

УДК 666.193.2  
DOI: 10.14489/glc.2023.06.pp.022-029  
Научная статья

## ВЛИЯНИЕ МОДИФИКАТОРОВ НА СВОЙСТВА БАЗАЛЬТОВЫХ СТЕКОЛ И РАСПЛАВОВ

Ю. Г. Павлюкевич<sup>1</sup>, Л. Ф. Папко<sup>1</sup>, А. П. Кравчук<sup>1</sup>, П. С. Ларионов<sup>1</sup>, С. Ю. Янсон<sup>2</sup>

<sup>1</sup>УО «Белорусский государственный технологический университет», Минск, Беларусь, pavliukevitch.yura@yandex.ru

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия, jansn.sv@gmail.com

Исследовано влияние модифицирующих компонентов, включающих  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$ ,  $B_2O_3$  и  $CaO$ , на процессы плавления базальта и кристаллизацию базальтовых стекол, предназначенных для получения непрерывного волокна. Установлено, что при введении комплексных алюмо- и борсодержащих модификаторов достигается повышение прочности базальтовых стекол на 15 – 20 % при обеспечении стабильных технологических свойств.

**Ключевые слова:** базальтовое стекло, модификатор, непрерывное волокно, плавление, кристаллизация, прочность.

**Для цитирования:** Павлюкевич Ю. Г., Папко Л. Ф., Кравчук А. П., Ларионов П. С., Янсон С. Ю. Влияние модификаторов на свойства базальтовых стекол и расплавов // Стекло и керамика. 2023. Т. 96, № 6. С. 22 – 29. DOI: 10.14489/glc.2023.06.pp.022-029

## THE MODIFIERS EFFECT FOR THE BASALT GLASSES AND MELTS PROPERTIES

Yu. G. Pavlyukevich<sup>1</sup>, L. F. Papko<sup>1</sup>, A. P. Kravchuk<sup>1</sup>, P. S. Larionov<sup>1</sup>, S. Yu. Yanson<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Belarusian State Technological University, Minsk, Belarus,

<sup>2</sup> St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

The effect of modifying components, including  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$ ,  $B_2O_3$ , and  $CaO$ , on the basalt melting processes and crystallization of the basalt glasses, used for continuous fiber production, has been studied. It has been established, that complex aluminum- and boron-containing modifiers introduction the basalt glasses strength increasing by 15 – 20 % and stable technological properties achieved.

**Key words:** basalt glass, modifier, continuous fiber, melting, crystallization, strength.

**For citation:** Pavlyukevich Yu. G., Papko L. F., Kravchuk A. P., Larionov P. S., Yanson S. Yu. The modifiers effect for the basalt glasses and melts properties. *Steklo i keramika*. 2023;96(06):22-29. (in Russ). DOI: 10.14489/glc.2023.06.pp.022-029

Использование базальтов в производстве непрерывного волокна является перспективным направлением производства армирующих материалов для композитов. В базальтовых высокопрочных волокнах сочетаются высокие показатели прочности, термостойкости, коррозионной стойкости. Композиты на основе базальтового непрерывного волокна характеризуются высокими показателями ударной прочности и стойкости к циклопеременным нагрузкам. Такие композиты, армированные базальтовым волокном, применяются в авиационной промышленности, космической технике, автомобилестроении, строительстве и других областях [1, 2].

Развитие рынка композиционных материалов требует увеличения объемов производства высокопрочного стекловолокна, разработки стекломатериалов с различным сочетанием показателей прочности, упругости, химической стойкости.

Однако производство базальтового непрерывного волокна в сравнении с широко используемым волокном типа E имеет свои особенности. Свойства волокон существенно зависят от химико-минерального состава горных пород, поэтому уделяется большое внимание их рациональному выбору. Химическая и структурная неоднородность базальтовых расплавов и стекол, обусловленная неоднородностью химического состава базальтов,

влияет на показатели прочности волокна и снижает стабильность процесса его формования. Базальтовые расплавы имеют высокую склонность к кристаллизации, что ограничивает температурный интервал выработки волокна [2 – 4].

Для улучшения характеристик базальтового волокна, в частности повышения прочности, используются следующие решения: модифицирование состава базальтового стекла путем введения в сырьевую композицию дополнительных компонентов; обработка базальтового волокна различными способами.

При повышении массового содержания в составе базальтового стекла  $Al_2O_3$ , введении  $ZrO_2$  до 3,1 % достигнуто возрастание прочности непрерывного волокна. В частности, увеличение содержания в волокнах оксида алюминия от 10 до 24,4 % сопровождается повышением их прочности почти в 1,5 раза. Однако при введении тугоплавких компонентов существенно возрастают температуры плавления и формования, т.е. ухудшаются технологические свойства базальтовых расплавов. В частности, с увеличением массового содержания оксида циркония температура нижнего предела получения волокон растет от 1370 до 1470 °C [5, 6]. С повышением массового содержания  $SiO_2$  и  $Al_2O_3$  прочность базальтового волокна и его термостойкость возрастают, однако увеличиваются температура плавления базальта и вязкость расплава, как следствие, снижается срок службы фильерного питателя и огнеупоров [7].

При использовании пирофосфата аммония для модифицирования базальтового стекла установлено повышение прочности на разрыв и модуля упругости волокон с ростом массового содержания оксида фосфора до 4 % [8]. Добавление  $MgO$  увеличивает хрупкость, температуру стеклования  $T_g$ , твердость и модуль Юнга базальтового стекла. Снижение данных показателей происходит при добавлении  $Na_2O$  [9].

Модифицированные базальтовые стекла для вытягивания волокна получены путем корректировки оксидного состава природных базальтовых пород добавлением соответствующего количества пирофиллита  $Al_2(Si_4O_{10})(OH)_2$ , диопсида  $CaMg(SiO_3)_2$  и карбоната кальция. В результате повышается энергия активации кристаллизации и достигается более высокая термическая стабильность базальтового стекла [10]. Предлагается способ оптимизации технологических свойств базальтовых расплавов, который заключается в использовании смесей горных пород, состав которых в отдельности не обеспечивает устойчивый процесс волокнообразования [11]. Перспективным является введе-

ние колеманита для модифицирования состава базальтовых стекол. Температура формования непрерывного волокна при использовании борсодержащих композиций может быть снижена за счет снижения вязкости, температуры ликвидуса и кристаллизационной способности расплава [12].

Модифицирование стекол на основе андезито-базальта оксидами магния, цинка и натрия обуславливает снижение температуры получения волокон и расширение температурного интервала выработки. Нижняя температура формования волокон уменьшается, а температурный интервал выработки волокон расширяется от 70 до 210 и 160 °C соответственно с увеличением содержания оксида лития и натрия. Апробирована поверхностная модификация базальтовых волокон методом ионного обмена [13]. Согласно работе [14] использование ионного обмена позволяет увеличить прочность базальтового непрерывного волокна на 25 – 30 %. Состав базальтового стекла при этом модифицируется путем введения оксидов лития и натрия.

Таким образом, модифицирование состава базальтовых стекол позволяет повысить эксплуатационные характеристики волокна, в частности состав стекла играет важную роль в достижении высоких показателей прочности. В данной статье рассмотрены технологические аспекты синтеза стекол на основе композиций базальт-модификатор и прочностные свойства модифицированных базальтовых стекол, предназначенных для получения непрерывного волокна. При выборе модификаторов использованы результаты исследования технологических и механических свойств модельных стекол системы  $Na_2O-MgO-CaO-Fe_2O_3-Al_2O_3-B_2O_3-SiO_2$ , синтезированных на основе химических реагентов [15].

## Материалы и методы

Для получения базальтовых стекол использовали андезито-базальт с массовым содержанием  $SiO_2$  не менее 53 %. По данным РФА, фазовый состав базальта включает плагиоклазы – твердые растворы на основе анортита  $CaAl_2Si_2O_8$  и альбита  $NaAlSi_3O_8$ , а также пироксены – твердые растворы на основе диопсида  $CaMgSi_2O_6$ . Железосодержащая фаза представлена магнетитом  $Fe_3O_4$ .

При синтезе базальтовых стекол в состав композиций вводили следующие материалы: кианит-силлиманитовый концентрат (кианит), глинозем, колеманит, борную кислоту, в том числе комбинации модификаторов.

В табл. 1 представлены составы модифицированных базальтовых стекол и указаны модификаторы, которые использовались при их синтезе.



Химический состав композиций на основе базальта

| № состава | Массовое содержание компонентов, % |                                |       |                               |      |                   |                  |                                |                  |
|-----------|------------------------------------|--------------------------------|-------|-------------------------------|------|-------------------|------------------|--------------------------------|------------------|
|           | SiO <sub>2</sub>                   | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO   | B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | MgO  | Na <sub>2</sub> O | K <sub>2</sub> O | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | TiO <sub>2</sub> |
| 1         | 53,27                              | 16,85                          | 8,06  | –                             | 4,33 | 2,6               | 1,53             | 12,3                           | 1,06             |
| 2         | 49,30                              | 23,12                          | 7,66  | –                             | 3,78 | 2,44              | 1,43             | 11,35                          | 0,92             |
| 3         | 51,88                              | 20,64                          | 7,70  | –                             | 3,77 | 2,38              | 1,38             | 11,33                          | 0,92             |
| 4         | 49,16                              | 15,65                          | 10,71 | 4,20                          | 4,05 | 2,47              | 1,37             | 11,47                          | 0,92             |
| 5         | 50,88                              | 16,50                          | 7,87  | 4,28                          | 3,90 | 2,45              | 1,42             | 11,76                          | 0,94             |
| 6         | 49,16                              | 19,51                          | 9,14  | 2,21                          | 3,93 | 2,41              | 1,38             | 11,34                          | 0,92             |
| 7         | 49,74                              | 18,50                          | 9,25  | 2,58                          | 3,80 | 2,24              | 1,38             | 11,53                          | 0,98             |
| 8         | 49,88                              | 18,85                          | 8,90  | 2,10                          | 3,90 | 2,37              | 1,40             | 11,58                          | 1,02             |
| 9         | 51,58                              | 16,74                          | 8,08  | 2,68                          | 3,99 | 2,53              | 1,46             | 11,97                          | 0,97             |
| 10        | 49,39                              | 19,64                          | 7,26  | 4,80                          | 3,62 | 2,27              | 1,31             | 10,79                          | 0,92             |

*Примечания.* 1 – базовый состав базальтового стекла; модификаторы: 2 – глинозем; 3 – кианит; 4 – колеманит; 5 – борная кислота; 6 – 8 – кианит + колеманит; 9, 10 – кианит + борная кислота.

Как следует из табл. 1, массовое содержание основных компонентов в составе стекол изменяется в следующих пределах (%): 49,16 – 53,27 SiO<sub>2</sub>; 15,65 – 23,12 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 10,88 – 14,76 RO; 2,10 – 4,80 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Химический состав опытных стекол определяли на монолитных образцах методом атомно-эмиссионной спектроскопии с помощью лазерного анализатора LEA-S500.

Плавление базальтов и композиций на их основе проводили в газовой пламенной печи при максимальной температуре 1500 ± 10 °С. Подъем температуры в печи осуществляли со скоростью 250 °С/ч, газовая среда окислительная при коэффициенте избытка воздуха 1,08...1,13.

Позиционную термическую обработку сырьевых композиций выполняли в газовой печи при температурах 1250, 1350 и 1400 °С. При достижении заданной температуры тигли извлекали из печи, охлаждали и раскалывали для последующего анализа. Микроструктуру образцов изучали методами сканирующей электронной микроскопии и энергодисперсионного микроанализа на системе со сфокусированными электронным и ионным зондами QUANTA 200 3D (FEI, Netherlands) и аналитическим комплексом Pegasus 4000 (EDAX, USA), а также с помощью настольного растрового электронного микроскопа-микроанализатора

ТМ 3000 (НИТАСНІ, Japan). Изображения получены со свежих сколов в режиме вторичных и отраженных электронов. Полуколичественный анализ выполнен в условиях высокого вакуума при ускоряющем напряжении 20 кВ. Образцы для анализов напылены углеродом.

Кристаллизационную способность опытных стекол определяли комплексным методом по результатам градиентной кристаллизации и по данным термического анализа. Градиентную кристаллизацию проводили в электропечи SP30/13, в которой создаются зоны со стабильным градиентом температур в интервале 800 – 1350 °С. Термический анализ выполняли методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) с использованием измерительного блока DSC 404 F3 Pegasus в интервале температур 20 – 1300 °С в режиме нагрева со скоростью 10 °С/мин. Фазовый состав продуктов термической обработки стекол при температуре 1150 °С определяли по результатам рентгенофазового анализа на рентгеновском дифрактометре D8 Advance. Для идентификации кристаллических фаз использовали прикладную программу Match.

Определение прочностных характеристик модифицированных базальтовых стекол при изгибе проводили с помощью универсальной электромеханической испытательной машины Galdabini Quasar 100.

## Результаты и обсуждение

Для выявления особенностей влияния модифицирующих компонентов на процесс плавления базальта проведена позиционная термическая обработка сырьевых композиций.

При получении расплава базальта протекает процесс плавления кристаллов, интенсивность которого зависит от их природы, скорости нагрева, температуры, а также происходит растворение компонентов кристаллических фаз. Скорость растворения зависит от времени термической обработки, вязкости и поверхностного натяжения расплава.

Продукт термической обработки базальта при температуре 1250 °С представляет собой остеклованную массу, содержащую нерасплавившиеся зерна породы. Введение в состав композиций глинозема и кианита (составы 2 и 3) обуславливает увеличение объема нерасплавившихся зерен базальта. При максимальном содержании  $Al_2O_3$ , а также при совместном введении  $Al_2O_3$  и  $SiO_2$  продукты термической обработки сырьевых композиций представляют собой спеченную массу с невысоким содержанием стеклофазы.

Введение в состав композиций борной кислоты и колеманита приводит к появлению расплава при более низких температурах (около 950 °С), снижению вязкости и поверхностного натяжения борсодержащего расплава, что ускоряет процесс растворения кристаллов минеральной части базальта. Введение  $B_2O_3$  в количестве 4,2 % с колеманитом (состав 4) увеличивает объемную долю стеклофазы до 75 % при температуре термообработки 1250 °С. Процесс плавления композиций

базальт-модификатор ускоряется также при введении  $B_2O_3$  в сочетании с  $Al_2O_3$ .

Электронно-микроскопические исследования показали, что в структуре образцов, прошедших термическую обработку при температуре 1250 °С, имеются кристаллические включения размером от 10 до 300 мкм (рис. 1).

В структуре образца состава 3 выявлен реликтовый плагиоклаз (рис. 1, а), согласно результатам электронно-зондового микроанализа он представлен лабрадором состава  $(Ca_{0,63}, Na_{0,18})_{0,81}(Si_{2,36}Al_{1,69}O_8)$ . Имеются включения новообразованной фазы оксида железа – магнетита в матрице стекла (рис. 1, б).

В образцах, модифицированных  $Al_2O_3$  и  $B_2O_3$  (состав 6), выявлены кристаллы новообразованного плагиоклаза (рис. 1, в) – андезина состава  $(Ca_{0,45}, Na_{0,29}, K_{0,02})_{0,76}(Si_{2,38}Al_{1,62}O_8)$ . Выделяются области стекла, содержащие скопления мелких кристаллов оксида железа (рис. 1, г). Вероятно, образуется также самородное железо – светло-серые зерна (рис. 1, д). При данной температуре термической обработки плавление минералов, которое стимулируется присутствием оксида бора, обуславливает получение структурно неоднородного расплава, при охлаждении которого возникли локальные центры кристаллизации. На первом этапе из расплава выпадали средние плагиоклазы, при дальнейшем понижении температуры – оксиды железа по периферии зон кристаллизации.

Продукты термической обработки при температурах 1350 и 1400 °С представляют собой стеклообразный материал, содержащий газообразные включения. Однородные образцы базальтовых стекол получены при температуре синтеза 1500 °С.

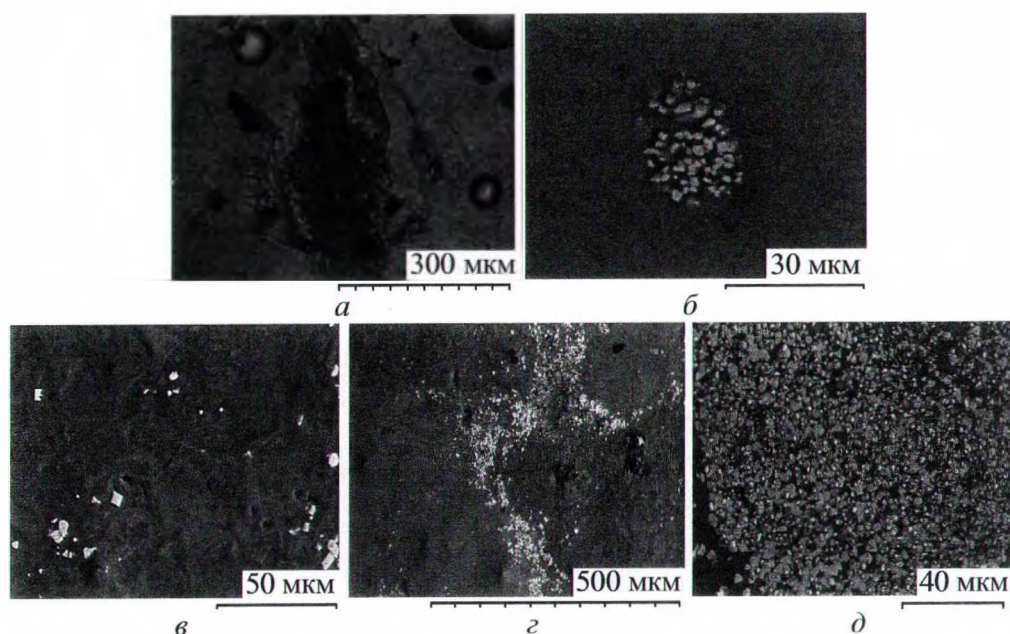


Рис. 1. Структура образцов, прошедших термическую обработку при температуре 1250 °С



Показатели кристаллизационной способности являются важной характеристикой технологических свойств и наряду с показателями вязкости определяют температурный режим формования непрерывного волокна. Исследование кристаллизационной способности базальтовых стекол проводили методами градиентной кристаллизации и ДСК.

Верхняя температура кристаллизации  $T_{в.к}$  (температура ликвидуса) базальтового стекла составляет 1280 °С. Повышение кристаллизационной способности базальтового стекла с ростом массового содержания оксида алюминия до 23 % (состав 2) обуславливает повышение верхней температуры кристаллизации до 1320 °С при высокой скорости роста кристаллов, что проявляется в объемном типе кристаллизации. Совместное введение алюмо- и борсодержащих модификаторов (соста-

вы 6 – 10) не приводит к повышению кристаллизационной способности стекол: верхняя температура кристаллизации составляет 1270 – 1280 °С, при этом температура начала объемной кристаллизации не превышает 1230 °С.

Стекла, синтезированные на основе композиций базальт – борная кислота и базальт – колеманит, характеризуются наиболее низкими показателями верхней температуры кристаллизации. При массовом содержании оксида бора 4,2 % (состав 4) верхняя температура кристаллизации снижается до 1235 °С, температура начала объемной кристаллизации – до 1195 °С.

На кривых ДСК базальтовых стекол с различными модификаторами фиксируется выделение ряда кристаллических фаз (рис. 2, а).

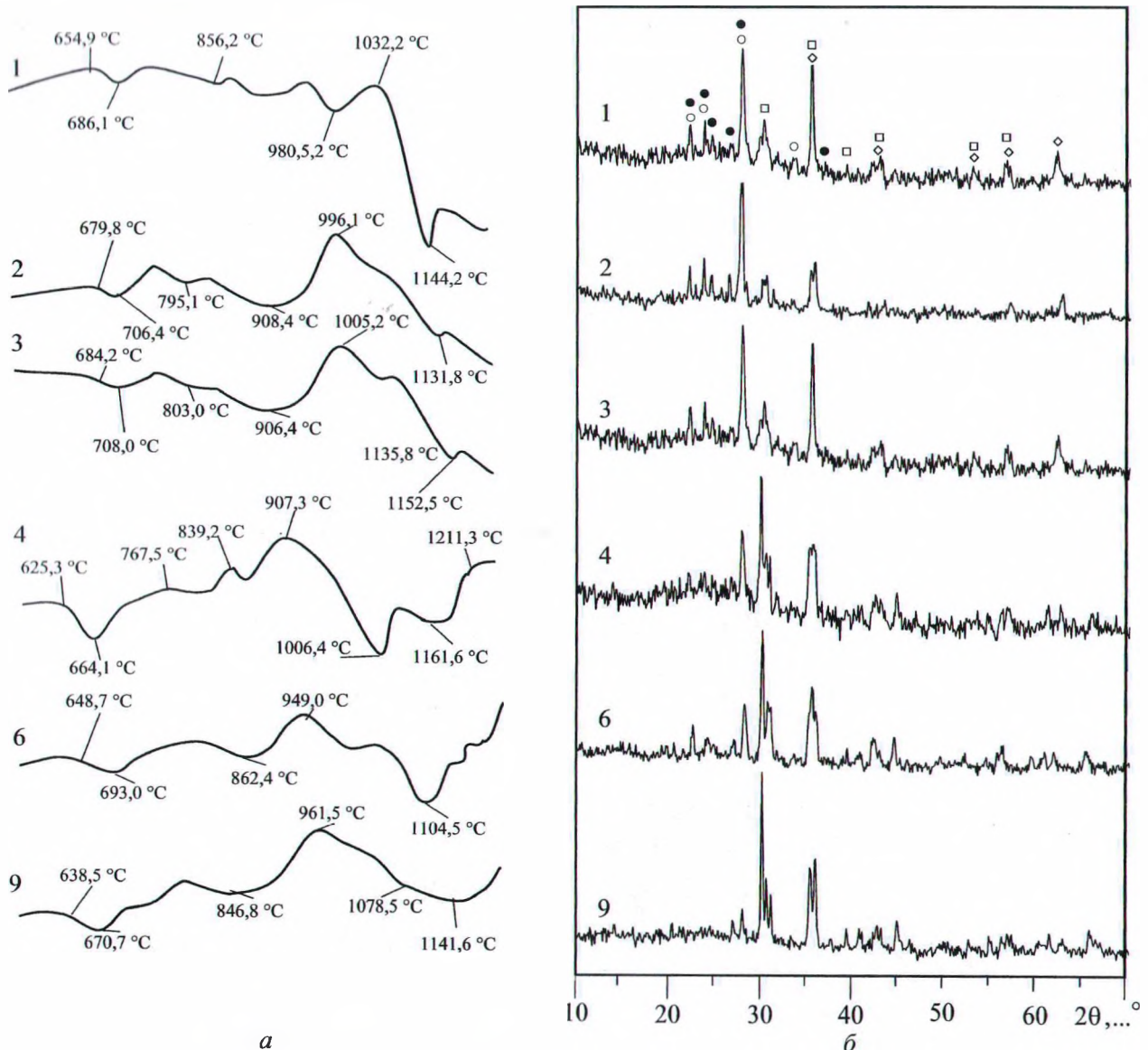


Рис. 2. Кривые ДСК (а) и рентгенограммы (б) базальтовых стекол: 1 – 4, 6, 9 – номера составов; ○ – анортит; ● – альбит; □ – диопсид; ◇ – магнетит

По данным ДСК, для стекол с повышенным содержанием  $Al_2O_3$  (составы 2, 3) характерна минимальная разница между температурой стеклования  $T_g$  и температурой начала кристаллизации  $T_x$ . В работе [10] разницу  $\Delta T$  между  $T_x$  и  $T_g$  предлагается использовать в качестве критерия кристаллизационной способности: чем больше  $\Delta T$ , тем ниже склонность к кристаллизации. Основной кристаллической фазой в продуктах термической обработки базальтовых стекол, модифицированных  $Al_2O_3$ , является плагиоклаз с преобладанием анортитовой составляющей (рис. 2, б). Выделению плагиоклаза отвечают интенсивные экзоэффекты на кривых ДСК с максимумами при температурах 996 и 1005 °С. При модифицировании базальтовых стекол борсодержащими компонентами с ростом содержания  $B_2O_3$  в их составе снижается интенсивность экзоэффектов кристаллизации в области температур 800–950 °С, а также температура плавления кристаллических фаз в области температур свыше 1000 °С. В результате температурный интервал кристаллизации уменьшается, что является важным технологическим фактором, влияющим на формование непрерывного волокна. В результате термической обработки борсодержащих стекол в качестве основной кристаллической фазы выделяются твердые растворы на основе диопсида, в качестве сопутствующих – плагиоклаз и магнетит.

Наиболее важной эксплуатационной характеристикой волокна являются показатели прочности. На показатели прочности стекловолкна в наибольшей мере влияет масштабный эффект, благодаря которому показатели прочности возрастают

в 30–40 раз в сравнении с прочностью монолитного стекла. Существенно влияет на показатели механических свойств химический состав стекла. Помимо этого, оказывают влияние условия синтеза стекла и формования волокна, его диаметр и условия испытания [16].

На рис. 3 представлены диаграммы деформации при изгибе образцов модифицированных базальтовых стекол. Согласно данным диаграммам, показатели прочности модифицированных стекол изменяются от 112 до 164 МПа при прочности базового образца 124 МПа. Наиболее высокие показатели прочности базальтового стекла достигаются при модифицировании алюмосодержащими компонентами, что обусловлено повышением степени полимеризации структурного каркаса, в который встраиваются ионы алюминия в составе структурных групп  $[AlO_{4/2}]Na$ ,  $[AlO_{4/2}]K$  и  $[AlO_{4/2}]Ca_{0.5}$ . Однако с ростом содержания  $Al_2O_3$  повышаются энергозатраты на процесс плавления сырьевой композиции, увеличивается температура ликвидуса, что требует более высокой температуры вытягивания волокна.

Модифицирование борсодержащими компонентами ускоряет процесс плавления базальта, снижает кристаллизационную способность, показатели прочности стекла не превышают 130 МПа при введении колеманита, т.е. находятся на уровне прочностных свойств базового базальтового стекла.

Существенное повышение прочности базальтового стекла достигается при совместном введении в состав сырьевых композиций алюмо- и борсодержащих компонентов. При использовании в композициях с базальтом кианита и колеманита в соотношении от 3 : 2 до 1 : 1 (модифицирующие

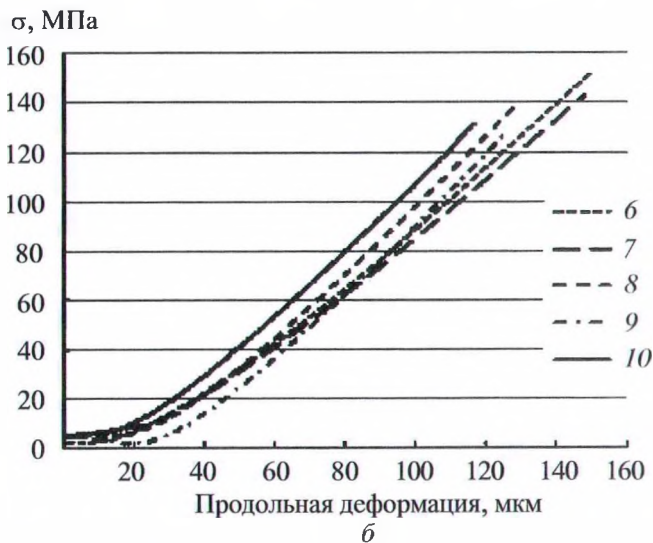


Рис. 3. Диаграммы деформации базальтовых стекол:  
1 – базальтовое стекло; 2 – 10 – стекла модифицированных составов



оксиды  $B_2O_3 + CaO + Al_2O_3 + SiO_2$ ) получены образцы базальтового стекла с показателями прочности 137 – 155 МПа. Композиции базальта с данными модификаторами, содержащие 18 – 19 %  $Al_2O_3$  и 2,1 – 2,5 %  $B_2O_3$ , обеспечивают технологические свойства на уровне базового образца при показателях прочности 140 – 148 МПа. Соответственно, процессы плавления таких композиций и формирования непрерывного волокна из расплава модифицированного состава не требуют дополнительных энергозатрат.

## Выводы

Проведен синтез модифицированных базальтовых стекол на основе алюмо- и борсодержащих композиций базальт–модификатор. По результатам исследования фазовых превращений при термической обработке сырьевых композиций базальт–модификатор и модифицированных базальтовых стекол установлено, что улучшение технологических характеристик достигается при введении борсодержащих компонентов. Снижение температуры ликвидуса при введении  $B_2O_3$  дает положительный технологический эффект в отношении стекол с высокой склонностью к кристаллизации.

Установлена возможность повышения прочности базальтовых стекол на 15 – 20 % при модифицировании их состава. По совокупности технологических и механических свойств оптимальным является введение комплексных алюмо- и борсодержащих модификаторов – кианита и колеманита в соотношении 3:2.

## Список литературы

1. Оснос С. П. Применение материалов на основе базальтовых волокон // Композитный мир. 2015. № 4. С. 72 – 79.
2. Fiber Technology for Fiber-Reinforced Composites // Ed. by M. Özgür Seydibeyoğlu, Amar K. Mohanty, Manjuri Misra. Woodhead Publishing, 2017. P. 169 – 185.
3. Новицкий А. Г., Ефремов М. В. Технологические аспекты пригодности горных пород различных месторождений для получения базальтового непрерывного волокна // Стекло и керамика. 2012. № 12. С. 22 – 26. [Novitskii A. G., Efremov M. V. Technological aspects of the suitability of rocks from different deposits for the production of continuous basalt fiber // Glass Ceram. 2013. V. 69, No. 11–12. P. 409 – 412.]
4. Tatarintseva O. S., Khodakova N. N. Effect of Production Conditions of Basalt Glasses on Their Physicochemical Properties and Drawing Temperature Range of Continuous Fibers // Glass Physics and Chemistry. 2012. V. 38, No. 1. P. 89 – 95. URL: <https://doi.org/10.1134/S1087659612010130>
5. Gutnikov S. I., Popov S. S., Efremov V. A., et al. Correlation of Phase Composition, Structure, and Mechanical Properties of Natural Basalt Continuous Fibers // Natural Resources Research. 2021. V. 30. P. 1105 – 1119. URL: <https://doi.org/10.1007/s11053-020-09786-1>
6. Липатов Я. В., Гутников С. И., Манылов М. С. и др. Влияние  $ZrO_2$  на щелочестойкость и механические свойства базальтовых волокон // Неорганические материалы. 2012. Т. 48, № 7. С. 858 – 864.
7. Liua J., Yang J., Chen M., et al. Effect of  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$  on heat resistance of basalt fiber // Thermochimica Acta. 2018. V. 660. P. 56 – 60. URL: <https://doi.org/10.1016/j.tca.2017.12.023>
8. Манылов М. С. Влияние модификации базальтового сырья на условия кристаллизации волокон: автореф. дис. ... канд. хим. наук. М.: МГУ, 2013. 27 с.
9. Lonroth N., Yue Y. Z. Influence of chemical composition on the physical properties of basaltic glasses // Glass Technol.: Eur. J. Glass Sci. Technol. Pt A. 2009. V. 50, No. 3. P. 165 – 173.
10. Huo Y, Qin G., Huo J. et al. Crystallization Kinetics of Modified Basalt Glass // Materials. 2020. V. 13, No. 21. P. 5043. 12 p. URL: <https://doi.org/10.3390/ma13215043>
11. Meng Y., Liu J., Xia Y. Preparation and characterization of continuous basalt fibre with high tensile strength // Ceramics International. 2021. V. 47, No. 9. P. 12410 – 12415. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.01.097>
12. Павлюкевич Ю. Г., Папко Л. Ф., Хлыстов С. П. и др. Влияние борсодержащих компонентов на технологические свойства базальтовых расплаво и стекол // Стекло и керамика. 2018. Т. 91, № 11. С. 8 – 12. [Pavlyukevich Yu. G., Papko L. F., Khlystov S. P., et al. Effect of Boron-Containing Components on the Technological Properties of Basaltic Melts and Glasses // Glass Ceram. 2019. V. 75, No. 11–12. P. 424 – 427.]
13. Кузьмин К. Л. Влияние химического состава и поверхностной модификации на механические свойства алюмосиликатных волокон: автореф. дис. ... канд. хим. наук. М.: МГУ, 2017. 25 с.
14. Жуковская Е. С., Павлов Ю. В., Попов С. С. и др. Стадия ионного обмена в технологии получения непрерывных базальтовых волокон // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2020. № 2. С. 99 – 103.
15. Павлюкевич Ю. Г., Папко Л. Ф., Гундилович Н. Н. и др. Влияние модификаторов на технологические и механические свойства базальтовых стекол для непрерывного волокна // Научные технологии и инновации (XXIV научные чтения): сб. докладов междунар. науч.-практ. конф. Белгород: БГТУ, 2021. С. 43 – 46.
16. Yang C., Liu Z., Tong X., et al. Effects of raw material homogenization on the structure of basalt melt and performance of fibers // Ceramics International. 2022. V. 48, No. 9. P. 11998 – 12005. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.01.049>

Поступила в редакцию / Received 21.04.2023

Принята к публикации / Accepted

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.  
**Conflict of interest.** The authors declare no conflict of interest.

**Финансирование.** Исследование не имело спонсорской поддержки.  
**Financing.** The study was not sponsored.

#### Сведения об авторах / Information about authors

**Юрий Геннадьевич Павлюкевич** – канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой технологии стекла и керамики, Белорусский государственный технологический университет, Минск, Республика Беларусь.

**Yury G. Pauliukevich** – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Glass and Ceramics Technology, Belarusian State Technological University, Minsk, Republic of Belarus.

**E-mail:** pavliukevitch.yura@yandex.ru. **SPIN РИНЦ:** 4435-5158

**ORCID:** 0000-0002-0330-0514

**Людмила Федоровна Папко** – канд. техн. наук, доцент кафедры технологии стекла и керамики, Белорусский государственный технологический университет, Минск, Республика Беларусь.

**Ludmila F. Papko** – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Glass and Ceramics Technology, Belarusian State Technological University, Minsk, Republic of Belarus.

**E-mail:** papko@belstu.by. **SPIN РИНЦ:** 6480-9129

**ORCID:** 0000-0002-6728-009X

**Александр Петрович Кравчук** – канд. техн. наук, доцент кафедры технологии стекла и керамики, Белорусский государственный технологический университет, Минск, Республика Беларусь.

**Alexander P. Kravchuk** – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Glass and Ceramics Technology, Belarusian State Technological University, Minsk, Republic of Belarus.

**E-mail:** kravchuk@belstu.by. **SPIN РИНЦ:** 2285-6284

**ORCID:** 0000-0002-6951-0717

**Павел Сергеевич Ларионов** – мл. науч. сотрудник кафедры технологии стекла и керамики, Белорусский государственный технологический университет, Минск, Республика Беларусь.

**Pavel S. Lariонов** – Jr. scientific. Employee of the Department of Glass and Ceramics Technology, Belarusian State Technological University, Minsk, Republic of Belarus.

**E-mail:** ununoktium@outlook.com. **SPIN РИНЦ:** 2063-8091

**ORCID:** 0000-0002-2761-9781

**Светлана Юрьевна Янсон** – канд. геол.-минерал. наук, зам. директора ресурсного центра «Микроскопии и микроанализа», Научный парк Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия.

**Svetlana Yu. Yanson** – Ph.D. in Geol.-Mineral Sciences, deputy. Director of the Resource Center "Microscopy and Microanalysis", Science Park St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia.

**E-mail:** jansn.sv@gmail.com. **SPIN РИНЦ:** 2168-7408

**ORCID:** 0000-0002-1341-2528

### **Вниманию подписчиков!**

Подписаться на журнал "Стекло и керамика" можно в любом отделении связи

по **ОБЪЕДИНЕННОМУ КАТАЛОГУ "ПРЕССА РОССИИ"**

**Том 1: Российские и зарубежные газеты и журналы**

Индекс журнала **70881**

Журнал в розничную продажу не поступает

Подписку можно оформить через издательство.

Тел./факс: (495) 514-26-34. E-mail: [zakaz@idspektr.ru](mailto:zakaz@idspektr.ru) [www.glass-ceramics.ru](http://www.glass-ceramics.ru)

