индукционным нагревом (Дт-ГИ) имеет практическую значимость в исследовании термомеханических свойств в стеклующихся композиционных материалах со скоростью изменения температуры до 15 °С. Закономерности термического расширения стекло-металлических соединений экспериментально практически не изучены, поэтому экспериментальные исследования закономерностей деформирования в условиях термосилового воздействия при получении и отжиге стекло-металлических соединений остаются практически значимыми не только при разработке технологий их получения, но при изучение зависимости коэффициента линейного температурного расширения с остаточными напряжениями для всех материалов. Исследования представляют ценность при проектировании конструктивных элементов стекло-металлических соединений с заданными свойствами, при моделировании технологических параметров с целью достижения комплекса деформационных и прочностных показателей стекло-металлических соединений.

**Личный вклад** заключается в совместной с научным руководителем постановке задач исследования, формулировке положений и выводов, выносимых на защиту, и написании статей по теме исследования. Автор лично проектировал и изготавливал лабораторную установку Дт-ГИ, планировал эксперимент, выполнял все экспериментальные исследования, анализировал и обобщал полученные результаты. Участвовал в разработке математических моделей для поставленных задач, выполнил, обработал и проанализировал все необходимые расчеты.

**Работа выполнена при поддержке** гранта РФФИ 19-33-90200 и ДВФУ, номер проекта 22-07-01-007.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Полный объем диссертации

составляет 150 страниц с 50 рисунками и 17 таблицами. Список литературы содержит 181 наименование.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**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 п.1.1** описаны виды стекло-металлических соединений, технология которых подразумевает температурную обработку при которой стекло доводится до состояния высоковязкой жидкости, которая затем наносится и припаивается к металлу. Кроме стеклянных спаев в электротехнике, подобные стекло-металлические соединения известны в технологиях получения слоистых композиционных материалов для транспортировки агрессивных жидкостей в нефтеперерабатывающей, химической отрасли и в животноводстве при хранении и переработке отходов, при решении задач иммобилизации радиоактивных отходов. В поиске легких и прочных материалов для корпусов исследовательских подводных аппаратов, работающих на предельных глубинах перспективным материалом признано упрочненное стекло, в том числе и в составе слоистых стекло-металлических конструктивных элементов цилиндрических и полусферических оболочек. Поэтому продолжают исследования технологии упрочнения стекла в составе стекло-металлического слоистого композита, именно с этим связаны исследования по получению двухслойного и трехслойного цилиндрического стеклометаллокомпозита на основе стекла и стали и стекла и алюминия. Задачей, для которой также могут быть применимы методы и алгоритмы, развиваемые в данной работе - технология протяжки оптических волокон, которые состоят из легированных кварцевых стекол в полимерном защитно-упрочняющем покрытии со специальными силовыми элементами с термомеханическими свойствами, отличающимися от основного материала.

**В п.1.2** обозначены основные проблемы исследований терморелаксационных процессов в интервале стеклования в стеклянной составляющей, определяющие механические характеристики стекло-металлического соединения. В интервале стеклования отношение температурных коэффициентов линейного и объемного расширения стекла и металла может приводить к формированию растягивающих напряжений не только в поверхностных слоях, для тонких покрытий, но и по всему объему, в результате формируются деформации и дефекты, снижающие дальнейший эффект от дифференциального сжатия.

Несмотря на рост новых подходов к моделированию кинетики стеклования, в том числе и с применением методов машинного обучения в статистической физике, при описании экспериментальных данных наибольшим успехом пользуются

модельные представления релаксационной теории стеклования развитие которой связано с именами Мазурина О.В., Бартенева Г.М., Немилова С.В., Кольрауша Ф., Тула А., Ковакса А. Нарайанасвами О., Мойнихана К., Маседо П. Продолжают обсуждаться и уточняются особенности поведения и модельные представления важных термодинамических величин: энтальпии  $H$  и объема  $V$  при стекловании, остается актуальным расширение экспериментальной базы скорости их изменения в интервале стеклования. По причине наибольшего экспериментального прояснения смысла параметров модельных представлений, в том числе и для спаев стекла с металлом, в данной работе моделирование структурных изменений проводится в рамках модели Тула-Нарайанасвами-Мазурина-Мойнихана (ТНММ). Основным критерием для описания структурных особенностей и свойств стеклующихся материалов в интервале стеклования ( $\Delta T_g$ ) принято изменение параметра введенного А. Тулом «фиктивной» («структурной») температуры  $T_f$ . При охлаждении от высоких температур  $T_f$  совпадает с текущей температурой до верхнего предела интервала стеклования, затем начинает отклоняться вплоть до нижней границы интервала стеклования, далее остается постоянной. С использованием принципа суперпозиции Больцмана-Вольтерры в модели ТНММ

$$T_f = T_0 + \int_0^t (1 - M_p(t - \acute{t})) \frac{dT}{d\acute{t}} d\acute{t}, \quad (1)$$

для количественного описания релаксационных процессов экспериментально доказана эффективность применения функции Кольрауша

$$M_p = g_0 \exp\left(-\left(\frac{t}{\tau_p}\right)^{b_p}\right), \quad (2)$$

здесь  $g_0$ ,  $\tau_p$  и  $b_p$  постоянные,  $0 < b_p < 1$ ,  $\tau_p$  – характерное время релаксации, индекс « $p$ » – определяет параметры разных свойств стеклующегося материала (объема, энтальпии, линейного размера). Модельное представление скоростей изменения свойств стеклующегося материала связано со скоростью изменения  $T_f$ , например, коэффициент линейного температурного расширения имеет вид

$$\frac{dT_f}{dT} = \frac{\alpha(T) - \alpha_g}{\alpha_l - \alpha_g}, \quad (3)$$

где  $\alpha_g$  – теплоемкость стекла в «замороженном» состоянии при температуре меньшей нижнего предела интервала стеклования ( $\frac{dT_f}{dT} = 0$ ), значение,  $\alpha_l$  – соответствует равновесному состоянию ( $\frac{dT_f}{dT} = 1$ ). Большинство экспериментальных методов в релаксационной теории стеклования связаны с определением параметров  $\tau_p$ ,  $b_p$ ,  $g_0$ ,  $T_g$ ,  $\alpha_g$ ,  $\alpha_l$  для последующего моделирования свойств стеклообразных систем с использованием основных модельных представлений в широком диапазоне температур.



Стекло-металлические соединения обладают сложностями при составлении моделей для описания термомеханических процессов, которые требуют привлечения разных подходов механики деформируемого твердого тела. В п.1.3 приведен краткий обзор модельных подходов и решенных задач, именно для стекло-металлических соединений и стеклометаллокомпозиата при определении термонапряженного состояния в условиях структурных изменений в интервале стеклования.

**Во второй главе** моделируются температурные режимы и проводятся параметрические исследования влияния температурной обработки на теплофизические и механические свойства стекло-металлических соединений. Поставлена и решена численно краевая задача сложного теплообмена в стекло-металлических цилиндрических соединениях при различных режимах получения и отжига. Разработан алгоритм и программы для численного решения поставленной краевой задачи теплообмена.

В п.2.1 моделируются структурные изменения, связанные с изменяющимся температурным полем. С учетом модельных представлений ТНММ удельная теплоемкость в стеклующихся слоях, по аналогии с формулой (3) имеет вид

$$c = \begin{cases} c_l, & T_f(T) = T, \\ c_g + (c_l - c_g) \frac{dT_f}{dT}, & |\Delta T_f(T)| > 0, \\ c_g, & T_f(T) = const. \end{cases} \quad (4)$$

Структурная релаксация, приводящая к изменению всех свойств и определяемая уравнениями (1) и (2) моделировалась с параметром «приведенного» времени ( $t \rightarrow \xi(t)$ ) позволяющим дискретный спектр времен релаксации описывать непрерывной зависимостью

$$\xi(t) = \int_0^t a_T(T_g, t) dt \quad (5)$$

здесь подынтегральная функция  $a_T$  - характеризует относительную вязкость, определялась в виде уравнения Вильямса-Ландела-Ферри (ВЛФ)

$$\ln(a_T) = -C_1 \frac{T - T_g}{T - T_g + C_2}, \quad a_T = \frac{\eta(T)}{\eta(T_g)} = \frac{\tau(T)}{\tau(T_g)}. \quad (6)$$

Зависимость вязкости от структурных изменений предложено рассмотреть в виде обобщения зависимости логарифма вязкости от структурной и текущей температуры, предложенной О.С. Нарайанасвами

$$\lg \frac{\eta}{\eta_0} = B_l (T_f^{-1} - T_0^{-1}) + B_g (T^{-1} - T_f^{-1}), \quad (7)$$

здесь  $B_l$  и  $B_g$  - характеристики в условиях равновесной и замороженной структур, зависящие от энергии активации в соответствующем состоянии и газовой

постоянной,  $\eta_0$  – вязкость при начальной температуре, которая должна отвечать условию  $T_{f0} = T_{max}$ , т.е. температуре расплава.

При численном моделировании исследованы различные температурные режимы, в том числе индукционный нагрев и теплообмен с учетом излучения с внешней поверхности. На границе сопряжения слоев условия теплообмена моделируются как при идеальном контакте. Краевые условия на внешней поверхности записывались с учетом излучения с металлической поверхности и индукционного нагрева (Рисунок 1 а) в виде

$$\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_{\Omega} = \nu(T - T_e) - \sigma \varepsilon (T^4 - T_e^4) + 10^{-3} \cdot H^2 \cdot \sqrt{\rho \mu f}, \quad (8)$$

здесь  $\nu$  – коэффициент теплоотдачи,  $T_e$  – температура окружающей среды,  $\sigma$  – постоянная Больцмана,  $\varepsilon$  – коэффициент излучения,  $H$  – амплитуда магнитного поля,  $\rho$  – электромагнитное сопротивление нагреваемого тела,  $\mu$  – коэффициент магнитной проницаемости,  $f$  – частота электромагнитного поля,  $\frac{\partial T_e}{\partial t} = q$  – температурный режим на разных этапах.

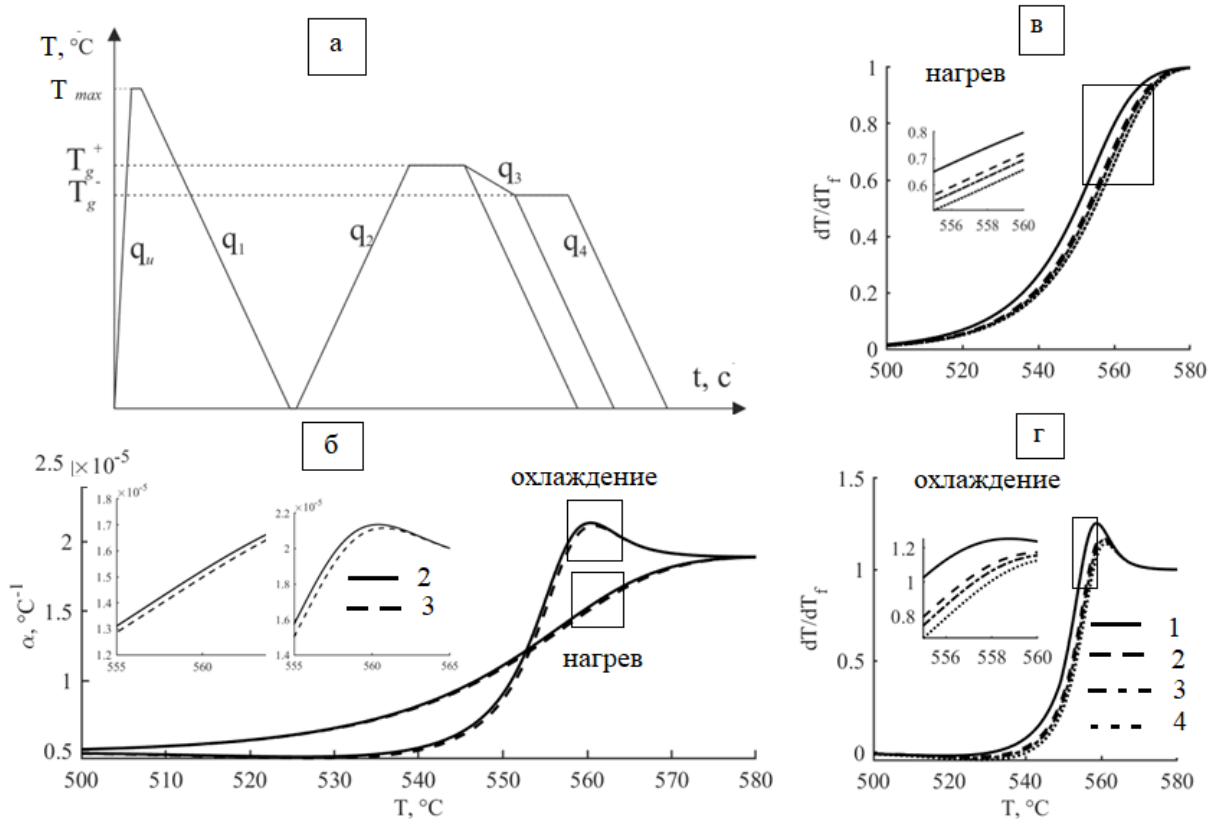


Рисунок 1 а) Общий вид температурных режимов с учетом отжига; б) температурный коэффициент линейного расширения в стеклянной составляющей стеклометаллокомпозитного стержня; в) и г) изменение скорости фиктивной температуры при нагреве и охлаждении с разными скоростями: 1-  $3^\circ\text{C} \cdot \text{мин}^{-1}$ ; 2-  $10^\circ\text{C} \cdot \text{мин}^{-1}$ ; 3-  $15^\circ\text{C} \cdot \text{мин}^{-1}$ ; 4-  $30^\circ\text{C} \cdot \text{мин}^{-1}$

Для соотношений толщины металлического цилиндрического слоя ( $h$ ) к половине диаметра стеклюющегося слоя ( $d/2$ ) до 0,5 при разных скоростях нагрева-

охлаждения (от 3 до 30 °С · мин<sup>-1</sup>) максимальные отклонения по температуре стеклянной составляющей не превышают 1,5 °С (Рисунок 1 и 2 а), что обеспечивает равномерное стеклование по объему (Рисунок 1 б, в, г). Неоднородность в этом случае является следствием наличия стеклующихся слоев разных химических составов, в результате диффузионных процессов на границе стекло-металл.

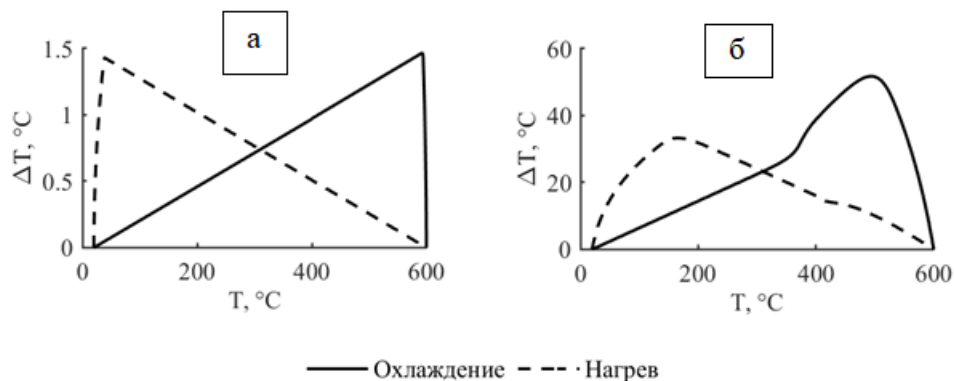


Рисунок 2 Максимальные отклонения температуры по объему в стеклующемся слое для  $q=10^{\circ}\text{C} \cdot \text{мин}^{-1}$ : а)  $\frac{2h}{d} = \frac{1}{10}$ ; б)  $\frac{2h}{d} = 1$

Поскольку практическая значимость исследования в данной работе заключалась в исследовании влияния структурной неоднородности, выделены режимы и геометрия (Рисунок 2 б) при которых наблюдается структурная неоднородность в стеклующемся слое, связанная с неравномерным изменением температуры, выделению областей не стеклующихся или проходящих интервал стеклования по-разному (Рисунок 3).

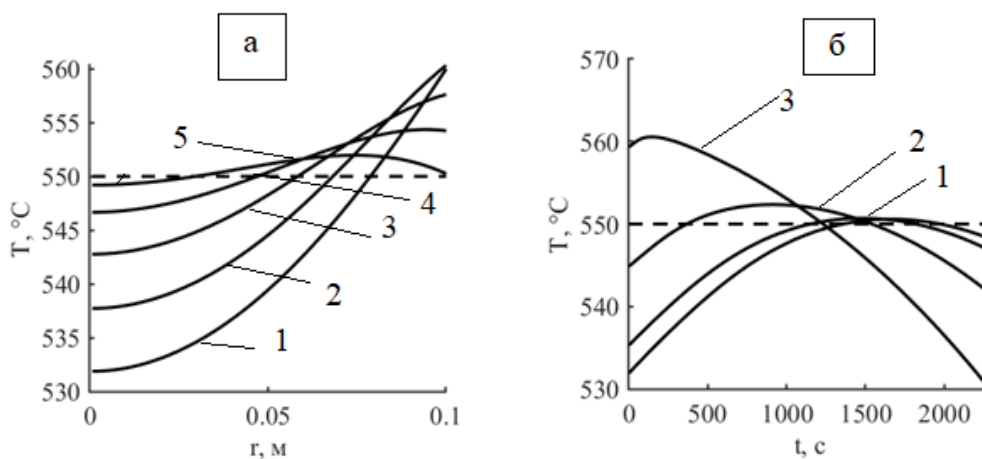


Рисунок 3 Распределение температуры в стеклующемся слое при охлаждении со скоростью  $10^{\circ}\text{C} \cdot \text{мин}^{-1}$  и  $\frac{2h}{d} = 1$  : а) в разные моменты времени от начала этапа охлаждения: 1 – 0 с; 2 – 300 с; 3 – 600 с; 4 – 900 с; 5 – 1200 с; б) 1- в центре стеклянного слоя; 2- в середине слоя и 3- на границе соединения с металлом

Структурная неоднородность влияет на скорость изменения линейного расширения (Рисунок 4), которая является основной причиной критических напряжений растяжения в стеклянных слоях.

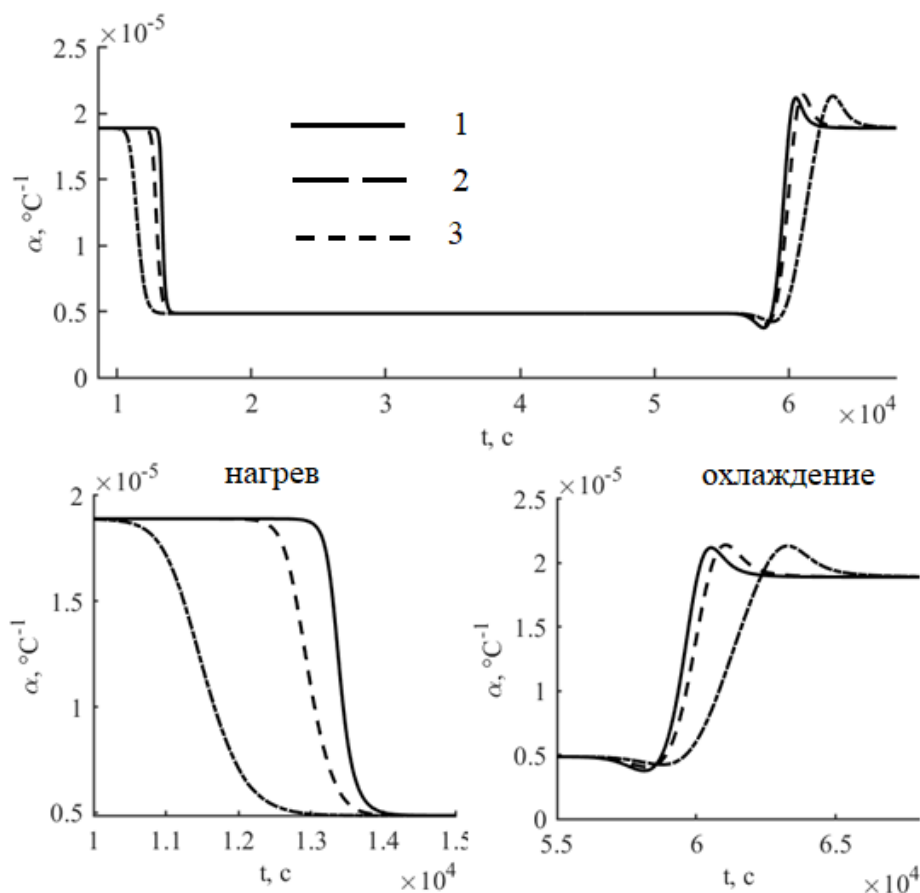


Рисунок 4 Изменение коэффициента температурного линейного расширения на интервале охлаждения (от максимальной температуры) и нагрева со скоростью  $10^{\circ}\text{C} \cdot \text{мин}^{-1}$ ;  $\frac{2h}{d} = 1$  : 1 и 2- в середине слоя и 3- на границе соединения с металлом

Описание закономерностей образования контакта, способов регулирования механических свойств стекло-металлических соединений и их поведения при последующих температурных нагрузках связано с изучением изменения свойств в широком температурном диапазоне и определяющим здесь является линейное расширение. **Третья глава** посвящена экспериментальному исследованию изменения температурных параметров в интервале стеклования для стекло-металлического конструктивного элемента, представляющего собой – стекломаталлокомпозитный стержень.

В п.3.1 поставлена задача экспериментальных исследований и определены экспериментально определяемые параметры и модельные отношения которые в дальнейшем используются при расчетах. Для стеклянной компоненты в стекло-металлическом соединении во многом определяющим являются температурный интервал стеклования  $\Delta T_g = T_f - T_g$ . В интервале стеклования наиболее резко изменяются многие свойства стекла со стороны высоких температур он ограничен

температурой текучести  $-T_f$ ; низких- температурой стеклования  $-T_g$ . Температура стеклования и полоса стеклования  $\delta T_g = T_{12} - T_{13}$ ,  $T_{12}$  и  $T_{13}$  – температуры соответствующие вязкости  $\eta(T) = 10^{12}$  и  $10^{13}$  (Па · с) наиболее частый и удобный критерий для анализа свойств стекол. Поиски корректных методов расчета  $T_g$  и  $\delta T_g$  для разных стекол остаются актуальными проблемами физики и механики материалов. Экспериментально доказано, что основным внешним фактором, определяющим стеклообразование, является скорость охлаждения и нагрева образца ( $q$ ). Большинство экспериментальных данных относится к скорости охлаждения  $q = 3 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{мин}^{-1}$ , тогда как реальные технологические процессы требуют изучения более широкого интервала изменения скорости. Обзор экспериментальных работ по исследованию температурного расширения и его связи с напряжениями в имеющем термическую историю материале, показал, что таких работ крайне мало, что объясняется в том числе и теоретическими трудностями, связанными с отсутствием единой теории для аналитического описания явления стеклования и построения корреляционных зависимостей между его параметрами.

В релаксационной теории стеклования оценку времени релаксации часто проводят, используя уравнение Бартенева-Ритланда:

$$q\tau_g = \delta T_g, \quad (9)$$

где  $q$  – скорость изменения температуры,  $\tau_g$  – время релаксации при  $T_g$ , а полоса стеклования  $\delta T_g$  связана с константами в уравнение ВЛФ (6) соотношением

$$\frac{C_2}{C_1} = \delta T_g. \quad (10)$$

Изучение новых кинетических критериев стеклования направлено на выявление новых аналитических зависимостей характеристик свойств материала, в ряде работ Д.С. Сандитова с учениками предложен алгоритм однозначного определения параметров уравнения (6) через соотношения

$$\frac{\delta T_g}{T_g} = \frac{f_g}{\ln\left(\frac{1}{f_g}\right)}, \quad (11)$$

где  $f_g = \frac{\Delta V_e}{V} \Big|_{T=T_g}$  – доля флуктуационного объема при температуре  $T = T_g$ ,

$$T_g = C_2 \ln(C_1). \quad (12)$$

Определение перечисленных параметров для стекло-металлических соединений связано с исследованием характера изменения температурного коэффициента линейного расширения на широком температурном интервале в конструктивном элементе стекломаталлокомпозита. По определенным экспериментально кривым  $\Delta l$  и  $\alpha$  графически определяются  $T_g$ ,  $\delta T_g$ ,  $\Delta T_g$  и  $T_f$  далее из соотношений последовательно могут быть получены  $\tau_g$ ,  $f_g$ ,  $C_1$  и  $C_2$  (9)-(12) и записано уравнение (6), которое позволит уточнить модельные представления о напряженно-деформированном состоянии в конструктивных элементах стекломаталлокомпозита и скорректировать параметры его отжига.

В п.3.2. описаны два способа экспериментальных исследований изменения линейного размера, измерения проводились в разных установках с разным типом нагрева и загрузки экспериментальных образцов. В первом случае исследования проводились с использованием трубчатой муфельной печи с отклонением температуры по длине размещаемого образца не более  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , образец и измеритель (кварцевый стержень) располагались вертикально. Ошибка при измерении температуры составляла  $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , точность отсчета удлинения образца при расширении составляла  $10^{-6}$  м. Исследования проводились на двух группах образцов: стеклометаллокомпозитного стержня со стеклянным сердечником из стекла С52-1 диаметра 8 мм и длиной 50 мм и стекла С52-1 этих же размеров при разных скоростях нагрева 3 и  $6\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{мин}^{-1}$ . Основные результаты исследований изложены в работе [4]. Несмотря на соответствие результатов измерения линейного расширения и параметров в интервале стеклования для стекла С52-1 с имеющимися экспериментальными данными, работу в описанной установке ограничивал ряд неблагоприятных факторов, среди которых: ограничение по изменению скорости нагрева, необходимость в использовании подставок для образцов, зашумляющих удлинение самого образца, вертикальное расположение и как следствие давление со стороны кварцевого измерителя и временные ограничения связанные с временем ожидания стабилизации температуры в камере нагрева, что ограничивало количество проводимых экспериментов. Анализ и обзор существующих в настоящее время отечественных и зарубежных экспериментальных установок для проведения дилатометрических измерений, показал, что они также ограничены трудоемкостью, большой продолжительностью проведения измерений и несовершенством систем регистрации микроперемещений, существенными являются также их стоимость и ограничение по приобретению зарубежных дилатометров. Разработка дилатометров для исследования композиционных и конструкционных материалов с широким диапазоном возможных значений коэффициентов линейного температурного расширения, простых и воспроизводимых в лабораторных условиях остается актуальной проблемой не только экспериментальной физики, но и отечественного приборостроения. Была спроектирована и изготовлена лабораторная установка с горизонтальной загрузкой образцов и индукционным нагревом, выполняющая функцию дилатометра (Дт-ГИ, Рисунок 5 а), которая позволила обеспечить: высокую чувствительность и достаточная точность измерителя удлинений, способность регистрировать относительные удлинения порядка  $10^{-5} - 10^{-6}$  м; отсутствие значительных напряжений в образце, в результате воздействия измерительного устройства и привести к пластической деформации образца в области размягчения стекла; однородность температуры всех участков экспериментального образца и точность измерения его температуры; простотой метод сборки, способа эксплуатации аппаратуры и размещения экспериментального образца.

По существу Дт-ГИ является кварцевым дифференциальным dilatометром: в нагревательной камере (Рисунок 5 б, в) образец помещается на специальную керамическую подставку, установленную по центру медной трубы, которая находится в центре графитового тигля. Вся конструкция размешена строго горизонтально и закреплена на опорах. С торцов экспериментального образца размещаются два кварцевых стержня: опорный и толкатель. Контроль температуры осуществляют две пары термопар: первая термопара плотно прижимается к образцу на середине, вторая термопара присоединяется к одному из торцов образца допускается разница в температурах не выше  $\pm 10^{-1} \text{ }^\circ\text{C}$ . В качестве измерителя используется цифровой микрометр и видеочамера для непрерывной записи показаний с микрометра (Рисунок 5 г).

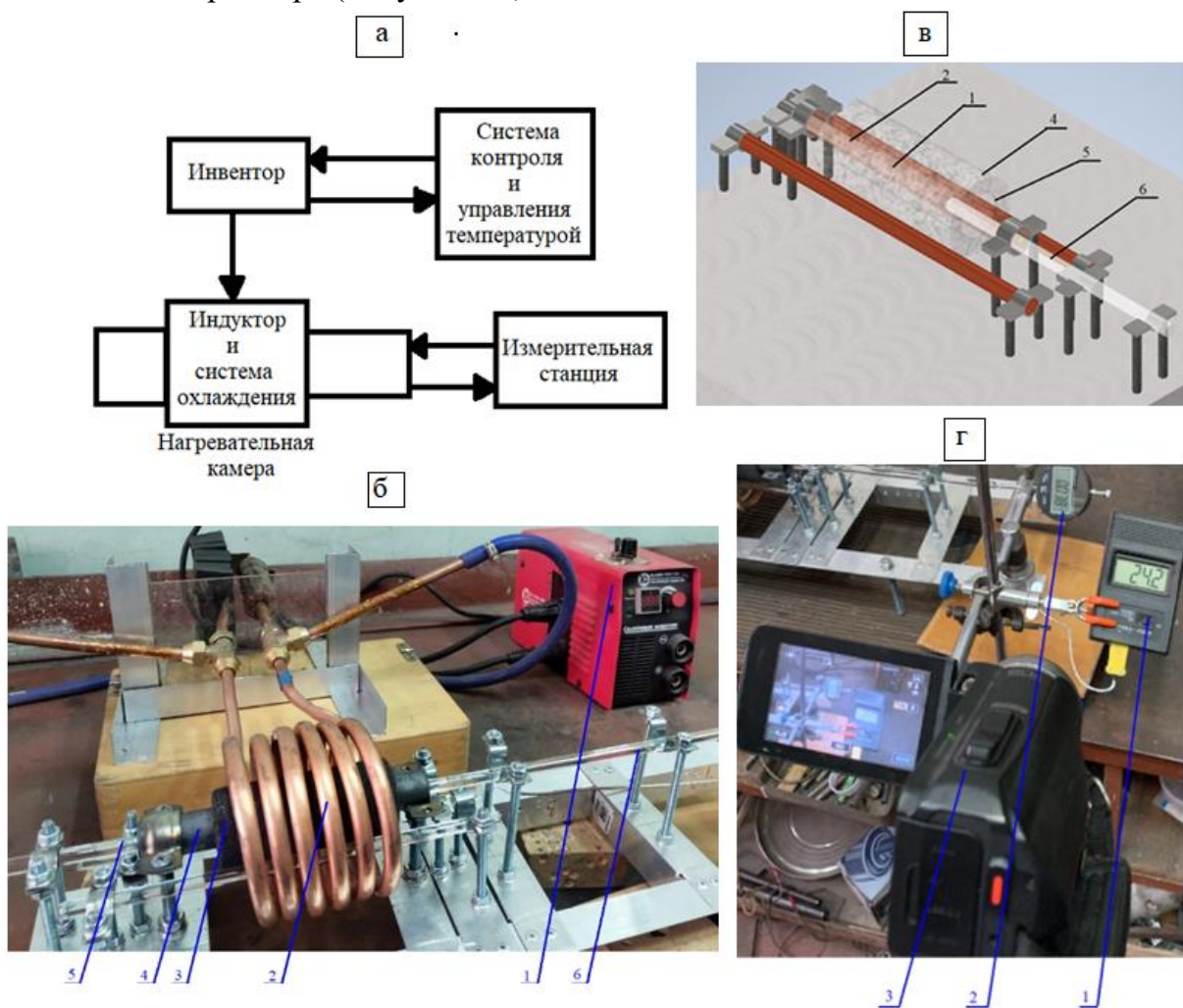


Рисунок 5 а) Общая блок-схема Дт-ГИ; б)нагревательная камера и инвентор: 1- инвентор; 2-индуктор; 3-графитовый тигель; 4- медная труба; 5- опорный стержень; 6-толкатель; в) 3D чертеж нагревательной камеры установки: 1-образец; 2-опорный стержень; 3-толкатель; 4-графитовый тигель; 5-медная труба; 6 поддерживающие медные трубки; 7-крепления; 8- опоры; г) измерительная станция:1-датчик термопар, 2-цифровой микрометр, 3- видеочамера

Нагрев происходит при помощи элемента индукционной печи (Рисунок 5 б), автоматизация поддержания постоянной скорости нагрева реализована на основе контроллера «Arduino» с использованием шагового двигателя, который соединялся с потенциометром ременной передачи, также с помощью контроллера автоматизирована система охлаждения.

В п.3.3 приведены результаты экспериментальных исследований линейного расширения в лабораторной установке Дт-ГИ для двух групп образцов: стеклометаллокомпозитного стержня (СМК) со стеклянным сердечником из стекла С52-1 диаметра 8 мм и длиной 50 мм и стекла С52-1 этих же размеров при разных скоростях нагрева 10 и 15 °С · мин<sup>-1</sup>. Данные каждого экспериментального образца обрабатывались статистическими методами с выделением значимых данных для которых составлялись линейные корреляционные уравнения (а), (б), (с) и (д) (Рисунок 6). Далее из решения систем уравнений находились характерные параметры для каждого образца:  $T_g = (a) \cap (b)$ ,  $T_f = (b) \cap (d)$ ,  $T_w = (b) \cap (c)$  и  $\Delta T_g = T_f - T_g$ ,  $\delta T_g = T_g^+ - T_g^-$ . Было исследовано 74 экспериментальных образца (без учета установочных экспериментов и отбраковки после анализа и выявления аномалий (выбросов) по данным), из них 36 – СМК; 38 - С52-1. После статистической обработки данных экспериментальных измерений, из соотношений (9)-(12) получены параметры стеклования (Таблица 1) и записаны уравнения ВЛФ (Таблица 2).

Анализ поведения ТКЛР стекла 52-1 и стеклянного сердечника в составе СМК в интервале стеклования в Дт-ГИ при скоростях 10 и 15 °С/мин, показал не только количественную разницу в ТКЛР между ними, но и более растянутый и пологий характер кривой коэффициента линейного температурного расширения (Рисунок 6), что сказывается на величине полосы стеклования, которая увеличивается по сравнению со стеклом почти в два раза.

Таблица 1 Параметры стеклования

| $q, ^\circ\text{C} / \text{мин}$ | тип   | $T_g, ^\circ\text{C}$ | $\delta T_g, ^\circ\text{C}$ | $T_f, ^\circ\text{C}$ | $\Delta T_g, ^\circ\text{C}$ | $T_w$  | $f_g$ | $C_1$ | $C_2$  |
|----------------------------------|-------|-----------------------|------------------------------|-----------------------|------------------------------|--------|-------|-------|--------|
| 10                               | С52-1 | 557.64                | 13.61                        | 637.01                | 79.37                        | 619.03 | 0.07  | 15.09 | 205.38 |
|                                  | СМК   | 571.43                | 18.71                        | 653.32                | 81.89                        | 617.10 | 0.08  | 12.21 | 228.39 |
| 15                               | С52-1 | 556.83                | 11.09                        | 627.21                | 70.38                        | 617.6  | 0.06  | 17.53 | 194.42 |
|                                  | СМК   | 577.90                | 23.63                        | 693.02                | 115.12                       | 639.0  | 0.09  | 10.43 | 246.46 |

Таблица 2 Уравнения ВЛФ

| $q, ^\circ\text{C}/\text{мин}$ | С52-1  | СМК  |
|--------------------------------|--|--|
| 10                             | $a_T = \exp\left(-\frac{15.09(T - 557.43)}{T - 352.05}\right)$ | $a_T = \exp\left(-\frac{12.21(T - 571.43)}{T - 343.04}\right)$ |
| 15                             | $a_T = \exp\left(-\frac{17.53(T - 556.83)}{T - 362.41}\right)$ | $a_T = \exp\left(-\frac{10.43(T - 577.90)}{T - 331.43}\right)$ |



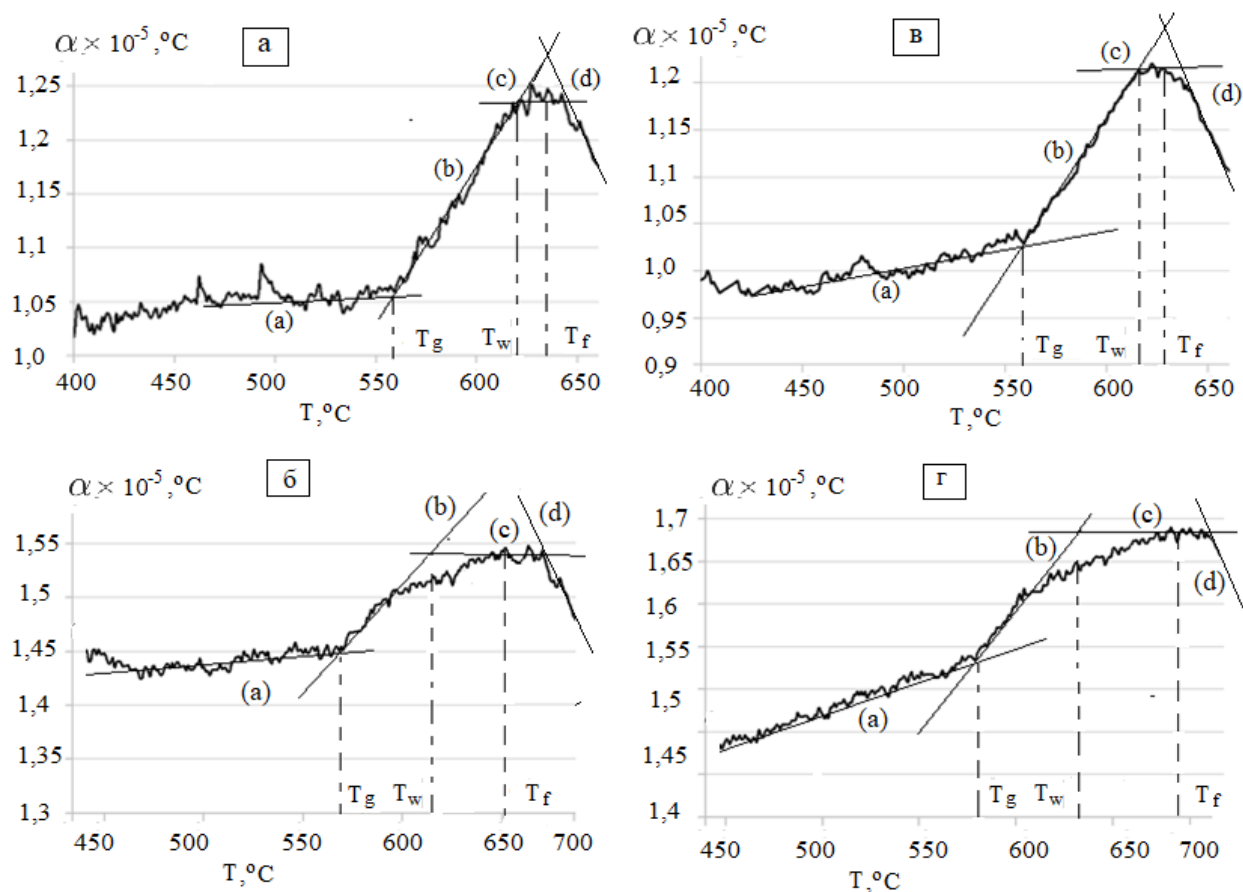


Рисунок 6 Изменение коэффициента линейного температурного расширения:

- а)  $q = 10 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{мин}^{-1}$ , С 52 – 1; б)  $q = 10 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{мин}^{-1}$ , СМК;  
 в)  $q = 15 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{мин}^{-1}$ , С 52 – 1; г)  $q = 15 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{мин}^{-1}$ , СМК

Стеклянные образцы перед измерением предварительно отжигались, а СМК образцы не подвергались температурной обработке, после изготовления, т.е. стекло в составе СМК находилось в предварительно напряженном состоянии. Основной причиной повышения ТКЛР стеклянного сердечника в составе СМК является соединение с металлической оболочкой. Определенные из соотношения (3.1) время релаксации  $\tau_g$  при температуре стеклования составили: для С52-1 при  $15 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{мин}^{-1}$  – 44.36 с и при  $10 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{мин}^{-1}$  – 81.36 с; для СМК при  $15 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{мин}^{-1}$  – 94.52 с и при  $10 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{мин}^{-1}$  – 112.26 с.

**В четвертой главе** моделируются термомеханические релаксации в неоднородно стеклующихся слоях для стекло-металлических соединений с учетом упругопластического деформирования металлических слоев.

**В п. 4.1** поставлена краевая задача об эволюции температурных напряжений в цилиндрических стекло-металлических соединениях с учетом процесса стеклования и пластического деформирования. Краевая задача сформулирована в рамках квазистатической наследственной теории термовязкоупругости. Определяющие соотношения для девиатора и шаровой составляющей тензора напряжений в стеклующихся слоях записаны в виде:

$$s_{ij} = 2G \left( e_{ij} - \int_0^t M(\xi(t')) e_{ij} dt' \right), \quad (13)$$

$$\sigma = 3K\varepsilon, \quad (14)$$

здесь  $s_{ij} = \sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma$ ,  $\sigma = \frac{1}{3}\sigma_0$ ,  $\sigma_0 = \sigma_{ii}$ ,  $e_{ij} = \varepsilon_{ij} - \varepsilon\delta_{ij}$ ,  $\varepsilon = \frac{1}{3}\varepsilon_0$ ,  $\varepsilon_0 = \varepsilon_{ii} - 3\varepsilon^T$ ,  $\varepsilon^T = \int_{T_0}^T \alpha(T) dT$  функция релаксации  $M(\xi(t'))$  записывалась в виде (2) с учетом зависимостей (5) и (6). Уравнения состояния для термоупругопластичного слоя моделировались в рамках модели Прандтля–Рейса при учете тепловых явлений и с разделением малых деформаций на обратимые (упругую)  $\varepsilon_{ij}^e$  и необратимую (пластическую)  $\varepsilon_{ij}^p$  составляющие, упругое состояние в пространстве напряжений было ограничено поверхностью предельного состояния Мизеса и условием активного нагружения

$$f(\sigma, T) = \frac{1}{2} s_{ij} s_{ij} - \sigma_T^2(T) = 0, \quad (15)$$

$$\frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} \dot{\sigma}_{ij} + \frac{\partial f}{\partial T} \dot{T} > 0, \quad (16)$$

где  $\sigma_T(T)$  – предел прочности при растяжении зависел только от температуры.

При записи граничных условий постановке полагалось, что внешняя поверхность свободна от какого-либо воздействия, кроме температурного, а на границе сопряжения разных слоев выполнялись условия идеального контакта.

В п. 4.2 разработан алгоритм численно-аналитического метода начального упругого аналитического приближения (НУАП) для расчета механической релаксации в слоистых цилиндрических материалах содержащие стеклующиеся слои. В цилиндрической системе координат с учетом осевой симметрии и обобщенного плоского деформированного состояния уравнения равновесия в перемещениях краевой задачи с уравнениями состояния (13)–(16) имеют вид

$$\left( \frac{4}{3}G + K \right) \left( \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{u}{r^2} \right) - \frac{2}{3}G \int_0^t M(t, t') \left( \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{u}{r^2} \right) dt' = 0, \quad (17)$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{u}{r^2} = \frac{2G}{4/3G + K} \left( \frac{\partial \varepsilon_r^p}{\partial r} + \frac{\varepsilon_r^p - \varepsilon_\varphi^p}{r} \right), \quad (18)$$

здесь (17)-для стеклующихся слоев, (18)- упругопластических.

Особенностью задачи (13)–(18) является ее зависимость от истории нагружения, поэтому при численной реализации все уравнения были переписаны в малых приращениях во времени всех параметров. Рассматривалась кусочно-равномерная по координатам и времени сетка с шагами  $\Delta r_g$ ,  $\Delta r_m$ ,  $\Delta t$  и  $\Delta t'$ . На каждом временном слое  $k$  приращение перемещений во внутреннем цилиндре записываются как аналитически определяемые из решения уравнения (17) в которых следует найти только приращение констант интегрирования:  $\Delta u^k = \Delta C_1^k \cdot r$  и  $\Delta u^k = \Delta C_2^k r + \frac{\Delta C_3^k}{r}$ . Приращения перемещений во внешнем цилиндре рассматриваются как сеточные

функции  $\Delta u_j^k$ , подлежащие определению из решения системы, получаемой при конечно-разностной записи уравнения (18). При этом приращение констант  $\Delta C_1^k$ ,  $\Delta C_2^k$  и  $\Delta C_3^k$  могут быть найдены из решения совместной системы, следующей из конечно-разностного представления краевых условий и уравнения (18). Влияние релаксационных процессов на напряжения предлагается определять уточнением начальных упругих решений корректировочными, приращения которых определяются как разность сумм приращений девиатора напряжений на всех предыдущих временных слоях и на текущем слое:

$$\Delta \sigma_{cor,s}^k = \sum_{k1=1}^{k-1} \left( 1 - e^{-(\xi^k - \xi^{k1})^{b\sigma}} \right) \Delta S_s^{k1} - \sum_{k1=1}^{k-2} \left( 1 - e^{-(\xi^{k-1} - \xi^{k1})^{b\sigma}} \right) \Delta S_s^{k1}$$

здесь  $s = r, \varphi, z$ .

Для нахождения пластических деформаций предлагается использовать метод дополнительных деформаций, при котором реализуется итерационный процесс определения пластических деформаций, «корректирующие» напряжения и в стеклющемся слое.

В п. 4.3 для определенных стекло-металлических соединений рассчитаны структурные и механические релаксационные процессы при индукционном нагреве и отжиге. Для стеклометаллокомпозитного конструкционного стержня расчеты проведены с использованием полученных в 3 Главе экспериментальных данных.

В соответствии с расчетом выполненном в Главе 2 п. 2.3 (Рисунок 3) проводился расчет для цикла охлаждение-нагрев-охлаждение с выделением в стеклющемся слое зон: не входящих в интервал стеклования; проходящих интервал стеклования, с неоднородным температурным полем (Рисунок 7).

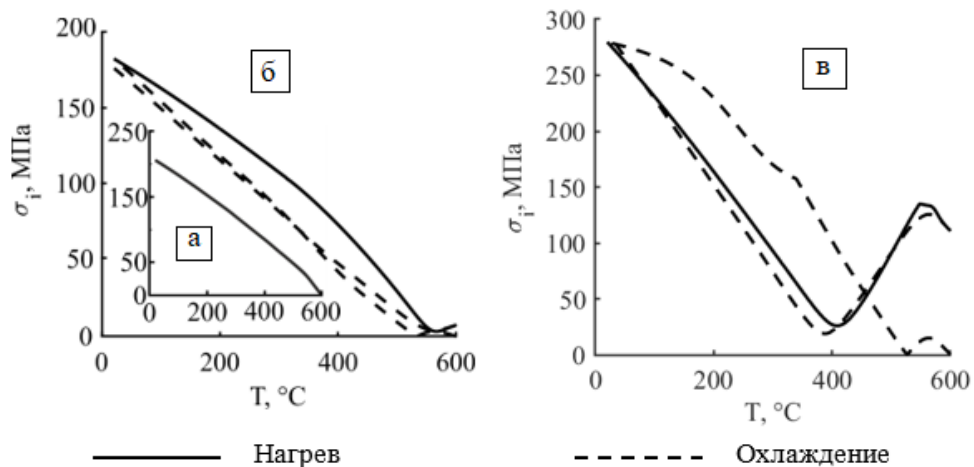


Рисунок 7 Изменение интенсивности напряжений (верхние) и температурный коэффициент линейного расширения (нижний) в среднем по радиусу от температуры в разных слоях: а– упругий стеклянный слой, б – стеклющийся слой, в – упругопластический

Расчеты для стеклометаллокомпозитного стержня с разными скоростями изменения температуры в двух вариантах: теоретические значения механических параметров релаксации и полученные экспериментально в Главе 3, показали что разница расчетных значений термомеханических характеристик для теоретических значений стеклянной составляющей и экспериментально полученных терморелаксационных параметров стеклянной составляющей стекло-металлического соединения может составлять до 33 % от максимальных значений, т.е. реальные напряжения оказываются выше. С экспериментальными данными рассчитаны режимы с разными временами выдержки при температуре отжига (Рисунок 9). Отработан прямой алгоритм определения температуры отжига и времени выдержки.

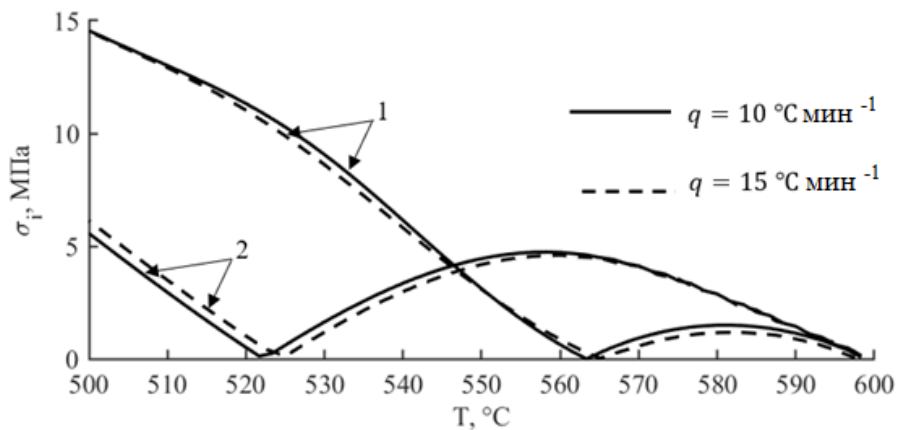


Рисунок 8 Сравнение интенсивности напряжений в стеклюющем слое от температуры, в интервале стеклования, для СМК с разными параметрами стеклования : 1 – табличные данные С52-1, 2 – экспериментально полученные (Глава 3 п. 3.3).

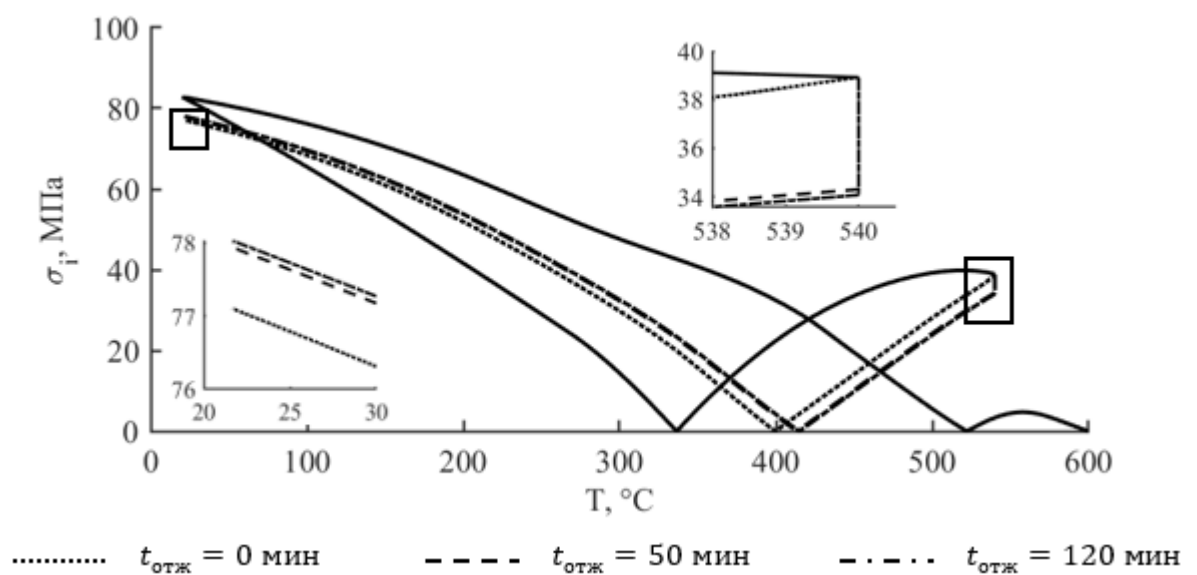


Рисунок 9 Влияние времени отжига на интенсивность напряжений для  $q=10 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{мин}^{-1}$

**В пятой главе** проведено исследование сходимости предлагаемого метода начального упругого аналитического приближения при определении напряженно-деформированного состояния тремя разными способами:

- в п. 5.1 на сгущающейся сетке по правилу Рунге;
- в п.5.2 сравнением с аналитическим решением при простом экспоненциальном ядре, с одним постоянным временем релаксации;
- п.5.3 сравнением с численным решением при использовании квадратурных формул в аппроксимации интегрального члена в интегро-алгебраическом уравнении.

Продемонстрирована разница в решении при использовании дробной степени в экспоненциальном ядре при сравнении решений по методу начального упругого аналитического приближения с аналитическим решением полученном при простом экспоненциальном ядре.

### **Заключение**

*В результате выполнения диссертационного исследования достигнуты следующие основные результаты:*

- 1) Спроектирована и изготовлена специальная лабораторная установка для дилатометрических исследований цилиндрических стеклометаллических соединений с индукционным нагревом и горизонтальной загрузкой экспериментальных образцов – Дт-ГИ;
- 2) Проведена серия экспериментальных исследований термомеханических параметров в интервале стеклования на двух группах экспериментальных образцов: стекла марки С52-1 и стеклянного конструктивного элемента из стекла С52-1 в составе стеклометаллокомпозита с разными скоростями нагрева. С использованием модельных представлений релаксационной теории стеклования на основе экспериментальных данных получены параметры для аналитического представления приведенного времени релаксации и вязкости в формуле Вильямса-Ландела-Ферри. Выявлено качественное отличие кривой характеризующей скорость изменения линейного расширения в интервале стеклования стекла С 52-1 от стеклянного конструктивного элемента из стекла С52-1 в составе стеклометаллокомпозита.
- 3) Разработан метод начального упругого аналитического приближения (НУАП) для моделирования термомеханического поведения цилиндрических стеклометаллических соединений в широком диапазоне температур с учетом неоднородной структуры, разной реологии и структурных изменений в интервале стеклования в стеклянной составляющей и упруго-пластического деформирования в металлическом слое. Разработан алгоритм метода НУАП и созданы программы, позволяющие выполнить расчеты пространственно-

временных распределений перемещений и напряжений. Проведено исследование сходимости метода.

- 4) Для определенных стекло-металлических соединений по методу НУАП рассчитано термонапряженное состояние при различных технологических параметрах получения и отжига. Для стеклометаллокомпозитного конструкционного стержня расчеты проведены с использованием полученных экспериментальных данных линейного расширения при разных скоростях изменения температуры.

Перспектива исследований связана с:

- дальнейшее развитием лабораторной установки Дт-ГИ в части повышения точности измерения линейного расширения;
- накоплением экспериментальных данных по изменению линейного расширения в интервале стеклования для стекло-металлических соединений;
- оптимизацией алгоритмов и разработкой программного пакета для управления лабораторной установкой и обработки получаемых экспериментальных данных.

### **Список работ, опубликованных автором по теме диссертации:**

#### **ВАК и Scopus**

1. Любимова, О. Н. Моделирование теплообмена в слоистых стекло-металлических материалах при индукционном нагреве / О. Н. Любимова, М. А. Барботько // Теплофизика и аэромеханика. – 2021. – Т. 28, № 1. – С. 89–105. (переводная версия: Lyubimova, O. N. Modeling of heat transfer due to induction heating of laminated glass-metal materials / O. N. Lyubimova, M. A. Barbotko // Thermophysics and Aeromechanics. – 2021. – Vol. 28, No. 1. – P. 87-102. – DOI 10.1134/S0869864321010091)

2. Любимова, О. Н. Метод расчета эволюции напряжений в стеклометаллокомпозите с учетом структурных и механических релаксационных процессов / О. Н. Любимова, М. А. Барботько // Вычислительная механика сплошных сред. – 2019. – Т. 12, № 2. – С. 215–229.

3. Барботько, М. А. Численное моделирование термических напряжений и деформаций в цилиндре с упругопластической оболочкой и вязкоупругим наполнителем / М. А. Барботько // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. – 2018. – № 4 (37). – С. 16–23. – DOI 10.5281/zenodo.2008644.

4. Barbotko M.A. Experimental investigations of varying the temperature parameters in the glass-transition range for glass-metal composites when heated / O.N. Lyubimova, M. A. Barbotko, A.A. Streltsov // Materials Physics and Mechanics. – 2023. – № 51 (3).

5. Любимова, О. Н. Свойства, макро- и микроструктура слоистого конструкционного элемента на основе неорганического стекла и стали - стеклометаллокомпозитного стержня / О. Н. Любимова, А. В. Морковин, М. А. Барботько // *Металлург.* – 2022. – № 9. – С. 100–104. – DOI 10.52351/00260827\_2022\_09\_100 (Lyubimova, O. N., Morkovin, A. V., Barbotko, M. V. Properties, Macro- and Microstructure of a Layered Structural Element Based on Inorganic Glass and a Steel — Glass-and-Metal Composite Rod. *Metallurgist* 66, 1140–1146 (2023). <https://doi.org/10.1007/s11015-023-01426-2>)

**В материалах конференций:**

6. Морковин, А. В. Исследование механических характеристик цилиндрических спаев стекла СН1 С СТ.20 / А. В. Морковин, М. А. Барботько // *Фундаментальные и прикладные задачи механики деформируемого твердого тела и прогрессивные технологии в машиностроении : Материалы V Дальневосточной конференции с международным участием, Комсомольск-на-Амуре, 18–21 сентября 2018 года / Ответственный редактор А.И. Евстигнеев. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет, 2018. – С. 24–28.*

7. Любимова, О. Н. Математическое моделирование отжига стекло-металлических конструкционных материалов с учетом стеклования / О. Н. Любимова, М. В. Барботько // XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики: Сборник трудов. В 4-х томах, Уфа, 19–24 августа 2019 года. Том 3. – Уфа: Башкирский государственный университет, 2019. – С. 134–136.

8. Любимова, О. Н. Моделирование напряженно-деформированного состояния слоистых материалов / О. Н. Любимова, В. О. Жевора, М. А. Барботько // *Молодежь и научно-технический прогресс: материалы региональной научно-практической конференции.* – Владивосток: Дальневосточный федеральный университет, 2021. – С. 77–82.

9. Барботько, М. А. Аналитическое решение задачи о термовязкоупругом деформировании стеклянного слоя в составе стеклометаллокомпозита при разных температурных обработках / М. А. Барботько, О. Н. Любимова // *Актуальные проблемы информационно-телекоммуникационных технологий и математического моделирования в современной науке и промышленности : Материалы I Международной научно-практической конференции молодых учёных, Комсомольск-на-Амуре, 20–25 марта 2021 года. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2021. – С. 52–55.*

Барботько Максим Андреевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОРЕЛАКСАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В  
УСЛОВИЯХ НЕОДНОРОДНОЙ СТРУКТУРЫ СТЕКЛО-  
МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ**

Специальность 1.1.8 –«Механика деформируемого твердого тела»

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук