

М. А. Барботько, О. Н. Любимова, А. А. Стрельцов

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПАРАМЕТРОВ СТЕКЛОВАНИЯ В КОНСТРУКТИВНОМ ЭЛЕМЕНТЕ СТЕКЛОМЕТАЛЛОКОМПОЗИТА

Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток, Россия

Аннотация. В работе рассматривается задача экспериментального определения термомеханических свойств композиционных материалов на основе стекло–металлических соединений. Проведено сравнение результатов экспериментальных исследований параметров стеклования для стеклянного сердечника, входящего в состав стекло–металлического соединения (стекло–металлокомпозит) и для материала, из которого выполнен данный сердечник. Особое внимание уделяется изменению линейного размера в интервале стеклования, в котором происходит резкое изменение термомеханических свойств стекла, и их влиянию на напряженно-деформируемое состояние в стекло–металлических соединениях.

Ключевые слова: температура стеклования, линейное температурное расширение, dilatометрические изменения.

DOI: 10.37972/chgpu.2023.58.4.006

УДК: 531

Введение. Актуальность исследования обоснована расширяющимся применением стекло – металлических соединений и получением новых композиционных и

© Барботько М. А, Любимова О. Н, Стрельцов А. А., 2023

Барботько Максим Андреевич

e-mail: Gsm_1234@mail.ru, ассистент Департамента математики, Институт математики и компьютерных технологий, Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток, Россия.

Любимова Ольга Николаевна

e-mail: lyubimova.on@dvvfu.ru, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник Департамента мониторинга и освоения георесурсов, заведующий лаборатории механики геоматериалов Научно-исследовательского и образовательного центра геомеханики и геодинамики сильно сжатых горных пород и массивов, Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток, Россия.

Стрельцов Алексей Александрович

e-mail: streltcov1999@gmail.com, аспирант Департамента морской техники и транспорта, Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток, Россия

Исследование выполнено при финансовой поддержке ДВФУ, номер проекта 22-07-01-007.

Поступила 10.12.2023

конструкционных материалов на их основе. Проектирование и разработка технологических основ получения подобных материалов, исследование свойств и их изменений при разных нагрузках связаны с фундаментальными проблемами физики и механики материалов в задачах о структурных изменениях в определенных температурных интервалах. Технологический процесс производства подобных материалов включает в себя температурную обработку, при которой стеклюющийся материал находится в виде высоковязкой жидкости, смачивает металлическую поверхность, создавая прочное адгезионное соединение. При этом критически важным являются требования хорошего смачивания и малых остаточных напряжений в стекле после отверждения, чтобы в процессе эксплуатации готового изделия, приложенная внешняя нагрузка не вызывала опасных концентраций напряжений, ведущих к преждевременному разрушению. Возникновение таких напряжений связано с разницей температурных коэффициентов линейного расширения и структурных изменений в стеклюющемся материале, как вследствие диффузионных процессов на границе контакта стекла и металла, так и в результате неравномерного изменения температуры по объему стеклюющегося слоя [1–4]. Кроме практических аспектов актуальности, фундаментальные теоретические проблемы стеклования связаны с отсутствием общих модельных представлений [5, 6]. Одновременно развиваются модельные подходы моделирующие стеклования как фазовые переходы второго рода [5] и модели на основе представления стеклования как кинетического процесса, например, релаксационные модели Тула-Нарайанасвами-Мазурина-Мойнихана [7], Бартенева-Ритланда [8], Волькенштейна-Птицына [5] и Немилова [9].

В релаксационной теории стеклования оценку времени релаксации часто проводят используя соотношения:

$$q\tau_g = \delta T_g, \quad (1)$$

$$q\tau_g = \frac{C_2}{C_1}, \quad (2)$$

здесь q — скорость изменения температуры, τ_g — время релаксации при T_g , C_2/C_1 — константа, связанная с константами в уравнение Вильямса-Ландела-Ферри позволяющие оценить в уравнении Вильямса-Ландела-Ферри (ВЛФ) относительное время релаксации (относительную вязкость) α_T

$$\ln \alpha_T = -C_1 \frac{T - T_g}{T - T_g + C_2}, \quad \alpha_T = \frac{\tau(T)}{\tau T_g} = \frac{\eta(T)}{\eta(T_g)} \quad (3)$$

Исследования линейного температурного расширения и его скорости изменения в интервале стеклования обычно включают определение отдельных параметров для уравнений (3) и (1) (2), а также зависимостей температуры и полосы стеклования для всего интервала стеклования, от скорости изменения температуры [10]. Подавляющее большинство экспериментальных исследований линейного расширения материалов проводятся для стандартной скорости изменения температуры ($q = 3\text{К} \cdot \text{мин}^{-1} = 0,05\text{К} \cdot \text{с}^{-1}$), вместе с тем реальные технологические процессы требуют изучения более широкого интервала изменения скорости и влияния зависимости скорости нагрева (охлаждения) от температуры.

Для термомеханических свойств стеклянной компоненты в стекло-металлическом соединении определяющим является температурный интервал стеклования (ΔT_g) в

котором изменяется структура и свойства стекла. Верхний предел интервала стеклования ограничен температурой текучести (T_f), а нижний — 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)) в релаксационной теории являются наиболее удобными параметрами для анализа свойств стекол в интервале стеклования. Но актуальной остается проблема поиска корректных методов расчета (T_g) и (δT_g) для стеклующихся материалов [5, 9–13]. Экспериментально доказана зависимость структурных изменений и параметров стеклования от скорости охлаждения и нагрева образца (q , К/мин). [6, 8, 14–16].

Целью данной работы являлось экспериментальное исследование и моделирование термомеханических свойств стеклянной составляющей в стекло-металлическом соединении при нагреве с разными скоростями, для установления зависимости влияния сопряженного термдеформирования на параметры стеклования в стеклующемся слое. При теоретических расчетах термомеханического поведения стекло-металлических соединений с учетом неоднородной структуры, разной реологии и структурных изменений, выявлено, что в интервале стеклования структурные изменения стеклующегося слоя приводят к формированию растягивающих напряжений даже в геометрии подразумевающей при проектировании соединения только сжимающие напряжения, что по-видимому является одной из главных причин развития дефектов и понижения прочности соединения [2, 3].

Для установления закономерности поведения коэффициента линейного температурного расширения в стекло-металлических соединениях были проведены экспериментальные исследования линейного расширения стеклянной составляющей для цилиндрических элементов стеклометаллокомпозита в виде стержней состоящих из стеклянного сердечника и стальной оболочки. Первые исследования проводились с использованием трубчатой муфельной печи с измерителем перемещений расположенном вертикально. Ошибка при измерении температуры составляла $\pm 0,5$ ($^{\circ}\text{C}$), точность отсчета удлинения образца при расширении составляла $\pm 10^{-6}$ (м). В качестве исследуемых образцов, были изготовлены стеклометаллокомпозитные стержни длиной $50 \cdot 10^{-6}$ (м) со стеклянным сердечником из стекла С52–1 диаметром $8 \cdot 10^{-6}$ (м) и стальной оболочкой из стали Ст20 толщиной 1 мм, а также образцы из отожжённого стекла С52–1 диаметром и длиной $8 \cdot 10^{-6}$ (м) и $50 \cdot 10^{-6}$ (м), соответственно. Исследования проводились при разных скоростях нагрева 3 и 6 ($^{\circ}\text{C}/\text{мин}$). Несмотря на соответствие результатов измерения линейного расширения и параметров в интервале стеклования для стекла С52–1 с имеющимися экспериментальными данными [10, 17] экспериментальные исследования обладали рядом неблагоприятных факторов, среди которых: ограничение по изменению скорости нагрева, необходимость в использовании подставок для образцов, вертикальное расположение и как следствие давление со стороны кварцевого измерителя и временные ограничения связанные с временем ожидания стабилизации температуры в камере нагрева.

Анализ и обзор дилатометрических установок, выпускаемых как отечественными, так и зарубежными компаниями, показал, что они имеют продолжительное время ожидания между экспериментами, это связано с долгим охлаждением всех компонентов установки, и несовершенством систем регистрации микроперемещений, существенными являются также их стоимость и ограничение по приобретению зарубежных дилатометров. Таким образом, разработка простых и воспроизводимых дилатометров

для исследования композиционных и конструкционных материалов с широким диапазоном возможных значений коэффициентов линейного температурного расширения остается актуальной задачей, стоящей перед экспериментальной физикой и отечественным приборостроением [18].

1. Приборы, материалы и методика измерений. В лабораторных условиях спроектирована и изготовлена установка с горизонтальной загрузкой образцов и индукционным нагревом, выполняющая функцию dilatометра (далее коротко, Дт-ГИ, рис. 1) для которой достигнуты следующие показатели: 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 пластической деформации образца в области размягчения стекла; однородность температуры всех участков экспериментального образца; простотой метод сборки, способа эксплуатации аппаратуры и размещения экспериментального образца, возможность проведения до 5 экспериментов в день. С торцов экспериментального образца размещаются два кварцевых стержня: опорный и толкатель. Контроль температуры осуществляют две термодпары типа К (хромель-алюмель): подведенные к образцу в середине длины и к одному из торцов, допускается разница в температурах не выше $\pm 10^{-1}(\text{°C})$ ВВ качестве измерителя линейного перемещения используется цифровой микрометр и видеокамера для непрерывной записи показаний с микрометра (рис. 1 г).

Экспериментальные образцы имеют размеры: длину $50 \cdot 10^{-6}$ (м) и диаметр $10 \cdot 10^{-6}$ (м). Нагрев происходит при помощи индукционной печи. Принцип работы печи заключается в преобразовании энергии электромагнитного поля, поглощаемой электропроводным нагреваемым объектом, в тепловую энергию. В установке электромагнитное поле создает индуктор, который представляет собой многovitkovую цилиндрическую катушку. Температура нагреваемого объекта в индукционной печи может достигать $2000(\text{°C})$, для избежания перегрева индуктора, в конструкции печи имеется система жидкостного охлаждения. В качестве нагреваемого объекта выступает графитовый тигель, помещенный в центр индуктора, в котором энергия индуктированного переменного электрического поля необратимо переходит в тепловую. Для корректировки проводимых измерений определялись удлинения всех частей установки в рабочем диапазоне температур $20 \div 800(\text{°C})$. Подготовленные экспериментальные образцы двух типов (рис.2 а и б) устанавливались в камеру Дт-ГИ и нагревались до температуры, при которой наблюдался обратный ход датчика измерений. Для получения удлинения образца, из показаний, полученных в ходе экспериментального исследования, вычитались значения удлинений всех составных частей экспериментальной установки.

2. Обсуждение результатов. При определении параметров релаксации напряжений в соединениях стекла с другими материалами, ответственными параметрами являются характеристики изменения линейных размеров, поэтому была поставлена задача о разработке метода экспериментального определения следующих величин: $T_g, \delta T_g, \Delta T_g$ и T_f . При этом каждое значение определяется как результат пересечения линий линейной регрессии на соответствующих температурных интервалах (рис.2 в) $T_g = (a) \cup (b)$, $T_w = (b) \cap (c)$, $T_f = \max(d)$, $\delta T_g = T_g^+ - T_g^-$ и $\Delta T_g = T_w - T_g$. Определение

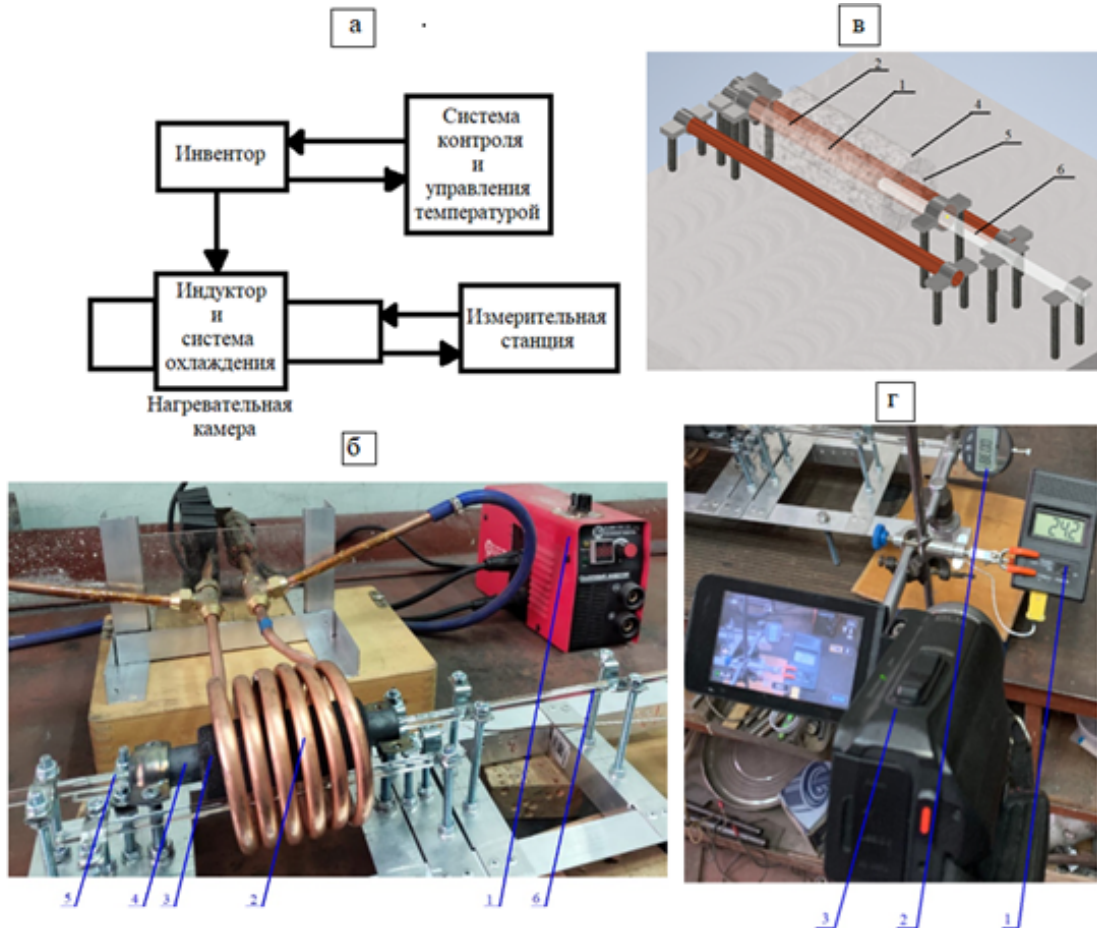


Рис. 1 . а) Общая блок-схема Дт-ГИ; б)нагревательная камера и инвентор: 1 – инвентор; 2 –индуктор; 3 – графитовый тигель; 4 – медная труба; 5 – опорный стержень; 6 – толкатель; в) 3D чертеж нагревательной камеры установки: 1 – образец; 2 – опорный стержень; 3 – толкатель; 4 –графитовый тигель; 5 – медная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

перечисленных параметров для стеклометаллокомпозита связано с исследованием характера изменения линейного расширения. По определенным экспериментально $\Delta l, T$ и q , определяются $\alpha, T_g, \delta T_g, \Delta T_g, T_f$ и α_T далее из соотношений последовательно могут быть получены τ_g из (1), C_1 и C_2 из (2) и относительное время или вязкость релаксации из (3). Найденные параметры позволят уточнить модельные представления о напряженно-деформированном состоянии в конструктивных элементах стеклометаллокомпозита и скорректировать параметры его отжига.

Для полученных выборок по каждой характеристике приводились значения математического ожидания, дисперсии и доверительных интервалов (табл.1). Температурный коэффициент линейного температурного расширения определялся с изменяющимся шагом по температуре: в интервале $25 \div 400(^{\circ}C) - \Delta T = 5(^{\circ}C)$;

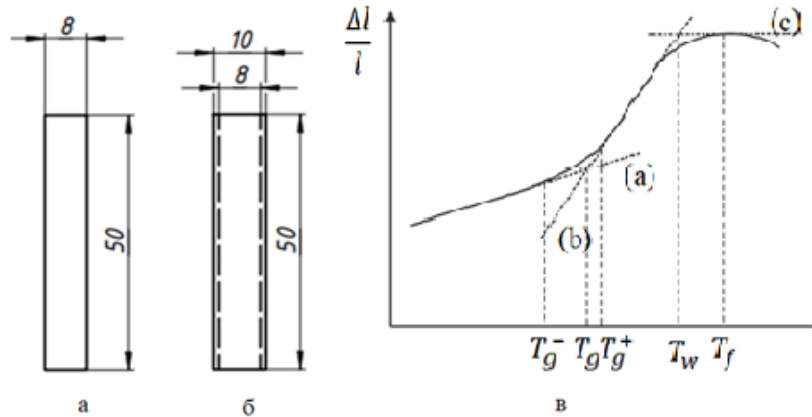


Рис.2. Типы экспериментальных образцов: а) стекло; б) стеклометаллокомпозит; в) схема определения контрольных параметров в интервале стеклования

$400 \div 650(^{\circ}C) - \Delta T = 1(^{\circ}C)$. Для каждой экспериментальной кривой линейного расширения определялись температурный коэффициент линейного расширения $\alpha, (^{\circ}C^{-1})$, интервал стеклования (ΔT_g), полоса стеклования (δT_g), температура стеклования T_g , температура текучести T_f и температура размягчения T_w (рис. 3 и 4). В общем было исследовано 81 экспериментальных образцов (без учета установочных экспериментов и отбраковки после анализа и выявления аномалий (выбросов) по данным), из них 38 образцов из стеклянных палочек С52–1, остальные стеклометаллокомпозитные стержни (СМК) со стеклянным сердечником из С52–1 и стальной оболочкой, со скоростями нагрева $q_1 = 10(^{\circ}C \cdot \text{мин}^{-1})$, $q_2 = 15(^{\circ}C \cdot \text{мин}^{-1})$.

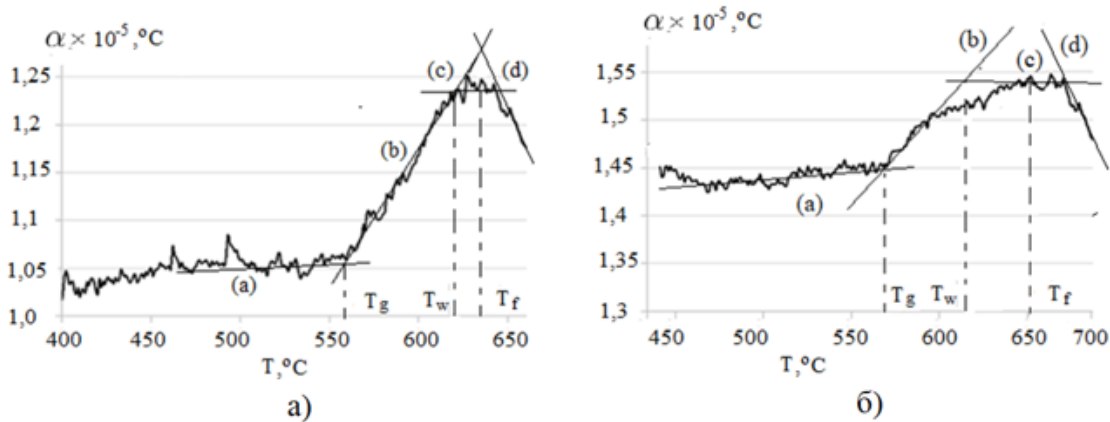


Рис. 3 Экспериментальные данные скорости изменения линейного температурного расширения и значения характерных температур при скорости нагрева $q_1 = 10(^{\circ}C \cdot \text{мин}^{-1})$ для а) С52–1; б)СМК

Аналитическое уравнение (3) с экспериментальными параметрами (табл.1) принимает вид (4) и (5) для С52–1 при $q_1 = 10(^{\circ}C \cdot \text{мин}^{-1})$, $q_2 = 15(^{\circ}C \cdot \text{мин}^{-1})$ соответственно

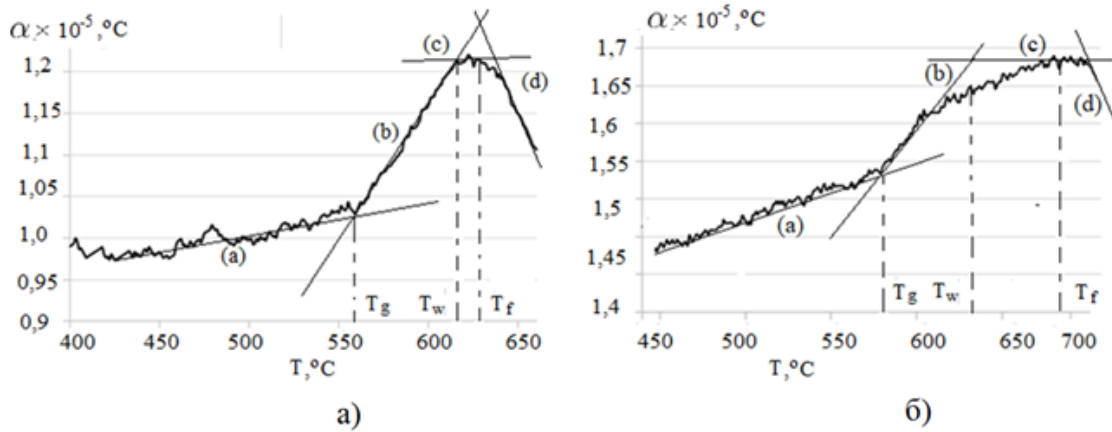


Рис. 4 Экспериментальные данные скорости изменения линейного температурного расширения и значения характерных температур при скорости нагрева $q_2 = 15(^{\circ}\text{C} \cdot \text{мин}^{-1})$ для а) С52-1; б)СМК

$q, (^{\circ}\text{C} \cdot \text{мин}^{-1})$	Тип	$T_g, (^{\circ}\text{C})$	$\delta T_g, (^{\circ}\text{C})$	$T_f, (^{\circ}\text{C})$	$\Delta T_g, (^{\circ}\text{C})$	$T_w, (^{\circ}\text{C})$	C_1	C_2
10	С52-1	556.8	11.09	627.2	70.4	617.6	17.5	194.4
10	СМК(С52-1)	571.4	18.71	653.3	81.9	617.1	12.21	228.4
15	С52-1	557.6	13.61	637.0	79.4	619.0	15.1	205.4
15	СМК(С52-1)	577.9	23.63	693.0	115.1	639.0	10.4	246.5

Таблица 1. Экспериментальные данные температурных параметров в интервале стеклования

и (6) и (7) для СМК при $q_1 = 10(^{\circ}\text{C} \cdot \text{мин}^{-1})$, $q_2 = 15(^{\circ}\text{C} \cdot \text{мин}^{-1})$.

$$\alpha_T = \exp\left(-\frac{15.09(T - 557.43)}{T - 352.05}\right) \quad (4)$$

$$\alpha_T = \exp\left(-\frac{17.53(T - 556.83)}{T - 362.41}\right) \quad (5)$$

$$\alpha_T = \exp\left(-\frac{12.21(T - 571.43)}{T - 362.41}\right) \quad (6)$$

$$\alpha_T = \exp\left(-\frac{10.43(T - 577.90)}{T - 331.43}\right) \quad (7)$$

Результаты моделирования технологических напряжений при охлаждении СМК в условиях идеального контакта в краевой задаче термомеханики с использованием экспериментальных данных (рис. 4 и табл. 1) и соотношений (4), (5), (6) и (7) получены методом начального-упругого приближения, алгоритм которого подробно изложен в работах [2, 3]. На графиках интенсивности напряжений (рис.5) заметно, что при использовании в расчетной модели экспериментально полученных параметров для стекла С52-1 в составе СМК, технологические напряжения выше, по сравнению с теоретическими параметрами.

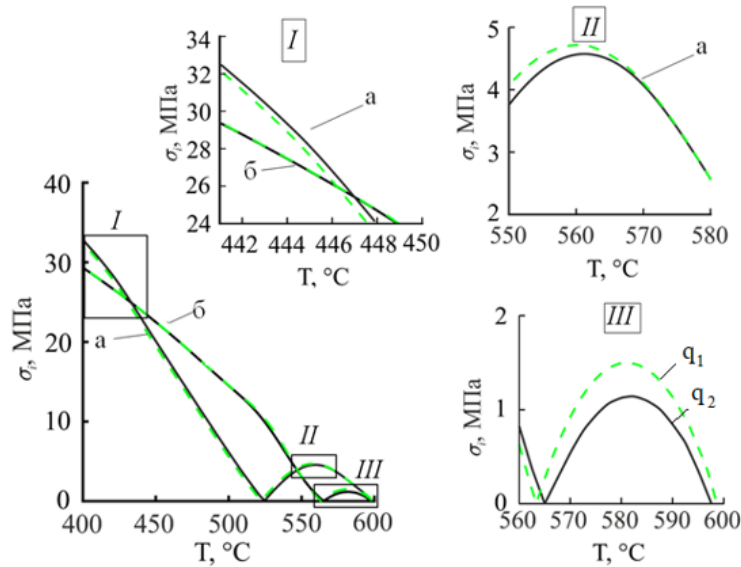


Рис. 5 Интенсивность напряжений в стеклующемся материале СМК при охлаждении и на разных температурных интервалах- I,II и III: а – для свойств стеклующегося материала на основе С52-1 определенные в ходе эксперимента и б – теоретические данные стекла С52-1 из работы [19] $q_1 = 10(^{\circ}C \cdot \text{мин}^{-1})$, $q_2 = 15(^{\circ}C \cdot \text{мин}^{-1})$

Заклучение Анализ поведения температурного коэффициента линейного расширения стекла 52-1 и стеклянного сердечника в составе СМК в интервале стеклования в Дт-ГИ при скоростях 10 и $15(^{\circ}C \cdot \text{мин}^{-1})$, показал не только количественную разницу в температурном коэффициенте линейного расширения между ними, но и его более растянутый и пологий характер. Заметим, что стеклянные образцы перед измерением предварительно отжигались, а СМК образцы не подвергались температурной обработке, после изготовления, стекло в составе СМК находилось в предварительно напряженном состоянии. Основной причиной повышения коэффициента линейного температурного расширения стеклянного сердечника в составе СМК является соединение с металлической оболочкой. Определенные из соотношения (1) время релаксации τ_g при температуре стеклования составили: для С52-1 при $15(^{\circ}C \cdot \text{мин}^{-1})$ — 0.74 (мин) и при $10(^{\circ}C \cdot \text{мин}^{-1})$ — 1.36 (мин); для СМК при $15(^{\circ}C \cdot \text{мин}^{-1})$ — 1.58 (мин) и при $10(^{\circ}C \cdot \text{мин}^{-1})$ — 1.87 (мин).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Lyubimova O., Barbotko M. A., Streltsov A. Experimental investigations of varying the temperature parameters in the glass-transition range for glass-metal composites when heated // *Materials Physics and Mechanics*. 2023. no. 51(3).
- [2] Любимова О. Н., Барботько М. А. Метод расчета эволюции напряжений в стекломаталлокомposite с учетом структурных и механических релаксационных процессов // *Вычислительная механика сплошных сред*. 2019. № 12(2). С. 215–229.
- [3] Barbotko M. A., Lyubimova O., Ostanin M. Structural and mechanical relaxation on annealing in glass-metal layered composites // *Materials Physics and Mechanics*. 2023. no. 51(4).
- [4] Lyubimova O. N., Morkovin A. V., Barbotko M. Properties, Macro- and Microstructure of a Layered Structural Element Based on Inorganic Glass and a Steel // *Glass-and-Metal Composite Rod*. Metallurgist 66. 2023. P. 1140–1146.
- [5] Sanditov D., Ojovan M. Relaxation aspects of the liquid-glass transition // *Physics Uspekhi*. 2019. no. 62(2). P. 111–130.
- [6] Ojovan M., Louzguine-Luzgin D. Revealing structural changes at glass transition via radial distribution functions // *Phys. Chemistry*. 2020. no. 124. P. 3186–3194.
- [7] Мазурин О.В., Ю.К.Старцев, Ходяковская Р.Я. Релаксационная теория отжига стекла и расчет на ее основе режимов отжига: уч.пособие. Москва: МХТИ им Д.И. Менделеева, 1987. 83 с.
- [8] Бартенев Г.М. О зависимости между температурой стеклования силикатного стекла и скоростью охлаждения или нагревания // *Доклады АН СССР*. 1951. № 76(2). С. 227–230.
- [9] Немиллов С.В. Оптическое материаловедение: Термодинамические и релаксационные свойства стеклообразующих расплавов и стекол:уч. пособие. Санкт-Петербург: СПбГУ ИТМО, 2014. 120 с.
- [10] Сандитов Д.С., Дармаев М.В., Сандитов Б.Д. О релаксационной природе стеклования аморфных полимеров низкомолекулярных аморфных веществ // *Физика твердого тела*. 2015. № 57(6). С. 1629–1634.
- [11] Сандитов Д.С., Ожован М.И. Релаксационные аспекты перехода жидкость-стекло // *Успехи физических наук*. 2019. № 189(2). С. 113–133.
- [12] Schmelzer J. W. P. Kinetic criteria of glass formation and the pressure dependence of the glass transition temperature // *The Journal of Chemical Physics*. 2012. no. 136(7). P. 074512–1–074512–11.
- [13] Guiselin B., Scalliet C., Berthier L. Microscopic origin of excess wings in relaxation spectra of supercooled liquids // *Nature Physics*. 2022. no. 18. P. 468–472.
- [14] Nucleation and growth of the supercooled liquid phase control glass transition in bulk ultrastable glasses / A. Vila-Costa, J. Ràfols-Ribé, M. González-Silveira et al. // *Phys. Rev. Lett*. 2020. no. 124.
- [15] Ultrastable glasses: new perspectives for an old problem / C. Rodriguez-Tinoco, M. Gonzalez-Silveira, M. Ramos et al. // *Riv. Nuovo Cim*. 2022.
- [16] Бартенев Г.М., Лукьянов И.А. Зависимость температуры стеклования аморфных веществ от скорости нагревания и связь температуры стеклования с энергией активации // *Журнал физической химии*. 1955. № 29(8). С. 1486–1498.
- [17] Мазурин О.В., Лебедева Р.Б., Старцев Ю.К. Метод расчета напряжений в спаях стекла со стеклом // *Физика и химия стекла*. 1980. № 6. С. 190–194.
- [18] Старцев В.О. Автоматизированный линейный дилатометр для исследования полимерных композиционных материалов: диссер. канд.ф.-м.н. Барнаул: Алтайский государственный университет НИИ Экологического мониторинга при АЛГТУ, 2009. 133 с.
- [19] Мазурин О. В., Тотеш А. С. Тепловое расширение стекла. Наука, 1969. 216 с.

M.A. Barbotko, O.N. Lyubimova, A.A. Streltsov

**EXPERIMENTAL MEASUREMENTS OF GLASS TRANSITION
TEMPERATURE PARAMETERS IN A STRUCTURAL ELEMENT OF A
GLASS-METAL COMPOSITE**

Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia

Abstract. The paper considers the problem of experimental determination of thermomechanical properties of composite materials based on glass-metal compounds. The features of glass deformation in the glass transition interval determine their stress-strain state in glass-metal compounds. The paper discusses the results of experimental studies of the glass transition parameters for the glass component in the glass-metal compound (in the form of a glass-metal composite rod) in comparison with the material from which the glass core is made. The effect of conjugate thermal deformation on technological and residual stresses in the glass-metal compound glass material is proved.

Keywords: glass transition temperature, linear thermal expansion, dilatometric measurements

REFERENCES

- [1] Lyubimova O., Barbotko M. A., Streltsov A. Experimental investigations of varying the temperature parameters in the glass-transition range for glass-metal composites when heated // *Materials Physics and Mechanics*. 2023. no. 51(3).
- [2] Lyubimova O., Barbotko M. A. A method for calculating the evolution of stresses in a glass metal composite taking into account structural and mechanical relaxation processes // *Computational continuum mechanics*. 2019. no. 12(2). P. 215–229. (in Russian).
- [3] Barbotko M. A., Lyubimova O., Ostanin M. Structural and mechanical relaxation on annealing in glass-metal layered composites // *Materials Physics and Mechanics*. 2023. no. 51(4).
- [4] Lyubimova O. N., Morkovin A. V., Barbotko M. Properties, Macro- and Microstructure of a Layered Structural Element Based on Inorganic Glass and a Steel // *Glass-and-Metal Composite Rod. Metallurgist* 66. 2023. P. 1140–1146.
- [5] Sanditov D., Ojovan M. Relaxation aspects of the liquid-glass transition // *Physics Uspekhi*. 2019. no. 62(2). P. 111–130.
- [6] Ojovan M., Louzguine-Luzgin D. Revealing structural changes at glass transition via radial distribution functions // *Phys. Chemistry*. 2020. no. 124. P. 3186–3194.
- [7] Mazurin O., Yu.K.Startsev, Khodakovskaya R. Relaxation theory of glass annealing and calculation of annealing modes based on it: textbook. Moscow: Moscow Art Institute named after D.I. Mendeleev, 1987. 83 p. (in Russian).

Barbotko Maxim Andreevich

e-mail: Gsm_1234@mail.ru, Assistant at the Department of Mathematics, Institute of Mathematics and Computer Technology, FEFU

Lyubimova Olga Nikolaevna

e-mail: lyubimova.on@dvfu.ru, PhD, Senior Researcher at the Department of Monitoring and Development of Georesources, Head of the Laboratory of Geomaterials Mechanics at the Research and Educational Center for Geomechanics and Geodynamics of Highly Compressed Rocks and Massifs of FEFU

Streltsov Alexey Alexandrovich

e-mail: streltsov1999@gmail.com, Postgraduate student of the Department of Marine Engineering and Transport of FEFU

- [8] Bartenev G. On the relationship between the glass transition temperature of silicate glass and the rate of cooling or heating // Reports of the USSR Academy of Sciences. 1951. no. 76(2). P. 227–230. (in Russian).
- [9] Nemilov S. Optical Materials Science: Thermodynamic and relaxation properties of glass-forming melts and glasses: textbook. Saint-Petersburg: St. Petersburg State University ITMO, 2014. 120 p. (in Russian).
- [10] Sanditov D., Darmaev M., Sanditov B. On the relaxation nature of the glass transition of amorphous polymers of low molecular weight amorphous substances // Solid State Physics. 2015. no. 57(6). P. 1629–1634. (in Russian).
- [11] Sanditov D., Ojovan M. Relaxation aspects of the liquid-glass transition // Achievements of the physical sciences. 2019. no. 189(2). P. 113–133. (in Russian).
- [12] Schmelzer J. W. P. Kinetic criteria of glass formation and the pressure dependence of the glass transition temperature // The Journal of Chemical Physics. 2012. no. 136(7). P. 074512–1–074512–11.
- [13] Guiselin B., Scalliet C., Berthier L. Microscopic origin of excess wings in relaxation spectra of supercooled liquids // Nature Physics. 2022. no. 18. P. 468–472.
- [14] Nucleation and growth of the supercooled liquid phase control glass transition in bulk ultrastable glasses / A. Vila-Costa, J. Ràfols-Ribé, M. González-Silveira et al. // Phys. Rev. Lett. 2020. no. 124.
- [15] Ultrastable glasses: new perspectives for an old problem / C. Rodriguez-Tinoco, M. Gonzalez-Silveira, M. Ramos et al. // Riv. Nuovo Cim. 2022.
- [16] Bartenev G., Lukyanov I. Dependence of the glass transition temperature of amorphous substances on the heating rate and the relationship of the glass transition temperature with the activation energy // Journal of Physical Chemistry. 1955. no. 29(8). P. 1486–1498. (in Russian).
- [17] Mazurin O., Lebedeva R., Startsev Y. Method for calculating stresses in glass-to-glass junctions // Physics and chemistry of glass. 1980. no. 6. P. 190–194. (in Russian).
- [18] Startsev V. Automated linear dilatometer for the study of polymer composite materials: disser. Candidate of Philology-M.N. Barnaul: Altai State University Research Institute of Environmental Monitoring at ALTSTU, 2009. 133 p. (in Russian).
- [19] Mazurin O. V., Totesh A. S. Thermal expansion of glass. the science, 1969. 216 p. (in Russian).