

На правах рукописи



Солоненко Элеонора Павловна

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ В
СТЕКЛОМЕТАЛЛОКОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛАХ ПРИ
ТЕМПЕРАТУРНОЙ ОБРАБОТКЕ

Специальность 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Комсомольск-на-Амуре – 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Дальневосточный федеральный университет», на кафедре механики и математического моделирования Инженерной школы

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук, профессор кафедры механики и математического моделирования Инженерной школы Дальневосточного федерального университета (ДВФУ), г. Владивосток
Любимова Ольга Николаевна

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, доцент, в.н.с. лаб. механики разрушения материалов и конструкций Института гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, доцент, г. Новосибирск
Кургузов Владимир Дмитриевич

кандидат физико-математических наук, доцент н.с. лаб. проблем металлотехнологий Института машиноведения и металлургии ДВО РАН, г. Комсомольск-на-Амуре
Севастьянов Георгий Мамиевич

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет», г. Волгоград

Защита состоится «12» мая 2017 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 212.092.07 в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет» по адресу 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, проспект Ленина, 27, факс (4217) 5361-50, dis@knastu.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета» и на сайте https://sovvet.knastu.ru/diss_defense.

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



Григорьева А.Л.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследований. Стеклометаллокомпозит (стеклометаллический материал) – новый слоистый композиционный материал, в котором слои металла чередуются со слоями стекла. Процесс изготовления подразумевает получение прочного соединения стекла с металлом и, как следствие, повышение прочностных характеристик стекла в результате формирования сжимающих напряжений на его поверхности. Вместе с тем, разница в физических и механических характеристиках соединяемых материалов, а также изменение в процессе изготовления материалов их свойств и даже структуры, является причиной появления технологических напряжений, вызывающих появление дефектов, разупрочняющих композит.

Для контроля технологических и остаточных напряжений в таких материалах важно управлять параметрами их дополнительной температурной обработки (отжига). Экспериментальные методы контроля технологических напряжений являются ресурсоемкими и не позволяют в рамках одного подхода охватить все физико-механические процессы, имеющие место при изготовлении стеклометаллокомпозита, поэтому актуальна разработка моделей и методов расчета его свойств в зависимости от технологии изготовления. Кроме того, проблема управления технологическими параметрами получения стеклометаллокомпозита родственна многим другим практическим задачам, например, температурной обработке аморфных покрытий, спаев стекла с металлом и сварке разнородных материалов, что делает ее актуальность и практическую значимость очевидными.

Степень разработанности темы. Сложность моделирования напряженного состояния при тепловой обработке в стеклометаллокомпозитах, а также в спаях стекла с металлом, обусловлена фазовыми переходами в стекле (стеклованием) и реологическими особенностями поведения стекла и металла.

Моделированием кинетики стеклования занимается значительное количество ученых, разработаны десятки теоретических и экспериментальных моделей, в том числе теория Адама-Гиббса и Волькенштейна-Птицына, модели свободного объема и конфигурационной энтропии, метод Ковакса, Тула-Нарайанасвами-Мойнихана-Мазурина.

Регулярно обсуждаются актуальные проблемы, теоретические и экспериментальные подходы в кинетической теории стеклования, например, в обзорных работах Аксенова В.Л., Шмельцера Ю.В.П. и Тропинина Т.В.

Исследованию же процессов формирования напряженно-деформируемого состояния в спаях стекла с металлом с учетом процесса стеклования посвящено ограниченное количество работ, среди которых выделяются работы Мазурина О.В., Старцева Ю.К., Бачина В.А., Позднякова В.А., Гончуковой Н.О. и Жорник В.А. Однако реализованные перечисленными авторами модели и методы расчета эволюции напряжений в спаях стекла с металлом не позволяют описывать ряд особенностей технологии изготовления стеклометаллокомпозитов цилиндрической формы, которые не обязательно подразумевают получение вакуумноплотного спая, поэтому необходимо учитывать качество сцепления стекла с металлом. Кроме того, при некоторых технологических режимах изготовления в зоне соединения стекла и металла вследствие диффузионных процессов формируется новый материал, свойства которого влияют на прочность соединения и всего композита в целом.

Целью работы является разработка метода расчета эволюции напряжений в двух и трехслойном стеклометаллокомпозите цилиндрической формы на всем температурно-временном интервале отжига, с учетом реологических особенностей деформирования материалов, входящих в состав стеклометаллокомпозита, а также качества и структуры зоны соединения стекла и металла.

Основные задачи исследования:

- анализ и уточнение существующих моделей для расчета релаксации напряжений в цилиндрических спаях стекла с металлом с учетом физико-механических свойств материалов на широком температурном интервале;
- моделирование свойств стеклометаллокомпозитов и основных закономерностей их отклика на механическое и термическое воздействие;
- разработка метода расчета параметров режима отжига, при изготовлении стеклометаллокомпозитных материалов с учетом процесса стеклования;
- изучение влияния переходного слоя на механические свойства стеклометаллокомпозита;

- исследование влияния скорости охлаждения на технологические и остаточные напряжения в двух- и трехслойных стеклометаллокомпозитах.

Научная новизна. Стеклометаллокомпозит - это уникальный конструкционный материал, который на текущий момент находится в стадии экспериментальной разработки. Выполненная работа является одним из первых исследований по моделированию физико-механического поведения стеклометаллокомпозита цилиндрической формы при отжиге, в процессе выполнения которой были получены следующие **новые результаты:**

- разработан метод расчета эволюции напряженно-деформированного состояния стеклометаллокомпозита на всем температурно-временном интервале отжига, с учетом зависимости его физико-механических свойств от температуры и структурных изменений. Учитывалось влияние структуры зоны соединения (состава и геометрии) между слоями и качества сцепления слоев стекла и металла на технологические и остаточные напряжения;

- доказано влияние структуры зоны соединения и качества сцепления стекла и металла на релаксационные процессы и остаточные напряжения в стеклометаллокомпозитных стержнях и трубках, получены оптимальные параметры переходной зоны;

- изучено теоретически и экспериментально влияние скорости изменения температуры и времени изотермической выдержки на эволюцию напряженно-деформируемого состояния в стеклометаллокомпозите.

Положения, выносимые на защиту:

- модель и метод расчета релаксации термических напряжений для двух- и трехслойных цилиндрических стеклометаллокомпозитов, с учетом наличия переходного слоя в зоне соединения материалов, входящих в состав композита, и процесса стеклования;

- модель и метод расчета эволюции термических напряжений для двух и трехслойных цилиндрических стеклометаллокомпозитов, с учетом качества сцепления материалов, входящих в состав композита, и процесса стеклования;

- результаты исследований влияния отдельных параметров режима отжига: структуры, состава и размеров зоны соединения стекла с металлом; качества сцепления стекла с металлом; скорость изменения температуры на

эволюцию напряжений возникающих в стекломаталлокомпозитах в процессе его отжига.

Теоретическая значимость работы заключается в установлении новых сведений об эволюции напряжений в стекломаталлокомпозите на всем температурно-временном интервале отжига с учетом влияния структуры зоны соединения (состава и геометрии) между слоями и качества сцепления слоев стекла и металла, а также в разработке метода расчета технологических напряжений при отжиге для нового конструкционного материала – стекломаталлокомпозита.

Практическая значимость работы заключается в разработке модели для расчета параметров режима отжига нового конструкционного материала - стекломаталлокомпозита, что позволит управлять его механическими свойствами. Результаты исследований могут быть использованы при определении физико-механических характеристик сварных соединений из разнородных материалов (металл-пластик, металл-стекло, стекло-пластик и т.п.). Предложенные в работе модели могут быть использованы для оптимизации режимов получения и термической обработки слоистых композитов и аморфных покрытий на металлах.

Достоверность результатов обеспечена использованием законов сохранения и принципов равновесной термодинамики, построением корректных краевых задач термомеханики и использованием аналитических методов получения решений соответствующих дифференциальных уравнений, тестированием вычислительных программ, сравнением с известными аналитическими решениями и непротиворечивостью теоретических и экспериментальных результатов.

Апробация работы. Результаты работы докладывались на: Четвертой Международной конференции «Математическая физика и её приложения», г. Самара, 2014 г.; Всероссийской школе-конференции «Механика предельного состояния и смежные вопросы», г. Чебоксары, 2015 г.; Всероссийской научной конференции «Теплофизика и физическая гидродинамика», г. Ялта, 2016 г.

Личный вклад автора заключается в совместной с научным руководителем постановке задач исследования, формулировке положений и выводов, выносимых на защиту и написании статей по теме исследования.

Автор принимал непосредственное участие в разработке математической модели для поставленной задачи, выполнил, обработал и проанализировал все необходимые расчеты.

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 12 научных работ, в том числе: 2 статьи в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, 1 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, 1 статья в зарубежном научном журнале, индексируемом в Scopus, 8 публикаций в сборниках материалов всероссийских и международных научных и научно–практических конференций и семинаров.

Связь работы с научными программами и темами. Исследования, представленные в диссертации, проводились в рамках НИР: «Разработка технологии изготовления нового композитного материала стеклометаллокомпозита, как перспективного материала на основе стекла для решения актуальных задач индустрии наноматериалов», Федеральной целевой программы Соглашение № 14.575.21.0009 УНИ RFMEFI57514X0009, 2014–2015 гг.; гранта Минобрнауки №5.2535.2014К, 2015-2016 гг.; «Исследование структурно-фазового состояния диффузионного слоя, формирующегося в стекле в результате сварки стекла С49-1 со сталью СтЗсп» Научный фонд ДВФУ, Соглашение № 12-02-13006-м-14/13, 2013-2014 гг.

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

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В **первой главе** проведен обзор основных способов изготовления стеклометаллокомпозита. Введены основные понятия, описывающие

специфику стеклообразного состояния; количественное описание реологических свойств стекла предложено определять с помощью фиктивной (структурной) температуры T_f , введенной впервые в работах Тула [1]. Описано влияние параметров температурной обработки (отжига) на формирование технологических и остаточных напряжений. Выполнена постановка задачи, при которой определены расчетные области (рис. 1) и температурные режимы для которых проводится исследование эволюции напряжений. Приведены основные допущения и обосновано решение несвязной задачи о термомеханических напряжениях: на первом этапе определяются температура в материале в зависимости от режима и фиктивная температура, а также все характеристики материалов, которые зависят от них; на втором этапе определяются технологические и остаточные напряжения.



Рис. 1. Стеклометаллокомпозит (стержень, труба) и расчетные области

Проведен обзор методов решения поставленной задачи, на основании которого предложено проводить математическое моделирование режимов температурной обработки стеклометаллокомпозита в геометрически сложных областях с использованием релаксационной теории отжига плоских спаев стекла с металлом, разработанной О.В. Мазуриным [2].

Во **второй** главе численно решена задача (1-7) определения температуры и структурных характеристик стеклометаллокомпозита цилиндрической формы (рис.1)

$$\frac{C_k P_k}{\Lambda_k} \frac{\partial T_k}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T_k}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T_k}{\partial z^2}, \quad (1)$$

где k - номер слоя: слой 1 - стекло, $r_0 \leq r \leq r_1 - \delta$ (для стержня $r_0=0$); слой 2 - диффузионная зона, $r_1 - \delta \leq r \leq r_1$; слой 3 - металл, $r_1 \leq r \leq r_2$; (у определяемых функций индекс слоя верхний в скобках, а теплофизических коэффициентов и механических параметров индекс слоя поставлен внизу без скобок); L - длина цилиндра ($0 \leq z \leq L$); C_k , P_k и A_k - удельная теплоемкость, плотность и коэффициент теплопроводности соответствующих слоев, причем, удельная теплоемкость 1 и 2-го слоев (т.е. при $k=1$ и 2) удовлетворяет соотношению

$$C_k = \begin{cases} C_k^l, & T_k \geq T_k^l, \\ \frac{dT_{fk}}{dT_k} (C_k^l - C_k^g) + C_k^g, & T_k^g < T_k < T_k^l, \\ C_k^g, & T_k \leq T_k^g, \end{cases} \quad (2)$$

где C_k^l , C_k^g , T_k^l и T_k^g - постоянные значения удельных теплоемкостей и температур жидкой и застеклованной равновесных фаз. Фиктивная температура определяется согласно методу Тула-Нарайанасвами-Мойнихана [1,3,4] в виде

$$T_{fk} = T_0 + \int_0^t (1 - M(\xi^{(k)}(t) - \xi^{(k)}(t'))) \frac{dT}{dt'} dt', \quad (3)$$

где T_0 - начальная температура. Для неизотермического процесса релаксация стекол $M(\xi)$ хорошо описывается функцией Кольрауша с замененной шкалой времени и приведенным временем ζ

$$M(\xi^{(k)}(t)) = \exp \left(- \left[\frac{\xi^{(k)}(t) \cdot K_s^{(k)}}{\eta_r} \right]^{b_s^{(k)}} \right), \quad (4)$$

$$\xi^{(k)}(t) = \int_0^t \frac{\eta_r}{\eta^{(k)}(t')} dt', \quad (5)$$

где $\eta^{(k)}$, η_r - динамическая вязкость и вязкость сравнения, выбранная при произвольной температуре T_r ; $K_s^{(k)}$ и $b_s^{(k)}$ - структурные параметры модели, $0,35 < b_s^{(k)} < 0,75$. Изменение структурной температуры сказывается на изменении всех свойств стекла и диффузионной зоны, в том числе вязкости

и коэффициента температурного расширения, при определении которых использованы аналитические выражения, предложенные в работах Мойнихана С.Т. [3] и Мазурина О.В. [2]

$$\lg \eta^{(k)} = \lg \eta_0 + (T_{fk}^{-1} - T_0^{-1}) B_e^{(k)} + (T^{-1} - T_{fk}^{-1}) B_m^{(k)}, \quad (6)$$

$$\alpha^{(k)} = \alpha_g^{(k)} + \left(\alpha_l^{(k)} - \alpha_g^{(k)} \right) \frac{dT_{fk}}{dT}, \quad (7)$$

где $B_e^{(k)}, B_m^{(k)}, \alpha_l^{(k)}$ и $\alpha_g^{(k)}$ - параметры материала в условиях равновесной (l, m) и замороженной (e, g) структуры. Задача (1)-(5) дополняется граничными условиями: на границах сопряжения слоев – по типу идеального контакта, на внешних - по типу краевых условий третьего рода.

Напряженное состояние с учетом гипотез плоского деформированного состояния и осевой симметрии в цилиндрической системе координат в постановке линейной теории вязкоупругости с использованием принципа наследственности Больцмана-Вольтерра сводится к решению системы интегро-дифференциальных уравнений, которые для релаксационных ядер типа Кольрауша с замененной шкалой времени не имеют аналитического решения даже в одномерных задачах. При выполнении данного исследования был изучен дискретный по времени метод расчета релаксационных напряжений и деформаций для плоских спаев предложенный в работе [2] и разработан общий дискретный подход для многослойных цилиндрических спаев. На каждом временном слое $\overline{\omega}_t = \{t_s = t_{s-1} + \Delta_t, s = \overline{1..S}\}$, решая термовязкоупругую задачу в цилиндрической системе координат с учетом осевой симметрии и плоского деформированного состояния (при $T(r, t) = T(t)$) определяем перемещения в каждом слое

$$u_r^{(k)}[s] = C_1^{(k)}[s]r + \frac{C_2^{(k)}[s]}{r}, \quad (8)$$

тогда термоупругие напряжения в каждом слое имеют вид

$$\sigma_{rr}^{(k)}[s] = (2\lambda_k + 2\mu_k) C_1^{(k)}[s] - \frac{2\mu_k}{r^2} C_2^{(k)}[s] - (3\lambda_k + 2\mu_k) \alpha^{(k)}[s] \Delta T[s], \quad (9)$$

$$\sigma_{\varphi\varphi}^{(k)}[s] = (2\lambda_k + 2\mu_k)C_1^{(k)}[s] + \frac{2\mu_k}{r^2}C_2^{(k)}[s] - (3\lambda_k + 2\mu_k)\alpha^{(k)}[s]\Delta T[s],$$

$$\sigma_{zz}^{(k)}[s] = 2\lambda_k C_1^{(k)}[s] - (3\lambda_k + 2\mu_k)\alpha^{(k)}[s]\Delta T[s],$$

где λ_k и μ_k - параметры Ламе соответствующих слоев, $\Delta T[s] = T[s] - T_0$.

Релаксацию каждой компоненты тензора напряжений определяем на каждом временном слое с использованием принципа Больцмана-Вольтерра

$$\sigma_{rel_ij}^{(k)}[s] = \sum_{s'=0}^{s-1} \left(\left(1 - \exp \left(- \left[\frac{(\xi^{(k)}[s] - \xi^{(k)}[s']) \cdot K_{\sigma}^{(k)}}{\eta_r^{(k)}} \right]^{b_{\sigma}^{(k)}} \right) \right) \Delta \sigma_{res_ij}^{(k)}[s'] \right), \quad k=1,2, \quad (10)$$

На начальном шаге по времени $\sigma_{res_ij}^{(k)}[0] = 0$, $\sigma_{ij}^{(k)}[s] = 0$. $K_{\sigma}^{(k)}$, $b_{\sigma}^{(k)}$ - параметры материала, $\xi^{(k)}[s]$ рассчитываются при решении температурной задачи (4)-(6), а $\alpha^{(k)}[s]$ согласно формуле (7).

Результирующие напряжения определяются в виде

$$\begin{aligned} \sigma_{res_ij}^{(k)}[s] &= \sigma_{ij}^{(k)}[s] - \sigma_{rel_ij}^{(k)}[s], \quad k=1,2 \\ \sigma_{res_ij}^{(3)}[s] &= \sigma_{ij}^{(3)}[s]. \end{aligned} \quad (11)$$

В системе (11) с учетом (9) и (10) на каждом шаге по времени имеем неизвестные переменные $C_1^{(k)}[s]$ и $C_2^{(k)}[s]$, которые находятся из решения системы (12), представляющей краевые условия вакуумноплотного спая, т.е. спая с идеальным контактом на границе сопряжения слоев

$$\begin{aligned} u_r^{(1)}[s] \Big|_{r=r_1-\delta} &= u_r^{(2)}[s] \Big|_{r=r_1-\delta}, & u_r^{(2)}[s] \Big|_{r=r_1} &= u_r^{(3)}[s] \Big|_{r=r_1}, \\ \sigma_{res_rr}^{(1)}[s] \Big|_{r=r_1-\delta} &= \sigma_{res_rr}^{(2)}[s] \Big|_{r=r_1-\delta}, & \sigma_{res_rr}^{(2)}[s] \Big|_{r=r_1} &= \sigma_{res_rr}^{(3)}[s] \Big|_{r=r_1}, \\ \sigma_{res_rr}^{(1)}[s] \Big|_{r=r_0} &= 0, & \sigma_{res_rr}^{(3)}[s] \Big|_{r=r_2} &= 0. \end{aligned} \quad (12)$$

Заметим, что при определении напряжений в стержне в соотношениях (8) и (9) $C_2^{(1)}[s] = 0$. Предложенный дискретный метод был апробирован и сравнивался с аналитическим решением полученным при решении

термовязкоупругой задачи для двухслойного стержня с ядром релаксации Максвелла ($b_{\sigma}^{(k)} = 1$ в формуле (10)).

Соотношения (4)-(12) представляют модель эволюции напряжений, учитывающую свойства зоны соединения стекло-металл при температурном воздействии с параметрами релаксации в компонентах.

Расчетные области практически используемых стеклометаллокомпозитов удовлетворяют следующим ограничениям: $2r_2/L \leq 0,1$; $r_2 \leq 40$ мм (для стержней); $r_2 - r_0 \leq 40$ мм (для труб). При численной реализации температурной задачи (1)-(6) для указанных геометрических характеристик замечено, что при равномерном охлаждении (нагревании) со скоростью до 10 °С/мин разница в температуре по длине цилиндров составляет менее 4% , изменение температуры по радиусу составляет сотые доли 1 °С. Поэтому при условии равномерного изменения температурного режима на внешних поверхностях цилиндра возможна аппроксимация изменения температуры в расчетных областях заданной температурой режима. Все расчеты выполнены для определенных теплофизических характеристик 1 и 3-ого слоев: стекло С52-1 и сталь Ст5сп, параметры 2-ого слоя варьировались. Анализ изменения T_f (рис. 2) позволяет выделить температурный интервал (540 °С, 567 °С), из которого следует выбирать верхнюю температуру отжига. Скорость изменения T_f (рис. 2) позволяет не только рассчитать некоторые характеристики (рис. 3), но и проверить адекватность численных расчетов.

На рис. 4 приведены зависимости остаточных напряжений σ_{rr} и $\sigma_{\varphi\varphi}$ от толщины переходной зоны для полого стеклометаллического цилиндра.

Для сплошного цилиндра увеличение толщины диффузионной зоны δ приводит к незначительному увеличению сжимающих радиальных напряжений в стекле $\sigma_{rr}^{(1)}$. Например, при $\delta = 1$ мкм $\sigma_{rr}^{(1)} \approx -103,603$ МПа, при $\delta = 100$ мкм $\sigma_{rr}^{(1)} \approx -103,611$ МПа и при $\delta = 200$ мкм $\sigma_{rr}^{(1)} \approx -103,616$ МПа. При таких же значениях толщин (растягивающие) напряжения в металле $\sigma_{\varphi\varphi}^{(3)}$ уменьшаются примерно на 1 МПа. Для полого цилиндра увеличение

толщины диффузионной зоны δ приводит к увеличению напряжений $\sigma_{\varphi\varphi}^{(2)}$, например, в переходной зоне напряжения $\sigma_{\varphi\varphi}^{(2)} \approx -238,5$ МПа при $\delta=1$ мкм.

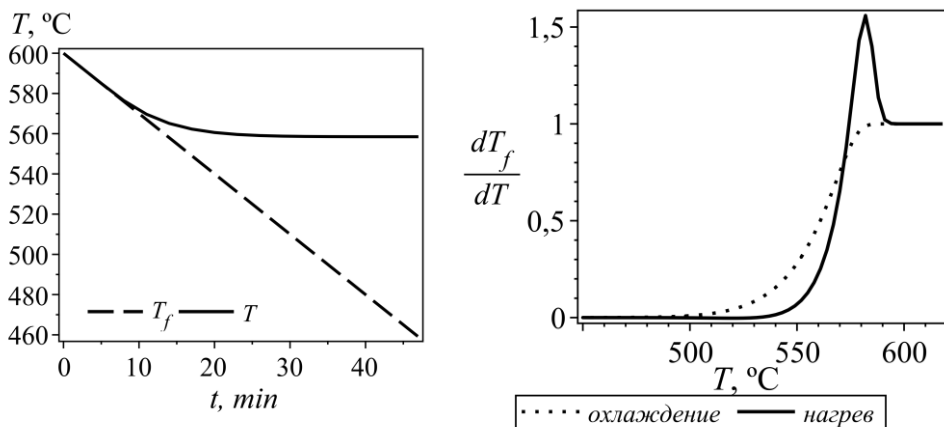


Рис. 2. Изменение T_f при охлаждении с постоянной скоростью и скорость изменения T_f при охлаждении и нагреве

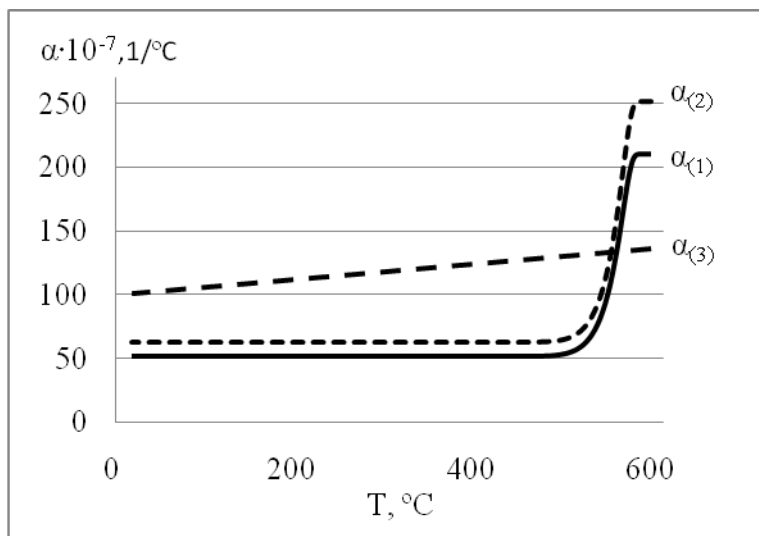


Рис. 3. Изменение коэффициентов температурного расширения в расчетных областях

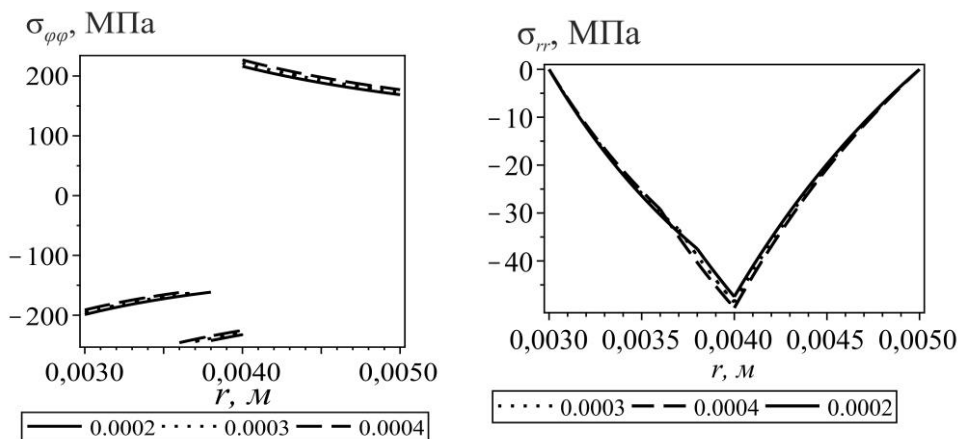
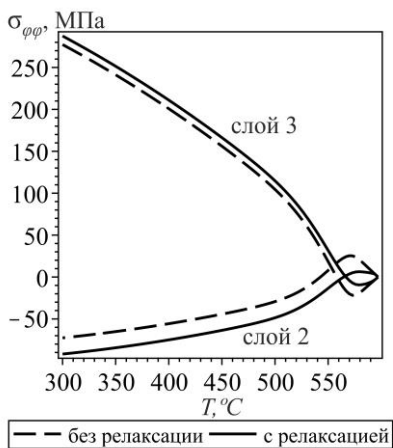
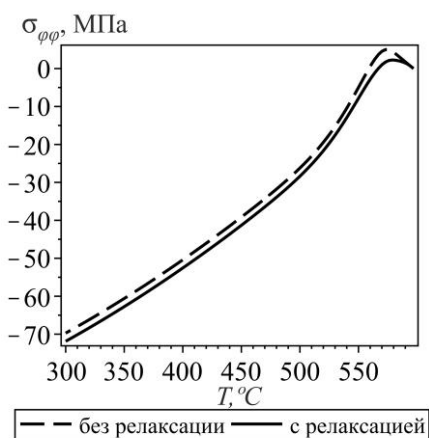


Рис. 4. Распределение остаточных напряжений при охлаждении от 550 до 19 °С со скоростью 3 °С/мин при $\alpha_2 > \alpha_1$

На рис. 5 и 6 приведены расчетные значения напряжений в спае при разных коэффициентах линейного температурного расширения в диффузионной зоне для $\delta=100$ мкм. Из анализа рис. 5 и 6 выявлено, что в случае, когда диффузионная зона характеризуется следующими параметрами: $\alpha_2 < \alpha_1$ или $\alpha_2 > \alpha_3$ напряжения в спае могут приводить либо к растрескиванию спая в переходной слое (рис. 6а) либо к отслоению материалов (рис. 6б). Поэтому, для оценки влияния параметров температурного режима использовался спай с параметрами диффузионной зоны для случая, когда $\alpha_2 > \alpha_1$. Выявлено, что выдержка в интервале 540 °С – 567 °С позволяет снизить напряжения в компонентах спая в значительной мере. Например, для $\delta=100$ мкм напряжения $\sigma_{rr}^{(1)}$ при температуре 21 °С составляют примерно -103,61 МПа при охлаждении со скоростью 3 °С/мин, а режим охлаждения 3 °С/мин с промежуточной выдержкой при 561 °С в течении 2 часов позволяет получить спай с радиальными напряжениями в стекле около -100,59 МПа. При температуре 540 °С и ниже наличие релаксационных процессов для материалов выбранных составов не выявлено, значит, в этом температурном интервале скорость охлаждения не оказывает влияния на напряжения в компонентах.

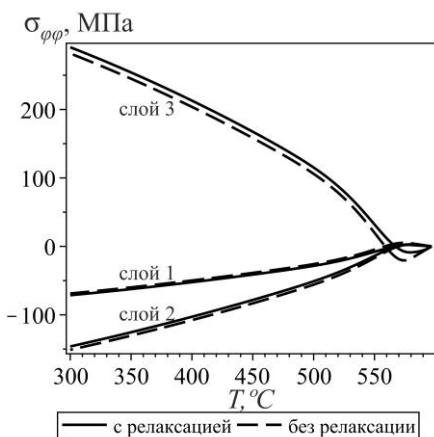


а

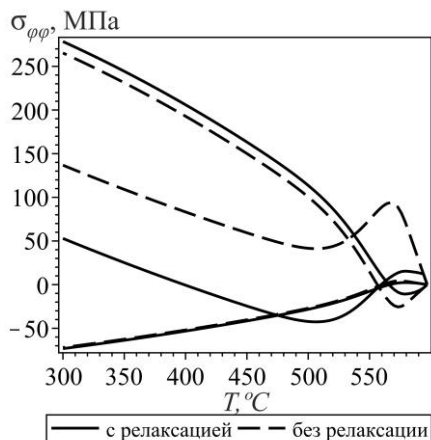


б

Рис. 5. Средние напряжения в компонентах спая при 300 °С при охлаждении от 600 со скоростью 3 °С/мин ($\alpha_2 > \alpha_1$): а) в металле и диффузионной зоне; б) в стекле



а



б

Рис. 6. Средние напряжения в компонентах спая при 300 °С при охлаждении от 600°С со скоростью 3 °С/мин: а) $\alpha_2 < \alpha_1$; б) $\alpha_2 > \alpha_3$

Третья глава посвящена моделированию напряжений в компонентах спая с учетом качества соединения стекла и металла. В целом эта задача аналогична задаче, рассмотренной в Главе 2, за исключением предположения об обобщенном плоском деформированном состоянии, которое позволяет учесть разницу в термоупругом деформировании слоев на границе их контакта через разную осевую деформацию в слоях

$$\varepsilon_{zz}^{(k)} = C_3^{(k)}(t),$$

Перемещение в каждом слое определяются соотношением (8), тогда компоненты тензора напряжений зависят от переменных $C_1^{(k)}(t)$ и $C_3^{(k)}(t)$, для определения которых условия (12) дополняются условием отсутствия нагрузки на торцах

$$\int_{r_0}^{r_1} \sigma_{res_zz}^{(1)} r dr = - \int_{r_1}^{r_2} \sigma_{res_zz}^{(2)} r dr, \quad (13)$$

степень сцепления цилиндров определяет зависимость между осевыми деформациями

$$\varepsilon_{zz}^{(1)} - \varepsilon_{zz}^{(2)} = (1 - \chi) \Delta \varepsilon_{zz}, \quad (14)$$

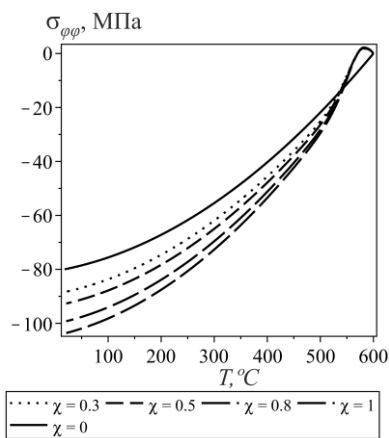
где χ – степень сцепления цилиндров ($0 \leq \chi \leq 1$), $\Delta \varepsilon_{zz}(t)$ – разность осевых деформаций в случае отсутствия сцепления между цилиндрами, т.е. $\chi=0$ (соединение внатяг). При отсутствии сцепления между цилиндрами условия (13) и (14) заменяются следующими

$$\int_{r_0}^{r_1} \sigma_{res_zz}^{(1)} r dr = 0, \quad \int_{r_1}^{r_2} \sigma_{res_zz}^{(2)} r dr = 0. \quad (15)$$

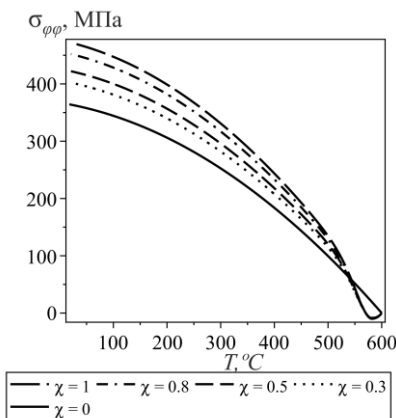
Релаксация напряжений определяется дискретным методом, описанным в Главе 2, т.е. результирующие напряжения $\sigma_{res_ij}^{(k)}$ определяются термоупругими $\sigma_{ij}^{(k)}$ и отрелаксированными к данному моменты времени напряжениями $\sigma_{rel_ij}^{(k)}$. $C_1^{(k)}(t), C_2^{(k)}(t), C_3^{(k)}(t)$ при $\chi \neq 0$ на каждом временном слое определяются последовательно: сначала при $\chi=0$

из условий (12) и (15) с целью определения $\Delta \varepsilon_{zz}(t)$, а затем из условий (12), (13) и (14). После этого определяются напряжения $\sigma_{res_ij}^{(k)}(C_1^{(k)}[s], C_2^{(k)}[s], C_3^{(k)}[s])$.

На рис. 7, 8 приведены результаты расчета напряжений в сплошном стеклометаллическом цилиндре для различных значений χ . В среднем, в зависимости от степени сцепления χ , разброс напряжений $\sigma_{\varphi\varphi}^{(k)}$ в стекле составляет около 22 МПа, а в металле – около 98 МПа (рис. 7). На рис. 8 приведены значения напряжений в компонентах спая при охлаждении со скоростью 3 °С/мин при $\chi=1$. При охлаждении в упругой области напряжения принимают наибольшие значения в случае полного контакта между цилиндрами (рис. 8). Замечено, что при учете сцепления по типу граничных условий (12)-(14) осевые напряжения примерно в 4,5 раза превосходят аналогичные в случае идеального контакта (рис. 9).

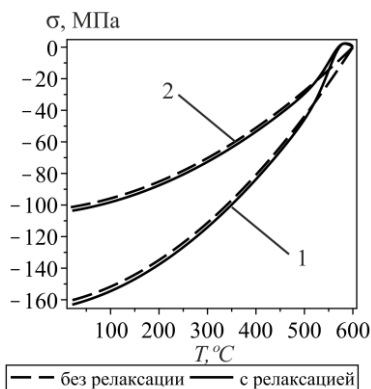


а

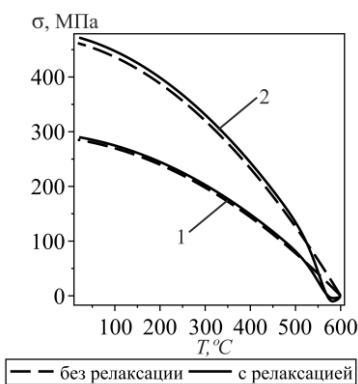


б

Рис. 7. Напряжения $\sigma_{\varphi\varphi}^{(k)}$ в компонентах спая для разных значений χ на границе соединения при охлаждении от 600 °С со скоростью 3 °С/мин: а) в стекле; б) в металле

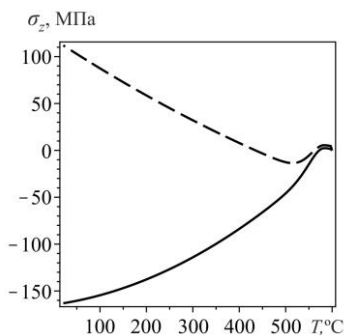


а

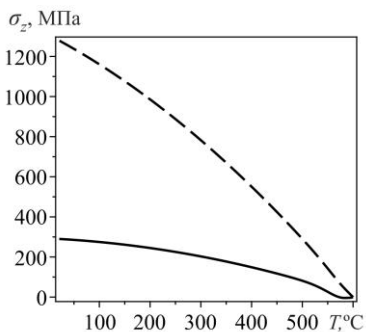


б

Рис. 8. Напряжения (индексом 1 обозначены $\sigma_{zz}^{(k)}$, 2 – $\sigma_{\varphi\varphi}^{(k)}$) в компонентах композита при $\chi=1$ на границе соединения: а) в стекле; б) в металле



а



б

Рис. 9. Осевые напряжения в компонентах спая: а) в стекле; б) в металле.

Сплошная линия - $\varepsilon_{zz} = C(t)$, штриховая линия - $\varepsilon_{zz} = 0$

Четвертая глава посвящена анализу напряжений в условиях резкого охлаждения. Решена задача определения напряжений вакуумноплотного спая при охлаждении за короткое время. Неравномерное распределение температуры по слоям влияет на релаксационные свойства стекла. Область более высоких температур находится ближе к центру, в начале охлаждения в этой области происходят релаксационные процессы, структурная

температура отличается от температурного поля (рис. 10). В области, примыкающей к наружным поверхностям, температурное распределение не позволяет протекать релаксационным процессам. Это означает, что структурная температура повторяет температурное поле. При резком охлаждении с третьей минуты после начала охлаждения фиктивная температура T_f не изменяется со временем. На рис. 11 представлены зависимости температурного коэффициента линейного расширения стекла от радиуса, показывающие области жидкой и твердой фазы в начале охлаждения.

Следует обратить внимание на то, что в начале охлаждения релаксационные процессы происходят только в центральной области. В начале охлаждения, сразу после скачка температур, накопленные напряжения не релаксируют, на границе соединения стекло-металл в стекле формируются сжимающие напряжения $\sigma_{\varphi\varphi}^{(1)}$. Кривые распределения напряжений $\sigma_{rr}^{(1)}$, $\sigma_{\varphi\varphi}^{(1)}$ и $\sigma_{zz}^{(1)}$ в стекле качественно совпадают. В стекле, ближе к центру, за счет релаксации сжимающие напряжения становятся меньше (рис. 12).

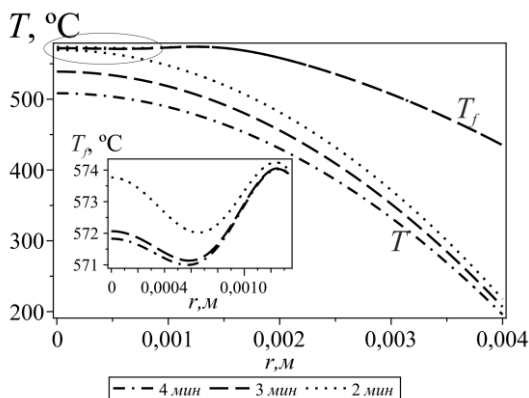


Рис. 10. Изменение T_f при охлаждении от 600°C за 20 мин в различные моменты времени

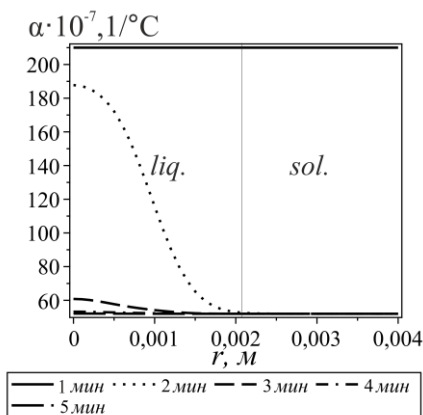


Рис. 11. Распределение температурного коэффициента линейного расширения стекла в начале охлаждения

В начале охлаждения в центральной области происходит увеличение сжимающих напряжений, которые уменьшаются по мере перехода стеклообразной жидкости в твердое состояние, что свидетельствует о формировании специальной (сжатой) зоны в центре. Образцы стеклометаллокомпозитного стержня, отжиг которых проходил с существенно различными скоростями ≤ 3 °C/мин и ≥ 20 °C/мин, отличаются не только значением прочности на разрыв, но и характером разрушения (рис. 13).

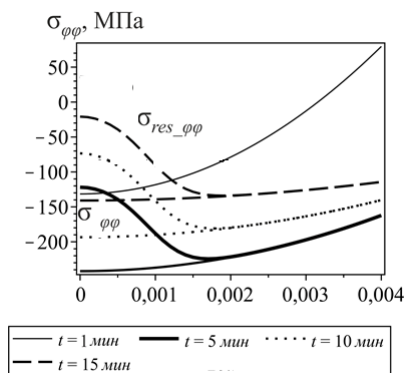
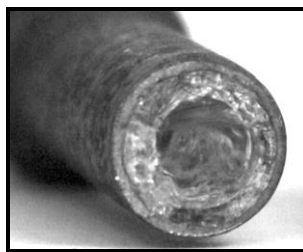


Рис. 12. Распределение напряжений $\sigma_{\varphi\varphi}^{(1)}$ в стекле с учетом и без учета релаксации



а



б

Рис. 13. Фотографии экспериментальных образцов стеклометаллокомпозитного стержня, полученные методами медленного (а) и резкого (б) охлаждения от $600\text{ }^{\circ}\text{C}$, после статических испытаний на разрыв

В заключении сформулированы основные результаты работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ РАБОТЫ

1. Предложена математическая модель процесса отжига стеклометаллокомпозитов, которая учитывает реологические процессы в стекле и металле, качество их сцепления и свойства зоны соединения в случае наличия химической реакции и диффузии в зоне соединения стекла и металла.

2. Разработан метод расчета эволюции напряженного состояния стеклометаллокомпозита на всем температурно-временном интервале отжига, с учетом зависимости его физико-механических свойств от температуры, структурных изменений и качества сцепления слоев стекла и металла.

3. Проведенный параметрический анализ переходной зоны выявил ее оптимальные характеристики. Установлено, что определение технологических и остаточных напряжений в стеклометаллокомпозитах без учета сцепления слоев может привести к неверным количественным оценкам напряжений.

4. Определены оптимальные значения скорости изменения температуры и времени изотермической выдержки для отжига стеклометаллокомпозитов на основе стекла и стали определенных марок.

5. Перспективы дальнейших исследований связаны с усовершенствованием математической модели, в части учета пластического деформирования металлических слоев, и экспериментальным исследованием технологических и остаточных напряжений в стекломаталлокомпозите.

6. Разработанные модели могут применяться при изготовлении и отжиге аморфных покрытий, сварных соединений разнородных материалов и слоистых композитов на основе аморфных материалов.

Список цитируемой литературы

1. Tool A.Q. Relation between inelastic deformability and thermal expansion of glass in its annealing range/ A.Q. Tool // J.Amer.Ceram.Soc. -1946, -№9(29), -P.240-253.
2. Narayanaswamy O.S. Model of structural relaxation in glass/ O.S. Narayanaswamy// J.Amer.Ceram.Soc. -1971. -№10(54). -P. 491-498.
3. Мазурин О.В. Отжиг спаев стекла с металлом / О.В. Мазурин.- Л.,- 1980. -140 с.
4. Moynihan C.T. Structural relaxation in vitreous materials / C.T.Моynihan, P. B. Macedo, C. J. Montrose et al. // Ann. NY Acad. Sci. - 1976. -№249. -P. 15-35.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук:

1. Любимова О.Н. Термические напряжения в стекломаталлокомпозитном стержне с учетом свойств зоны соединения / О.Н. Любимова, Э.П. Солоненко, А.В. Морковин // Вестник ЧГПУ им. И. Я. Яковлева Серия: Механика предельного состояния. -2015.- № 3 (25). -С. 131-137.
2. Любимова О.Н. Моделирование поведения несогласованного спая стекла с металлом с учетом свойств зоны соединения/ О.Н. Любимова, Э.П. Солоненко // Физическая мезомеханика. -2016. -№ 2 (19). -С. 114-119.

3. Солоненко Э.П. Вычисление температурных напряжений в вязкоупругом цилиндрическом спае/ Э.П. Солоненко// Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016661022. – дата регистрации 28.09.2016.

Прочие публикации

4. Lyubimova O.N. Thermo-mechanical relaxation of stresses in a glass-metal junction/ O.N. Lyubimova, E.P. Solonenko //Journal of Physics: Conference Series. -2016.- Vol.754- 082002. (SCOPUS)

5. Lyubimova O.N. Research of Structure, Mechanical and Operation Properties of Glass-Metal Composites / O. N. Lyubimova, E. V. Lyubimov, E. P. Solonenko, A. V. Morkovin and S. A. Dryuk // International Conference on Advanced Materials with Hierarchical Structure for New Technologies and Reliable Structures. – 2016. – Vol. 1783. - 020141-1 – 020141-4.

6. Любимова О.Н. Моделирование термических напряжений при охлаждении несогласованного спая стекла с металлом / О.Н. Любимова, Э.П. Солоненко // Четвертая международная конференция «Математическая физика и её приложения». – Самара: СамГТУ, 2014. -С. 232-234.

7. Zinchenko A.A. Investigation of possibilities of application recently developed composite materials – glass-metal-composite in specific constructions/ A.A. Zinchenko , E.P. Solonenko // European Science and Technology. Materials of the VIII international research and practice conference. - Munich, 2014. -P. 419-425.

8. Любимова О.Н. Механические напряжения в изменяющейся зоне соединения стекла со сталью / О.Н. Любимова, Э.П. Солоненко, А.В. Морковин // Материалы всероссийской научной школы-конференции “Механика предельного состояния и смежные вопросы”, посвященной 85-летию профессора Д.Д. ИВЛЕВА. -Чебоксары: ЧГПУ, 2015. -№1. - С. 154-160.

9. Любимова О.Н. Исследование стекломаталлокомпозита на сопротивление термическим нагрузкам / О.Н. Любимова, Э.П. Солоненко // Научный форум Сибирь. -2016. -№3 (2). -С. 10-11.

10. Любимова О.Н. Релаксация термомеханических напряжений в цилиндрических спаих стекла с металлом / О.Н. Любимова, Э.П. Солоненко // Тезисы докладов Всероссийская научная конференция теплофизика и физическая гидродинамика с элементами школы молодых ученых. –Ялта, 2016. -С. 113.
11. Любимова О.Н. Метод расчета технологических напряжений в двухслойном цилиндрическом спае металла со стеклом при резком охлаждении / О.Н. Любимова, Э.П. Солоненко // Механика деформируемого твердого тела. Сборник трудов IX Всероссийской конференции в рамках Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики». Серия: Прикладные задачи механики деформируемого твердого тела. - Воронеж, 2016. -С.123-126.
12. Любимова О.Н. Технологические напряжения в цилиндрическом спае стекла с металлом с учетом степени сцепления на границе контакта / О.Н. Любимова, Э.П. Солоненко // Математическое моделирование в естественных науках. Материалы XXV Всероссийской школы-конференции молодых ученых и студентов. - Пермь: ПНИПУ, 2016. – С.203-208.