

УДК 666.117.2

Л. Ф. Папко<sup>1</sup>, М. В. Дяденко<sup>1</sup>, А. В. Кузьмин<sup>2</sup>, Н. М. Поротникова<sup>2</sup><sup>1</sup>Белорусский государственный технологический университет<sup>2</sup>Институт высокотемпературной электрохимии УрО РАН (Российская Федерация)**ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ СТЕКЛОГЕРМЕТИКИ  
ДЛЯ ТВЕРДООКСИДНЫХ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

Представлены результаты исследования стекол систем SrO – ZnO – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – SiO<sub>2</sub> и Na<sub>2</sub>O – MgO – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – SiO<sub>2</sub> с целью разработки на их основе высокотемпературных герметиков для твердооксидных топливных элементов.

По результатам изучения кристаллизационной способности стекол и формирования спаев на их основе установлено, что вакуумплотные соединения могут быть получены на основе кристаллизующихся стекол системы Na<sub>2</sub>O – MgO(CaO) – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – SiO<sub>2</sub>. В стеклокристаллических материалах на основе стекол данной системы в качестве кристаллических фаз выделяются диопсид MgCa[Si<sub>2</sub>O<sub>6</sub>] и нефелин Na[Si<sub>2</sub>Al<sub>2</sub>O<sub>8</sub>]. Выделение данных фаз обеспечивает достижение высоких показателей ТКЛР стеклокристаллических материалов и, как следствие, согласование с материалами твердооксидных топливных элементов.

В результате проведенных исследований синтезированы стеклокристаллические материалы, которые по технологическим и термическим свойствам могут быть использованы в качестве стеклогерметика твердооксидных топливных элементов.

**Ключевые слова:** стеклогерметик, твердооксидный топливный элемент, кристаллизационная способность, фазовый состав, температурный коэффициент линейного расширения.

L. F. Papko<sup>1</sup>, M. V. Dyadenko<sup>1</sup>, A. V. Kuzmin<sup>2</sup>, N. M. Porotnikova<sup>2</sup><sup>1</sup>Belarusian State Technological University<sup>2</sup>Institute of High Temperature Electrochemistry of the UB RAS (Russian Federation)**HIGH-TEMPERATURE SEALANTS FOR SOLID OXIDE FUEL CELLS**

The results of the research of the glasses of the SrO – ZnO – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – SiO<sub>2</sub> and Na<sub>2</sub>O – MgO – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – SiO<sub>2</sub> systems for the purpose of development on their basis of high-temperature sealants for solid oxide fuel cells are presented.

By results of studying of glass crystallization ability and formation of junctions on their basis it is established that vacuum-tight connections can be received on the basis of the crystallizing Na<sub>2</sub>O – MgO(CaO) – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – SiO<sub>2</sub> system glasses. In the glass-crystalline materials on the basis of glasses of this system as crystal phases of MgCa[Si<sub>2</sub>O<sub>6</sub>] diopside, Na[Si<sub>2</sub>Al<sub>2</sub>O<sub>8</sub>] nepheline are formed. Formation of these phases provides achievement of high rates of TCLE glass-crystalline materials and, as a result, coordination with materials of solid oxide fuel cells.

As a result of the conducted researches glass-crystalline materials which on processing and thermal behavior can be used as a glass sealant for solid oxide fuel cells are synthesized.

**Key words:** sealants, solid oxide fuel cell, crystallization ability, phase composition, temperature coefficient of linear expansion.

**Введение.** Твердооксидные топливные элементы (ТОТЭ) – это высокоэффективные устройства для преобразования химической энергии топлива в электрическую и тепловую энергию. Электролитом ТОТЭ является керамический материал (например, оксид циркония, стабилизированный оксидом иттрия), обладающий кислородной проводимостью. Важное значение для эффективности и долговечности ТОТЭ имеют герметики, которые используются для предотвращения смешивания газов между анодным и катодным участками элемента и обеспечения электрической изоляции. Герметики должны быть химически устойчивы в окислительной и восстановительной среде, не взаи-

модействовать с функциональными материалами ТОТЭ и быть согласованными с ними по температурному коэффициенту линейного расширения (ТКЛР), иметь низкую проводимость, хорошую адгезию и механическую прочность. Помимо достижения требуемых показателей термических, механических и электрических свойств, герметик должен обеспечивать стабильность характеристик в условиях длительной работы при повышенных температурах. Рабочая температура топливного элемента может варьироваться от 600°C до 1000°C, а срок его службы должен составлять тысячи часов. В настоящее время в ТОТЭ используют два основных типа герметиков: аморфные высокотемпературные

стекла и стеклокристаллические материалы. Использование стекол и стеклокристаллических материалов позволяет удовлетворить большинство требований, которые предъявляются к герметикам ТОТЭ [1, 2].

Преимущества использования высокотемпературных стекол в качестве герметиков заключается в том, что при высоких температурах они переходят в пластическое состояние, вследствие чего релаксируют возникающие напряжения. Однако метастабильное стеклообразное состояние является причиной протекания процессов фазового разделения в широком температурном интервале. Поскольку рабочие температуры ТОТЭ отвечают интервалу кристаллизации, использование исходных некристаллизующихся стекол в виде монолитных образцов в качестве герметика приведет к кристаллизации в процессе работы и, как следствие, к изменению свойств. Изменение ТКЛР герметика вследствие кристаллизации вызывает возникновение напряжений и нарушение герметичности спая.

Следовательно, наиболее приемлимым является использование кристаллизующихся стекол (стеклокристаллических материалов). При формировании спая на основе порошкообразного стекла происходит спекание его частиц и их кристаллизация, при этом наличие развитой поверхности порошка стимулирует образование большого числа кристаллических зародышей. В этом случае свойства стеклокристаллических материалов, в частности ТКЛР, могут варьироваться в широком диапазоне за счет выбора соответствующих кристаллических фаз и изменения соотношения объемной доли стекловидной и кристаллической фаз [3].

Составы герметиков разрабатываются для каждой конкретной конструкции ТОТЭ с учетом согласования по величине ТКЛР с материалами элемента, а также химической совместимости с данными материалами. Показатели ТКЛР компонентов ТОТЭ составляют  $(9,5-12) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  для электролита,  $(12-14) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  для катода,  $(10-14) \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  для анода и  $(11-15) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  для интерконнектора. При разработке герметиков необходимо учитывать возможное химическое взаимодействие при контакте с компонентами ТОТЭ. В частности, рядом исследований установлена высокая реакционная способность барийсодержащих герметиков по отношению к металлическому интерконнектору. В результате химического взаимодействия между жаростойкими сплавами, содержащими хром, и герметизирующим стеклом образуется хромат бария  $\text{BaCrO}_4$  [1, 4].

При выборе стеклообразующей системы для синтеза стеклокристаллических материалов для спаивания и герметизации ТОТЭ необходимо обеспечить образование кристаллических фаз с

высокими показателями ТКЛР. В магнийсиликатной системе такими фазами являются энстатит  $\text{MgSiO}_3$  и форстерит  $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$  с величиной ТКЛР  $(9-12) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ , в кальцийсиликатной системе – ортосиликат кальция  $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$  с ТКЛР  $(10-14) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ , в натрийалюмосиликатной системе – нефелин  $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$  ( $11,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ). Ряд кристаллических фаз с высокими показателями термического расширения образуются в системах  $\text{BaO} - \text{SiO}_2$  и  $\text{BaO} - \text{CaO} - \text{SiO}_2$ . В системах  $\text{BaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$  и  $\text{SrO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$  могут выделяться различные модификации целльзиана как с высоким ТКЛР, например гексацелльзиан  $\text{SrAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$  (ТКЛР составляет  $(8-11) \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ), так и с низким [1, 3].

В ряде исследований разработка стеклогерметиков осуществлялась на основе систем типа  $\text{RO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ , где  $\text{RO} - \text{CaO}, \text{MgO}, \text{SrO}, \text{BaO}, \text{ZnO}$ , в широком диапазоне составов при введении как отдельных модификаторов, так и их комбинаций. В качестве модифицирующих добавок используют  $\text{B}_2\text{O}_3, \text{Cr}_2\text{O}_3, \text{La}_2\text{O}_3, \text{Y}_2\text{O}_3, \text{Mn}_2\text{O}_3, \text{TiO}_2, \text{NiO}$ . Герметики, удовлетворяющие ряду требований, получены на основе стеклообразующей системы  $\text{Na}_2\text{O}(\text{K}_2\text{O}) - \text{RO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ , где  $\text{RO} - \text{CaO}, \text{MgO} + \text{CaO}, \text{CaO} + \text{BaO}$  [1-3, 5, 6].

Целью настоящей работы является синтез и исследование стеклокристаллических материалов для высокотемпературных герметиков ТОТЭ, согласованных по термическим свойствам с керамикой на основе оксида циркония, стабилизированного оксидом иттрия, и интерконнектором из жаропрочного сплава типа Crofer22APU.

**Основная часть.** Для получения высокотемпературных стеклогерметиков синтезированы стекла на основе систем  $\text{SrO} - \text{ZnO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$  и  $\text{Na}_2\text{O} - \text{MgO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ . Содержание  $\text{SiO}_2$  в составе стекол изменялось в пределах 45–60 мол. %,  $\text{Al}_2\text{O}_3 - 5-20$  мол. %, содержание оксидов-модификаторов группы RO составляло 25–40 мол. %. Кроме того, в качестве добавок вводились оксиды  $\text{B}_2\text{O}_3, \text{TiO}_2, \text{La}_2\text{O}_3$  в количестве 3–5 мол. %.

Стекла синтезировали при температуре 1450–1500°C в газовой печи периодического действия. По результатам синтеза определено, что с ростом содержания оксида алюминия в составе опытных стекол возрастает вязкость стеклорасплавов, вследствие чего для их осветления и достижения однородности необходимо повышать температуру синтеза и длительность выдержки при максимальной температуре.

Кристаллизационная способность опытных стекол оценивалась по результатам градиентной термообработки в электропечи в диапазоне температур 550–1100°C с последовательной выдержкой в течение 15, 30, 45 и 60 мин, а также

по данным термического анализа, который проводился методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) с помощью измерительного блока DSC 404 F3 Pegasus.

По результатам градиентной термообработки монолитных образцов стекла системы  $\text{SrO} - \text{ZnO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$  проявляют пониженную склонность к фазовому разделению. Поверхностная кристаллизация стекол в виде кристаллической пленки проявляется при температурах свыше  $800^\circ\text{C}$ . Время, необходимое для появления признаков кристаллизации, уменьшается от 60 до 15 мин с увеличением содержания оксидов-модификаторов  $\text{SrO} + \text{ZnO}$  в составе стекол. По данным термического анализа порошкообразных образцов стекол указанной системы они характеризуются высокой температурой стеклования –  $715\text{--}735^\circ\text{C}$  и, соответственно, температурой начала деформации (размягчения), составляющей  $750\text{--}775^\circ\text{C}$ . Температура начала кристаллизации стекол системы  $\text{SrO} - \text{ZnO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$  составляет  $900\text{--}935^\circ\text{C}$ , а процессы кристаллизации активно развиваются в температурном интервале  $950\text{--}1050^\circ\text{C}$ .

По результатам градиентной термообработки определено, что стекла системы  $\text{Na}_2\text{O} - \text{MgO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$  проявляют склонность к объемной кристаллизации в температурном интервале  $650\text{--}1100^\circ\text{C}$ , а температурный интервал кристаллизации расширяется с ростом содержания  $\text{MgO}$ .

На рис. 1 представлены характерные для опытных стекол данной системы кривые ДСК.

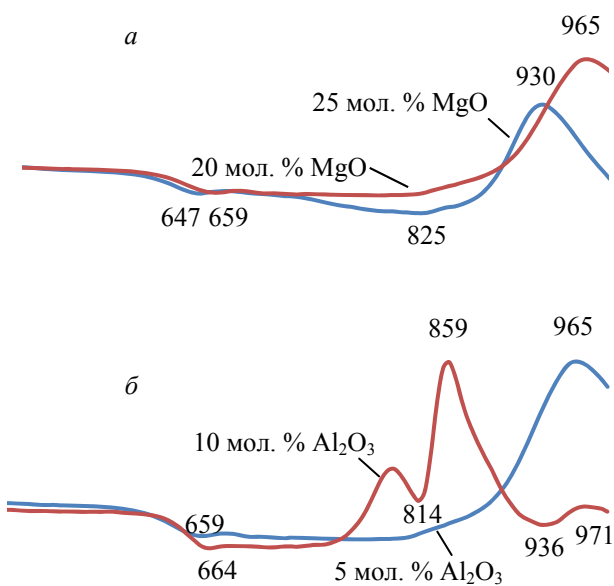


Рис. 1. Результаты ДСК стекол системы  $\text{Na}_2\text{O} - \text{MgO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$  при замене  $\text{SiO}_2$  на  $\text{MgO}$  (а) и  $\text{Al}_2\text{O}_3$  на  $\text{MgO}$  (б)

С ростом содержания  $\text{MgO}$ , вводимого взамен  $\text{SiO}_2$  при постоянном содержании  $\text{Na}_2\text{O}$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,

возрастает интенсивность эффекта кристаллизации, расширяется температурный интервал кристаллизации, а температура максимума кристаллизации повышается от  $930$  до  $965^\circ\text{C}$ .

Рост содержания  $\text{Al}_2\text{O}_3$  за счет  $\text{MgO}$  при постоянном содержании  $\text{SiO}_2$  обуславливает расширение температурного интервала кристаллизации, что связано, очевидно, с выделением нескольких кристаллических фаз с различной энергией активации процесса кристаллизации. Температура максимума экзоэффекта, отвечающего выделению основной кристаллической фазы, составляет  $860^\circ\text{C}$ . Особенностью кривых ДСК опытных стекол является наличие широких эндоэффектов, предшествующих эффектам кристаллизации. Температурные интервалы, отвечающие данным эффектам и определяемые как разность температур начала кристаллизации и температуры стеклования, составляют  $130\text{--}230^\circ\text{C}$ .

Можно предположить, что при термической обработке опытных стекол процессам кристаллизации предшествует ликвационное разделение. Возможность метастабильной ликвации в стеклах систем  $\text{Na}_2\text{O} - \text{MgO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$  и  $\text{SrO} - \text{ZnO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$  обусловлено наличием в их составе добавок  $\text{TiO}_2$ . Как известно, диоксид титана инициирует процессы объемной кристаллизации в силикатных системах вследствие создания развитой поверхности при разделении на две несмешивающиеся аморфные фазы. Области несмешиваемости аморфных фаз имеются также в системах типа  $\text{RO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$  и примыкают на диаграммах состояния к стороне  $\text{RO} - \text{SiO}_2$ , при этом с ростом силы поля катиона-модификатора указанные области расширяются [4, 7].

Для апробации опытных стекол в качестве герметика ТОТЭ порошок стекла со связующим наносили на керамическую подложку из стабилизированного иттрием диоксида циркония. По результатам лазерного дисперсионного анализа, проводимого с помощью прибора «Analysette 22» фирмы FRITTSCH, определено, что размер частиц порошка изменялся от 4 до 40 мкм, при этом преобладала фракция  $10\text{--}20$  мкм. Обжиг образцов проводился в электропечи при температуре  $1050\text{--}1100^\circ\text{C}$  в течение 20 мин. По результатам визуальной оценки определены составы стекол, на основе которых формируются плотные стеклокристаллические материалы, хорошо смачивающие поверхность керамики на основе диоксида циркония.

В процессе обжига на основе порошков стекол системы  $\text{SrO} - \text{ZnO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$  с содержанием  $\text{Al}_2\text{O}_3$  5–10 мол. % получены плотные материалы с тоннокристаллической структурой. По данным ДСК наиболее активно кристаллизация стекол указанной системы протекает в

температурном интервале 950–1050°C. С повышением содержания  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в стеклах данной системы до 15–20 мол. %, очевидно, возрастают показатели вязкости и поверхностного натяжения стеклофазы, что обуславливает формирование пористой структуры образцов.

На основе стекол системы  $\text{Na}_2\text{O} - \text{MgO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$  получены стеклокристаллические материалы с бездефектной микроструктурой. При объемном характере кристаллизации данных стекол их хорошая растекаемость и, как следствие, смачиваемость подложки обусловлены низкой вязкостью стеклофазы, содержащей оксид натрия.

По результатам исследования технологических свойств опытных стекол установлено, что газоплотные герметики могут быть получены на основе кристаллизующихся стеклокристаллических материалов системы  $\text{Na}_2\text{O} - \text{MgO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ , а также системы  $\text{SrO} - \text{ZnO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$  при содержании  $\text{Al}_2\text{O}_3$  не более 10 мол. %.

Показатели ТКЛР являются определяющими при выборе составов стекол для стеклокристаллических материалов, используемых для пайки и герметизации топливных элементов. Показатели ТКЛР стекол и стеклокристаллических материалов определяли с помощью горизонтального кварцевого dilatометра DIL 402 PC фирмы Netzsch. Для определения ТКЛР стеклокристаллических материалов изготавливали образцы на основе порошков стекол с последующим обжигом при температуре 1050°C.

По данным dilatометрии ТКЛР опытных стекол системы  $\text{SrO} - \text{ZnO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$  изменяется от  $5,17 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  до  $7,36 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ . ТКЛР стеклокристаллических материалов, синтезированных на основе данных стекол, составляет  $(6,34-8,82) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ .

Условием согласования стеклогерметиков по термическим свойствам с материалами ТОТЭ – керамикой на основе диоксида циркония и жаропрочного сплава типа Crofer22APU – является обеспечение показателей ТКЛР, составляющих  $(10-11) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  (интервал температур 20–400°C). Следовательно, стеклокристаллические материалы на основе стекол системы  $\text{SrO} - \text{ZnO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$  не отвечают данному требованию.

ТКЛР опытных стекол системы  $\text{Na}_2\text{O} - \text{MgO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$  изменяется в диапазоне  $(6,93-7,75) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ . ТКЛР стеклокристаллических материалов, синтезированных на их основе, составляет  $(7,44-9,4) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ .

По данным рентгенофазового анализа, проводимого на дифрактометре D8 Advance фирмы Bruker, фазовый состав стеклокристаллических материалов, синтезированных на основе стекол системы  $\text{Na}_2\text{O} - \text{MgO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ , представлен нефелином  $\text{Na}[\text{Si}_2\text{Al}_2\text{O}_8]$  и энстатитом  $\text{Mg}[\text{SiO}_3]$ .

Для повышения ТКЛР производилось модифицирование стекол системы  $\text{Na}_2\text{O} - \text{MgO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$  путем эквимольной замены  $\text{MgO}$  на  $\text{CaO}$  в соотношении от 1 : 0,25 до 1 : 1,25. В результате получены стеклокристаллические материалы с плотной структурой при температуре обжига 1050°C, показатели ТКЛР которых составляют  $(9,4-11,5) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ .

Исследование микроструктуры стеклокристаллических материалов проводилось с помощью настольного сканирующего микроскопа с системой химического микроанализа Phenom XL компании PhenomWorld (рис. 2).

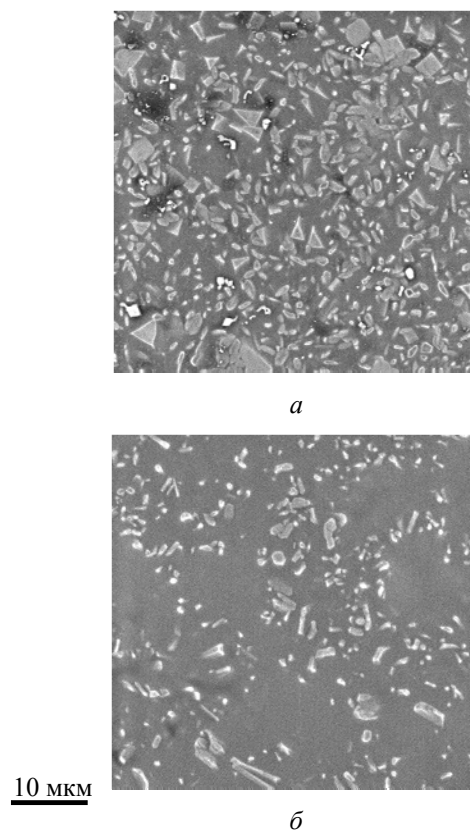


Рис. 2. Микроструктура стеклокристаллических материалов системы  $\text{Na}_2\text{O} - \text{MgO}(\text{CaO}) - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$  при соотношении  $\text{MgO} : \text{CaO}$ , равном 1 : 0,9 (а) и 1 : 1,2 (б)

Как следует из рис. 2, повышение соотношения  $\text{MgO} : \text{CaO}$  обуславливает увеличение объема кристаллической фазы. Размер кристаллов составляет 0,5–3 мкм.

В стеклокристаллических материалах на основе системы  $\text{Na}_2\text{O} - \text{MgO}(\text{CaO}) - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$  формируются следующие кристаллические фазы: геленит  $\text{Ca}_2\text{Al}[\text{SiAlO}_7]$ , диопсид  $\text{MgCa}[\text{Si}_2\text{O}_6]$  и нефелин  $\text{Na}[\text{Si}_2\text{Al}_2\text{O}_8]$ . При этом в случае молярного соотношения  $\text{MgO} : \text{CaO}$ , не превышающего 1 : 1, кристаллические фазы представлены нефелином и диопсидом, при повышении содержания  $\text{CaO}$  – геленитом и диопсидом.

Согласно данным локального химического анализа, в остаточной стеклофазе содержится до 20 мас. %  $\text{Na}_2\text{O}$ . Пониженная вязкость стеклофазы обуславливает хорошую растекаемость стеклокристаллического материала по подложке.

По данным ДСК стекло оптимального состава имеет выраженный максимум кристаллизации при температуре  $871,7^\circ\text{C}$  (рис. 3).

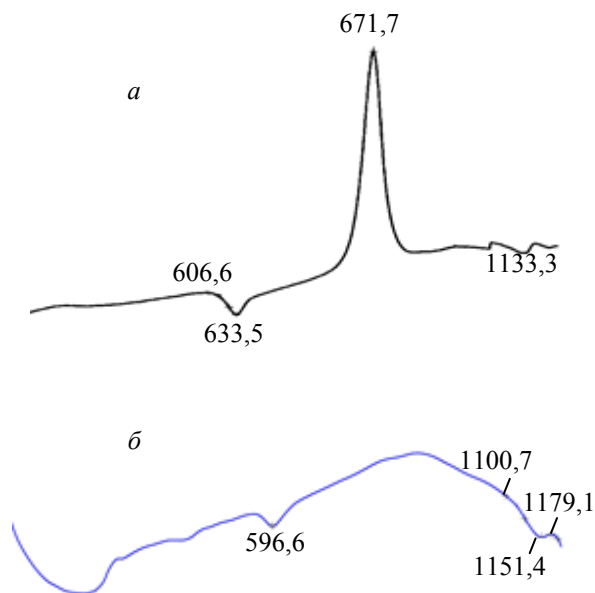


Рис. 3. Результаты ДСК стекла (а) и стеклокристаллического материала на его основе (б)

Термический анализ стеклокристаллического материала, синтезированного на основе стекла оптимального состава, не выявляет выраженных эффектов кристаллизации, что должно обеспечить стабильность фазового состава и, соответственно, свойств такого материала. Это подтверждается значениями ТКЛР стеклокристаллического материала, прошедшего циклическую термическую обработку продолжительностью от 6 до 20 ч при температуре  $950^\circ\text{C}$ . Выявлено, что показатели ТКЛР изменялись в пределах  $(10,25-10,28) \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$ , т. е. достаточно стабильны. Стабильность показателей ТКЛР стеклогерметика при рабочих температурах является условием его термомеханической прочности и, соответственно, вакуумплотности.

**Заключение.** Таким образом, по результатам синтеза и исследования стекол систем  $\text{SrO} - \text{ZnO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$  и  $\text{Na}_2\text{O} - \text{MgO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$  установлено, что на основе системы  $\text{Na}_2\text{O} - \text{MgO}(\text{CaO}) - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$  могут быть получены стеклокристаллические материалы для формирования высокотемпературных спаев при температуре  $1050^\circ\text{C}$ . По технологическим и термическим свойствам синтезированные стеклокристаллические материалы могут быть использованы в качестве стеклогерметиков твердооксидных топливных элементов, на основе которых создаются эффективные энергоустановки.

Исследования выполнены в рамках совместного проекта РФФИ и БРФФИ (грант РФФИ № 17-58-04116, грант БРФФИ № X17PM-033).

### Литература

1. Gurbinder Kaur. Solid Oxide Fuel Cell Components. Interfacial Compatibility of SOFC Glass Seals. Springer International Publishing Switzerland, 2016. 408 p.
2. Tulyaganov D. U., Reddy A. A., Kharton V. V., Ferreira Jose M. F. Aluminosilicate based sealants for SOFCs and other electrochemical applications – A brief review // Journal of Power Sources. 2013. No. 42. P. 486–502.
3. Qi S., Porotnikova N. M., Ananyev M. V., Kuzmin A. V., Eremin V. A., Pankratov A. A., Molchanova N. G., Reznitskikh O. G., Farlenkov A. S., Vovkotrub E. G., Zaikov Yu. P. High-temperature glassy-ceramic sealants  $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{BaO} - \text{MgO}$  and  $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{ZrO}_2 - \text{CaO} - \text{Na}_2\text{O}$  for solid oxide electrochemical devices // Trans. Nonferrous Met. Soc. China. 2016. No. 26. P. 2916–2924.
4. Höland W., George H. B. Glass-ceramic technology. Hoboken, New Jersey, 2012. 414 p.
5. Smeacetto F., De Miranda A., Chrysanthou A., Bernardo E., Secco M., Salvo M., Bindi M., Sabato A. G., Ferraris M. Novel and glass-ceramic composition as sealant for SOFCs // J. Am. Soc. 2014. No. 97. P. 3835–3842.
6. Krainova D. A., Zharkina S. T., Saetova N. S., Raskovalov A. A., Kuzmin A. V., Eremin V. A., Sherstobitova E. A., Pershina S. V., Dyadenko M. V., Zhang Xiaoa, Jiang Shengling. Influence of cerium oxide on properties of glass-ceramic sealants for solid oxide fuel cells // Russian Journal of Applied Chemistry. 2017. Vol. 90 (8). P. 1047–1053.
7. Двухфазные стекла: структура, свойства, применение / О. В. Мазурин [и др.]. Л.: Наука, 1991. 276 с.

### References

1. Gurbinder Kaur. Solid Oxide Fuel Cell Components. Interfacial Compatibility of SOFC Glass Seals. Springer International Publishing Switzerland, 2016. 408 p.
2. Tulyaganov D. U., Reddy A. A., Kharton V. V., Ferreira Jose M. F. Aluminosilicate based sealants for SOFCs and other electrochemical applications – A brief review. *Journal of Power Sources*, 2013, no. 42, pp. 486–502.

3. Qi S., Porotnikova N. M., Ananyev M. V., Kuzmin A. V., Eremin V. A., Pankratov A. A., Molchanova N. G., Reznitskikh O. G., Farlenkov A. S., Vovkotrub E. G., Zaikov Yu. P. High-temperature glassy-ceramic sealants  $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{BaO} - \text{MgO}$  and  $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{ZrO}_2 - \text{CaO} - \text{Na}_2\text{O}$  for solid oxide electrochemical devices. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 2016, no. 26, pp. 2916–2924.
4. Höland W., George H.B. Glass-ceramic technology. Hoboken, New Jersey, 2012. 414 p.
5. Smeacetto F., De Miranda A., Chrysanthou A., Bernardo E., Secco M., Salvo M., Bindi M., Sabato A. G., Ferraris M. Novel and glass-ceramic composition as sealant for SOFCs. *J. Am. Soc.*, 2014, no. 97, pp. 3835–3842.
6. Krainova D. A., Zharkina S. T., Saetova N. S., Raskovalov A. A., Kuzmin A. V., Eremin V. A., Sherstobitova E. A., Pershina S. V., Dyadenko M. V., Zhang Xiaoa, Jiang Shengling. Influence of cerium oxide on properties of glass-ceramic sealants for solid oxide fuel cells. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 2017, vol. 90 (8), pp. 1047–1053.
7. Mazurin O. V., Raskova G. P., Aver'yanov V. I., Antropova T. V. *Dvukhfaznyye stekla: struktura, svoystva, primeneniye* [Two-phase glasses: structure, properties, application]. Leningrad, Nauka Publ., 1991. 276 p.

### Информация об авторах

**Папко Людмила Федоровна** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологии стекла и керамики. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: papko@belstu.by

**Дяденко Михаил Васильевич** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологии стекла и керамики. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: dyadenko-mihail@mail.ru

**Кузьмин Антон Валерьевич** – кандидат химических наук, заведующий лабораторией электрохимического материаловедения. Институт высокотемпературной электрохимии УрО РАН (620137, г. Екатеринбург, ул. Академическая, 20, Российская Федерация). Доцент кафедры технологии стекла. Институт новых материалов и технологий. Ведущий научный сотрудник лаборатории материалов и устройств для электрохимической энергетики. Химико-технологический институт Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина (620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19, Российская Федерация). E-mail: a.v.kuzmin@yandex.ru

**Поротникова Наталья Михайловна** – кандидат химических наук, научный сотрудник лаборатории твердооксидных топливных элементов. Институт высокотемпературной электрохимии УрО РАН (620137, г. Екатеринбург, ул. Академическая, 20, Российская Федерация). Старший научный сотрудник лаборатории материалов и устройств для электрохимической энергетики. Химико-технологический институт Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина (620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19, Российская Федерация). E-mail: porotnikova@ihthe.uran.ru

### Information about the authors

**Papko Lyudmila Fedorovna** – PhD (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Glass and Ceramics Technology. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: papko@belstu.by

**Dyadenko Mikhail Vasil'yevich** – PhD (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Glass and Ceramics Technology. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: dyadenko-mihail@mail.ru

**Kuzmin Anton Valer'yevich** – PhD (Chemistry), Head of the Laboratory of Electrochemical material science. Institute of High Temperature Electrochemistry of the UB RAS (20, Akademicheskaya str., 620137, Ekaterinburg, Russian Federation). Assistant Professor of Department of Glass Technology, Institute of New Materials and Technologies. Leading Researcher, Laboratory of Materials and Devices for Electrochemical Power Industry. Institute of Chemical Engineering Ural Federal University (19, Mira str., 620002, Ekaterinburg, Russian Federation). E-mail: a.v.kuzmin@yandex.ru

**Porotnikova Natal'ya Mikhaylovna** – PhD (Chemistry), Researcher, Laboratory of Solid Oxide Fuel Cells. Institute of High Temperature Electrochemistry of the UB RAS (20, Akademicheskaya str., 620137, Ekaterinburg, Russian Federation). Senior Researcher, Laboratory of Materials and Devices for Electrochemical Power Industry. Institute of Chemical Engineering Ural Federal University (19, Mira str., 620002, Ekaterinburg, Russian Federation). E-mail: porotnikova@ihthe.uran.ru

Поступила 18.04.2018