

УДК 666.3.017

**Р. Ю. Попов<sup>1</sup>, Ф. И. Пантелеенко<sup>2</sup>,****А. Н. Шиманская<sup>1</sup>, Е. М. Дятлова<sup>1</sup>, К. Б. Подболотов<sup>3</sup>**<sup>1</sup>Белорусский государственный технологический университет<sup>2</sup>Белорусский национальный технический университет<sup>3</sup>Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси**ВЛИЯНИЕ МИНЕРАЛИЗУЮЩИХ ДОБАВОК НА ПРОЦЕССЫ,  
ПРОТЕКАЮЩИЕ ПРИ СИНТЕЗЕ КОРУНДОВОЙ КЕРАМИКИ**

В статье представлены результаты исследования влияния различных минерализующих добавок на процессы спекания и фазообразования корундовой керамики. В качестве минерализующих добавок в работе использовались периклаз, диоксиды титана и циркония, оксид марганца (IV), доломит, мел. Кроме того, в составы экспериментальных масс дополнительно вводился армирующий компонент – отходы каолинового или углеродного волокна. Изучено комплексное влияние комбинации добавок на свойства корундовой керамики, ее структуру и фазовый состав. Установлено, что введение в керамические массы сочетания добавок  $MnO_2$  и  $TiO_2$  по 2,5 мас. % способствует увеличению кажущейся плотности на 13–15%, прочности при изгибе на 18–20%, снижению водопоглощения на 0,9–1,0% и открытой пористости на 1,5–2,0% по сравнению с керамикой, содержащей только одну минерализующую добавку диоксида титана. Дополнительное введение армирующего волокна в количестве 2,5 мас. % в указанные составы экспериментальных масс приводит к возрастанию прочностных характеристик еще на 10–12%. Исследована структура и фазовый состав полученного керамического материала.

**Ключевые слова:** корунд, минерализующая добавка, фазовый состав, структура, механическая прочность.

**Для цитирования:** Попов Р. Ю., Пантелеенко Ф. И., Шиманская А. Н., Дятлова Е. М., Подболотов К. Б. Влияние минерализующих добавок на процессы, протекающие при синтезе корундовой керамики // Труды БГТУ. Сер. 2, Химические технологии, биотехнологии, геоэкология. 2021. № 2 (247). С. 72–79.

**R. Yu. Popov<sup>1</sup>, F. I. Pantsialeynka<sup>2</sup>,****H. M. Shymanskaya<sup>1</sup>, E. M. Dyatlova<sup>1</sup>, K. B. Podbolotov<sup>3</sup>**<sup>1</sup>Belarusian State Technological University<sup>2</sup>Belarusian National Technical University<sup>3</sup>Physical-technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus**EFFECT OF MINERALIZING ADDITIVES  
ON THE SYNTHESIS OF CORUNDUM CERAMICS**

The article presents the results of study of the various mineralizing additives effect on the sintering and phase formation of corundum ceramics. Periclase, titanium and zirconium dioxides, manganese (IV) oxide, dolomite, chalk have been used as mineralizing additives. In addition, a reinforcing component was additionally introduced into the experimental masses – waste of kaolin or carbon fibers. The complex effect of a combination of additives on the properties of corundum ceramics, its structure and phase composition has been studied. It has been established that the introduction of up to 2.5 wt. %  $MnO_2$  into ceramic masses, in the presence of an additive of 2.5 wt. %  $TiO_2$ , promotes an increase in apparent density by 13–15%, bending strength by 18–20% and a decrease in water absorption to 0.9–1.0%, open porosity 1.5–2.0% compared to ceramics containing only one mineralizing additive of titanium dioxide. Additional introduction of the reinforcing component up to 2.5 wt. % (fiber) into the compositions of the experimental masses leads to an increase in the strength characteristics by another 10–12%. The structure and phase composition of the obtained ceramic material have been investigated.

**Key words:** corundum, mineralizing additive, phase composition, structure, mechanical strength.

**For citation:** Popov R. Yu., Pantsialeynka F. I., Shymanskaya H. M., Dyatlova E. M., Podbolotov K. B. Effect of mineralizing additives on the synthesis of corundum ceramics. *Proceedings of BSTU, issue 2, Chemical Engineering, Biotechnologies, Geoecology*, 2021, no. 2 (247), pp. 72–79 (In Russian).

**Введение.** Корундовая керамика является широко используемой и востребованной в различных сферах: станкостроение, металлургия,

космическая отрасль, промышленность строительных материалов, атомная энергетика и др. [1–8]. Популярность керамики на основе  $Al_2O_3$

определяется такими функциональными характеристиками, как износостойкость, механическая прочность, твердость, устойчивость к ударным нагрузкам и радиационному воздействию. Кроме того, керамика на основе корунда характеризуется химической стойкостью, биоэнергетностью и высоким электрическим сопротивлением. Основные характеристики корундовой керамики приведены в табл. 1.

Таблица 1  
Эксплуатационные характеристики  
корундовой керамики

Характеристики	Значение показателя
Температура синтеза, °С	1450–1700
Твердость: – по шкале Мооса – по Виккерсу (HV), ГПа	9 12–18
Трещиностойкость, МПа·м <sup>1/2</sup>	3,0–4,5
Кажущаяся плотность, кг/м <sup>3</sup>	3000–3990
Водопоглощение, %	0,02–12,0
Температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР) (20–900°С), $\alpha \cdot 10^6 \text{ K}^{-1}$	7–8
Коэффициент теплопроводности (100°С), Вт/(м·К)	1,5–30,0
Удельное электрическое сопротивление, Ом·см: – при 100°С – при 1000°С	Не менее $10^{11}$ Не менее $10^7$
Предел прочности при изгибе (20–1000°С), МПа	200–800
Предел прочности при ударном изгибе, МПа	0,3
Температура эксплуатации, °С	1400–1650
Температура плавления, °С	2310

Сочетание указанных характеристик делает материал незаменимым при изготовлении коррозионностойких, износостойких, электроизоляционных и термостойких изделий для самых различных отраслей промышленности.

При разработке технологии получения высокоглиноземистых керамических материалов большое влияние уделяется снижению температуры обжига. Это достигается путем использования различных технологических подходов: введением минерализующих добавок, оптимизацией параметров получения, например, повышением дисперсности сырья, изменением режимов формирования изделий, скорости проведения термообработки и др.

Одной из важнейших технологических операций при производстве корундовых изделий является помол сырьевых компонентов. Для производства плотных спекшихся ко-

рундовых изделий технический глинозем должен быть измельчен до элементарных кристаллов размером 1–2 мкм, а в некоторых случаях и мельче. Глинозем может подвергаться помолу в шаровых, трубчатых, вибрационных и струйных мельницах в сухом состоянии или в виде суспензии (мокрый помол). Наибольшее распространение получил мокрый помол, поскольку при сухом наблюдается агрегирование частиц порошка и налипания материала на стенки мельницы, что существенно снижает эффективность указанной технологической операции. С целью активизации процесса сухого помола технического глинозема или электроплавленого корунда при помоле вводятся поверхностно-активные вещества (ПАВ) органического происхождения, например полигидросилоксан, обеспечивающие расклинивающее давление. Как известно, хрупкие материалы разрушаются первоначально в местах наличия дефектов структуры (макро- и микродефектов, трещин, пор и т. д.). С увеличением дисперсности порошков возрастает прочность измельчаемых частиц, а также пропорционально увеличиваются энергетические затраты при дальнейшем диспергировании порошка. Разрушение материалов облегчается за счет адсорбционного понижения прочности твердых тел (эффекта Ребиндера), заключающегося в уменьшении поверхностной энергии с помощью ПАВ, вследствие чего облегчается деформирование и разрушение твердых тел.

Дисперсность глинозема оказывает решающее влияние не только на температуру спекания, но и на возможность спекания самого корунда. С повышением дисперсности увеличивается суммарная поверхностная энергия и контактная площадь соприкосновения зерен, возрастает дефектность строения, что создает более благоприятные условия для спекания материала. Следует считать, что максимальный размер зерен  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , способных к активному твердофазному спеканию, не должен превышать 3–5 мкм.

Независимо от того, какой метод изготовления изделий будет применен, технический глинозем предварительно обжигают, при необходимости очищают от примесей, а затем тонко измельчают. Однако последовательность этих операций может меняться [1–3]. Как правило, обжиг предшествует помолу  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Предварительный обжиг технического глинозема преследует цель перевести  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  в  $\alpha$ -форму, что приводит к снижению линейной усадки изделий при обжиге с 22 до 14%, объемной – с 53 до 37%; осуществить кристаллизацию мельчайших монокристаллов  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ , находящихся в техническом глиноземе, в пределах

желательных и возможных размеров; облегчить процесс измельчения глинозема ввиду повышения хрупкости сферолитов при обжиге [9]. Глинозем можно обжигать в печах различных конструкций – туннельных, канальных, муфельных и др. [1, 2]. Главным условием эффективного обжига глинозема является его равномерность.

Для получения корундовой керамики с высокими прочностными характеристиками в основном применяются следующие способы формования: холодное статическое прессование с одно- или двухсторонним приложением давления; горячее прессование; холодное или горячее изостатическое прессование в гидрроли газостатах; горячая экструзия; шликерное литье; магнитно-импульсное, ударное и взрывное прессование; ультразвуковое прессование. Максимально высокие показатели механической прочности достигнуты при горячем прессовании, однако низкая производительность и сложность ограничивают применение данного способа. Для изготовления корундовой керамики с высоким уровнем механических свойств с помощью технологии одноосного прессования требуются добавки, активизирующие процесс спекания [10–13].

Выделяют следующие механизмы действия добавок, способствующих спеканию корундовой керамики: 1) добавки эвтектических составов различных систем, которые в процессе обжига вызывают появление небольшого количества расплава, активно участвующего в спекании. Затем образовавшийся расплав полностью кристаллизуется при охлаждении, поэтому стекловидная фаза в подобных материалах практически отсутствует; 2) добавки, не образующие жидкой фазы. Такие минерализаторы могут, во-первых, активизировать процесс спекания за счет образования твердых растворов, во-вторых, замедлять рекристаллизацию, т. е. способствовать удалению пор, в-третьих, замедлять процесс спекания и рост зерен корунда [1].

Так, например, добавка  $TiO_2$  снижает температуру спекания корунда до 1500–1550°C. При этом образуется твердый раствор  $TiO_2$  в  $Al_2O_3$ , что вызывает искажение кристаллической решетки корунда и, как следствие, более активное спекание и его рекристаллизацию. Добавка  $TiO_2$  вызывает интенсивный рост кристаллов корундовой керамики до 200–350 мкм.

К добавкам, замедляющим процесс рекристаллизации кристаллов корунда, относится  $MgO$ . При введении в шихту 0,5–1 мас. %  $MgO$  размер кристаллов печенной керамики не превышает 2–10 мкм. Это объясняется образованием на поверхности корунда микронных просло-

ек магнезиальной шпинели, которые препятствуют росту зерен корунда и, следовательно, способствуют уплотнению материала и повышению его прочностных характеристик. За счет формирования мелкозернистой структуры материала улучшаются его механические свойства. Существенного снижения температуры спекания материала при введении  $MgO$  не наблюдается [1–3].

Добавка  $ZrO_2$  с низким значением поверхностного натяжения приводит к формированию низкоэнергетических границ и, как следствие, к повышению прочности корундовой керамики. Благодаря этой добавке может быть получена корундовая керамика с высокой трещиностойкостью – 6,3 МПа·м<sup>1/2</sup> и повышенной высокотемпературной прочностью [1].

В связи с вышесказанным целью настоящего исследования является разработка составов масс и технологических параметров получения износостойкой, прочной корундовой керамики при пониженных температурах синтеза (не превышающих 1500°C) с требуемым набором технико-эксплуатационных характеристик; изыскание способов и технологических приемов повышения прочностных свойств корундовой керамики при снижении энергетических и экономических затрат.

**Основная часть.** В качестве сырьевых материалов для подготовки экспериментальных масс использовались следующие компоненты: технический глинозем (марки ГН-1, ГОСТ 30559), периклаз (ГОСТ 24523.0),  $TiO_2$  (ГОСТ 9808),  $ZrO_2$  (ГОСТ 21907),  $MnO_2$  (ГОСТ 25823), доломит (ГОСТ 14050), мел (ГОСТ 12085). Химические составы масс приведены в табл. 2.

Таблица 2

Химический состав экспериментальных композиций, мас. %

Состав	$SiO_2$	$Al_2O_3$	$Fe_2O_3$	$TiO_2$	CaO	MgO	$Na_2O$	$ZrO_2$
1	0,13	96,99	0,09	–	–	2,49	0,30	–
2	0,13	97,49	0,09	–	–	1,98	0,30	–
3	0,13	97,98	0,09	–	–	1,49	0,31	–
4	0,18	98,02	0,09	0,02	1,34	0,05	0,30	–
5	0,17	98,30	0,09	0,02	1,07	0,04	0,30	–
6	0,16	98,60	0,09	0,01	0,80	0,03	0,31	–
7	0,13	96,99	0,09	2,49	–	–	0,30	–
8	0,13	97,48	0,09	1,99	–	–	0,30	–
9	0,13	97,98	0,09	1,49	–	–	0,31	–
10	0,13	96,98	0,09	–	–	–	0,30	2,49
11	0,13	97,48	0,09	–	–	–	0,30	1,99
12	0,13	97,98	0,09	–	–	–	0,31	1,49
13	0,21	98,09	0,10	–	0,75	0,55	0,30	–
14	0,20	98,36	0,09	–	0,60	0,44	0,30	–
15	0,18	98,64	0,09	–	0,44	0,33	0,31	–

Периклаз, диоксиды титана и циркония, оксид марганца (IV), доломит и мел вводились в состав керамических масс на основе  $Al_2O_3$  в количестве 0,5–2,5 мас. % с целью снижения температуры спекания керамики.

Исходные сырьевые материалы, прошедшие весовое дозирование, измельчались в шаровой мельнице при добавлении воды и этилового спирта в соотношении 90:10 соответственно и влажности композиции 45–50 мас. %. Одновременно с процессом измельчения осуществлялась механоактивация керамической массы. После этого производилась сушка композиций в сушильном шкафу SNOL (Литва) при температуре 100–110°C до постоянной влажности. Далее из полученных масс изготавливались пресс-порошки путем их увлажнения водой до влажности 6–8 мас. %. В качестве связки использовались поливиниловый спирт (ПВС), а также карбоксиметилцеллюлоза (КМЦ).

Полученные массы вылеживались в течение 1 сут, далее из них готовились опытные образцы в виде цилиндров диаметром 20 мм и плиточек размером (50×50) мм методом полусухого прессования при давлении прессования 80–90 МПа.

Сформованные образцы высушивались в сушильном шкафу при температуре 100–110°C, до остаточной влажности не более 0,5 мас. % и обжигались в лабораторной высокотемпературной электропечи SNOL 1,6,2,5.1/13,5-Y1 (Литва) при температурах 1300, 1400, 1500°C с выдержкой при максимальной температуре в течение 1 ч. На полученных опытных образцах проводилось определение физико-химических свойств и эксплуатационных характеристик корундовой керамики.

Для определения кажущейся плотности, водопоглощения и открытой пористости образцов использовался метод насыщения и гидростатического взвешивания (ГОСТ 2409), механическая прочность при изгибе изучалась с помощью универсальной электромеханической испытательной машины Galdabini Quasar 100 (Италия) в соответствии с ГОСТ Р 50526. Химическая стойкость корундовой керамики определялась по отношению к воздействию следующих растворов: HCl концентрацией 30 мас. % и NaOH – 20 мас. %.

Как указывалось выше, эффект влияния вводимых добавок определяется их природой, концентрацией, степенью равномерности распределения в частицах порошка основного оксида и характером их взаимодействия, тониной помола.

Установлено, что введение минерализующих добавок в количестве 0,5–2,5 мас. % способствует процессу спекания материала, причем

эта тенденция более выражена при повышении температуры обжига керамики до 1500°C.

Физико-химические свойства экспериментальных образцов, полученных при температуре обжига 1300–1500°, представлены в табл. 3. Из приведенных данных видно, что наибольший эффект достигается при использовании в качестве минерализующих добавок  $TiO_2$  и CaO (составы 4–9). Образцы корундовой керамики 4–9 характеризуются механической прочностью материала при изгибе в 2–3 раза выше по сравнению с остальными.

Таблица 3

**Физико-химические свойства керамики, полученной в температурном интервале обжига 1300–1500°C**

Состав	Водопоглощение, %	Кажущаяся плотность, кг/м <sup>3</sup>	Открытая пористость, %	Прочность при изгибе $\sigma_{изг}$ , МПа
1	31,9–56,7	1228–1766	56,3–69,6	1,3–7,2
2	29,9–45,3	1313–1825	54,7–66,4	3,1–21,0
3	26,0–42,8	1456–1946	50,7–62,3	6,5–30,1
4	9,7–38,0	1579–2879	28,0–60,0	1,9–69,2
5	6,8–23,5	2153–3099	20,9–50,6	29,1–121,9
6	6,2–18,7	2373–3267	18,0–44,4	16,7–102,8
7	9,8–22,3	2219–2811	27,5–49,5	33,6–148,4
8	7,9–20,8	2360–2994	23,7–49,2	13,0–131,7
9	5,6–15,6	2472–3349	18,9–38,6	5,5–94,0
10	25,1–45,1	1425–1990	49,9–64,3	2,8–23,8
11	23,8–39,3	1534–2069	47,2–60,2	1,4–19,1
12	19,8–35,9	1625–2111	41,7–48,4	1,0–9,3
13	27,2–46,2	1357–1913	52,0–65,6	3,3–14,2
14	24,6–44,2	1425–2003	49,2–62,9	2,1–13,3
15	21,2–43,0	1494–2164	45,9–60,3	1,2–10,2

Механизм действия добавок  $TiO_2$  и CaO заключается в том, что они образуют со спекаемой основой твердые растворы, причем создаются точечные дефекты, которые ускоряют процесс диффузии твердого вещества, при этом увеличивается степень спекания материала, а также повышается плотность керамики.

Проведенные экспериментальные исследования показали, что в выбранном интервале термообработки применение добавок MgO,  $ZrO_2$  и доломита в количестве 0,5–2,5 мас. % не позволяет получить корундовую керамику с высокими прочностными характеристиками. Несомненно, использование добавок, даже в незначительных количествах, приводит к изменению, а иногда и ухудшению некоторых характеристик материала, например, может повышаться электропроводность керамики, снижаться химическая стойкость и механическая прочность, а также изменяться чистота материала и его теплофизические свойства, что не

всегда допустимо для конкретных целей. Однако в некоторых случаях такое негативное влияние минерализующих добавок компенсируется существенным снижением температуры синтеза на 100–300°C, а также уменьшением стоимости изделий.

Результаты определения химической стойкости образцов составов 5 и 7 приведены на рис. 1.

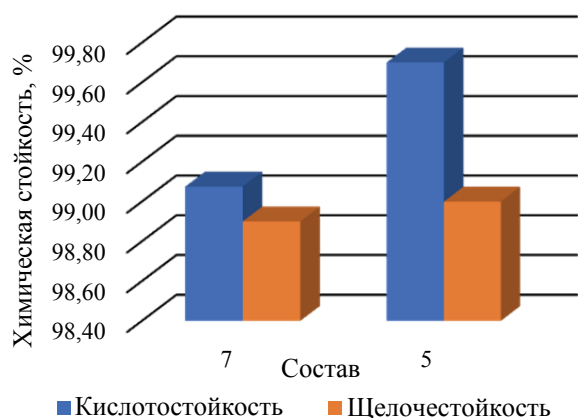


Рис. 1. Химическая стойкость образцов, обожженных при температуре 1500°C

Как видно из рис. 1, корундовая керамика на основе разработанных составов керамических масс наряду с достаточно высокими прочностными характеристиками отличалась высокой кислотостойкостью.

На следующем этапе работы изучалось влияние сочетания различных добавок на свойства и процессы, протекающие при синтезе корундовой керамики. В качестве базового использовался состав 7, содержащий 2,5 мас. %  $TiO_2$ , который допировался  $MnO_2$  в количестве 2,5 мас. %. Кроме того, в качестве армирующих компонентов, обеспечивающих повышение механических характеристик изделий, в состав экспериментальных керамических масс 7 дополнительно вводились отходы каолинового (ГОСТ 23619) и углеродного волокон (ТУ ВУ 400031289.127) в количестве 2,5 мас. %.

Образцы керамики изготавливали по вышеуказанной технологии. Внешний вид образцов приведен на рис. 2.

Установлено, что введение в состав керамических масс 2,5 мас. %  $MnO_2$  (при наличии в нем добавки 2,5 мас. %  $TiO_2$ ) в температурном интервале обжига 1300–1500°C способствует увеличению кажущейся плотности до 2507–3236 кг/м<sup>3</sup>, прочности при изгибе до 40,3–178,0 МПа, снижению водопоглощения до 9,7–22,0% и открытой пористости до 27,1–48,5% по сравнению с исходным образцом состава 7. Прочностные свойства корундовой керамики, вклю-

чающей минерализующие добавки, приведены на рис. 3.

Применение армирующих волокон в количестве 2,5 мас. % приводит к возрастанию прочностных характеристик на 4,8–21,4 МПа (рис. 4).

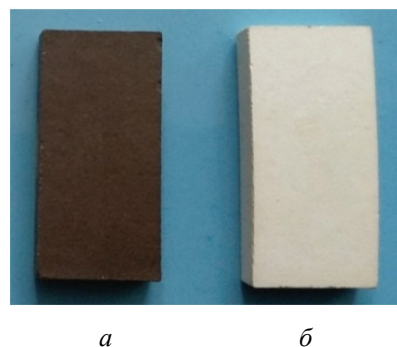


Рис. 2. Керамические образцы, включающие в качестве добавки: а –  $TiO_2$  и  $MnO_2$ ; б –  $TiO_2$

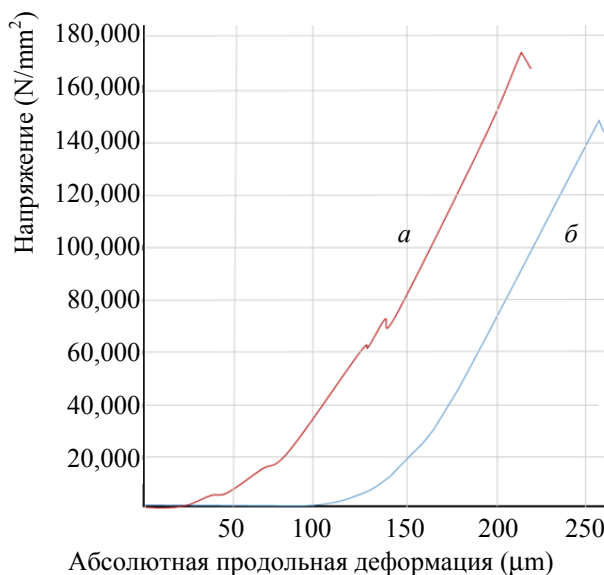


Рис. 3. Механическая прочность при изгибе образцов керамики, обожженных при 1500°C и содержащих следующие минерализующие добавки: а –  $TiO_2$  и  $MnO_2$ ; б –  $TiO_2$

Исследования фазового состава опытных образцов (ДРОН-2, Россия) позволили сделать вывод о том, что материал представлен преимущественно кристаллической составляющей (корунд), в качестве второстепенных фаз фиксировались тиалит и рутил (рис. 5).

Кристаллических фаз, содержащих  $MnO_2$  в своем составе, не обнаружено, однако присутствие обширного участка гало на рентгенограмме позволяет выдвинуть предположение о возможности вхождения указанного соединения в состав стекловидной фазы.



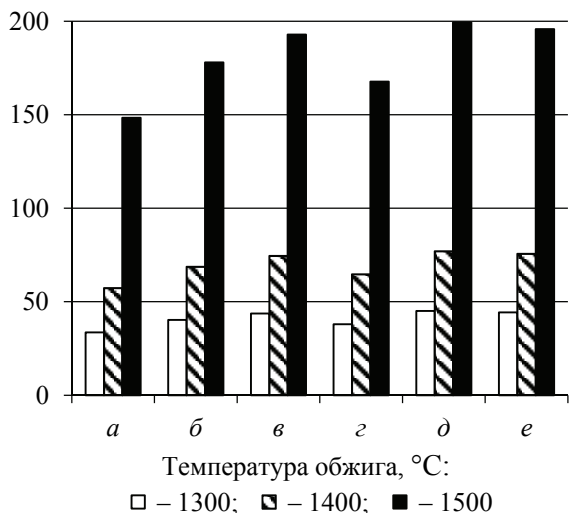


Рис. 4. Механическая прочность при изгибе образцов керамики, содержащих следующие минерализующие добавки: а – TiO<sub>2</sub>; б – TiO<sub>2</sub> и MnO<sub>2</sub>; в – TiO<sub>2</sub> и отходы каолинового волокна; г – TiO<sub>2</sub> и отходы углеродного волокна; д – TiO<sub>2</sub>, MnO<sub>2</sub> и отходы каолинового волокна; е – TiO<sub>2</sub>, MnO<sub>2</sub> и отходы углеродного волокна

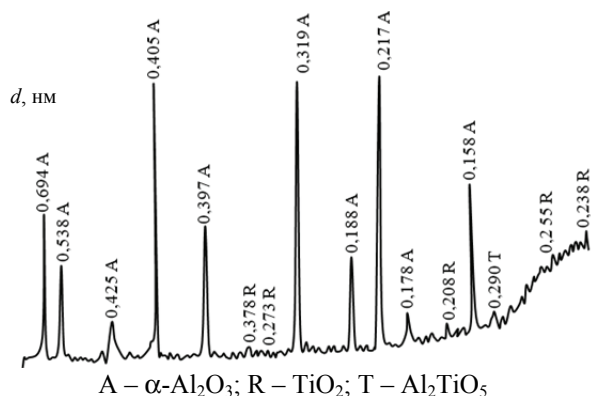


Рис. 5. Фазовый состав образцов керамики, включающих в качестве добавки TiO<sub>2</sub>, MnO<sub>2</sub> и отходы каолинового волокна

При изучении структуры керамического материала с помощью электронной микроскопии (JSM-5610 LV, Япония) выявлено, что материал характеризуется полнокристаллической структурой; однородной текстурой, в которой четко фиксируются зерна корунда (рис. 5).

Размеры зерен одинаковы, что также может положительно сказываться на теплофизических и огнеупорных характеристиках материала (рис. 6).

**Заключение.** Таким образом, на основании проведенных исследований разработаны составы масс и технологические параметры получения корундовых материалов при пониженных температурах обжига (1500°C). Изучено влияние минерализующих добавок периклаза, диок-

сидов титана и циркония, оксида марганца (IV), доломита, мела, отходов каолинового и углеродного волокон на процессы спекания и фазообразования корундовой керамики.

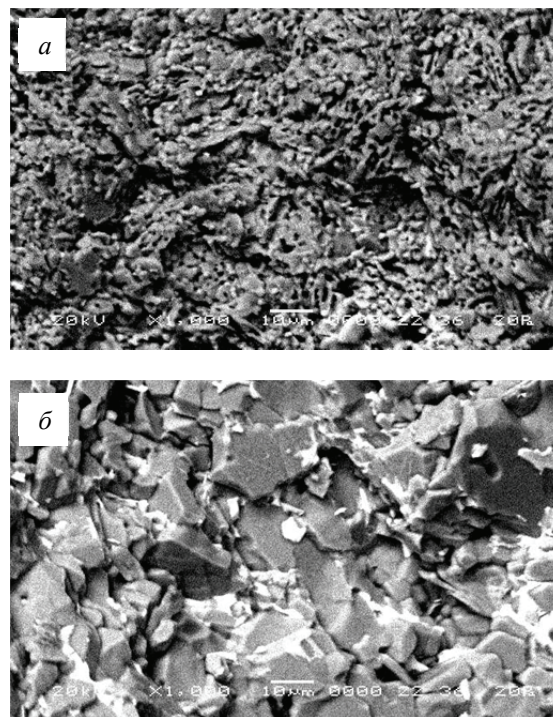


Рис. 6. Электронно-микроскопические изображения поверхности излома образцов, включающих в состав в качестве добавки: а – TiO<sub>2</sub>; б – TiO<sub>2</sub> и MnO<sub>2</sub>

Установлено, что корундовая керамика с высокими прочностными характеристиками получена при использовании комплексных добавок MnO<sub>2</sub> и TiO<sub>2</sub>; MnO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub> и отходов каолинового волокна; MnO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub> и отходов углеродного волокна.

Периклаз, доломит и диоксид циркония в количестве 2,5 мас. % в интервале температур 1300–1500°C не обеспечивают спекание корундовой керамики, полученные материалы характеризуются низкими прочностными показателями, механическая прочность при изгибе составляет 1,0–30,1 МПа, и высокими значениями водопоглощения – 19,8–56,7%.

При этом введение в керамические массы комплексной добавки TiO<sub>2</sub> и MnO<sub>2</sub> по 2,5 мас. % способствует увеличению кажущейся плотности на 13–15%, прочности при изгибе на 18–20%, снижению водопоглощения на 0,9–1,0% и открытой пористости на 1,5–2,0% по сравнению с керамикой, содержащей только 2,5 мас. % диоксида титана. Отходы каолинового и углеродного волокон в количестве 2,5 мас. % обеспечивают повышение прочностных характеристик еще на 10–12%.

Введение добавок приводит к изменению окраски керамики, однако ее использование предполагается в тех отраслях промышленности, где присутствие таких недостатков не является определяющими (например, в станкостроении, при создании абразивных материалов, изделий, устойчивых к ударным нагрузкам, воздействию стрелкового оружия и др.).

Армирование корундовой керамики волокнами не только способствует повышению прочностных характеристик, но и открывает новые области использования керамических композиций. Эффективность применения таких материалов заключается в высокой абразивной стойкости, износоустойчивости, твердости, прочности и огнеупорности разработанных материалов.

### Список литературы

1. Бакунов В. С., Лукин Е. С. Особенности технологии высокоплотной керамики. Регулирование структуры при спекании // *Стекло и керамика*. 2008. № 11. С. 17–21.
2. Лукин Е. С. Современная высокоплотная оксидная керамика с регулируемой микроструктурой: в 2 ч. Ч. I. Влияние агрегации порошков оксидов на спекание и микроструктуру керамики // *Огнеупоры и техническая керамика*. 1996. № 1. С. 5–14.
3. Керамическая масса: пат. 2136626 Российская Федерация. № 97120676/03; заявл. 03.12.1997; опубл. 10.09.1999. 5 с.
4. Композиционные керамики на основе оксида алюминия, полученные методом электроимпульсного плазменного спекания для трибологических применений / М. С. Болдин [и др.] // *Вестн. ННГУ*. 2012. № 6-1. С. 32–37.
5. Гаршин А. П., Кулик В. И., Нилов А. С. Фрикционные материалы на основе волокнисто-армированных композитов с углеродной и керамической матрицей для систем торможения // *Новые огнеупоры*. 2008. № 9. С. 54–60.
6. Мурзакова А. Р., Валеев И. Р., Шаяхметов У. Ш. Технология эффективных многофункциональных керамических композиционных материалов // *Огнеупоры и техническая керамика*. 2012. № 1–2. С. 37–39.
7. Аунг Ч. М., Попова Н. А., Лукин Е. С. Композиционная керамика на основе электроплавленного корунда с эвтектической добавкой в системе  $Al_2O_3 - TiO_2 - MnO$  // *Успехи в химии и химической технологии*. 2017. Т. 31, № 3 (184). С. 10–12.
8. Гаршин А. П., Кулик В. И., Нилов А. С. Ударопрочные материалы на основе технической керамики: достижения и перспективы повышения их баллистической эффективности // *Новые огнеупоры*. 2016. № 4. С. 53–67.
9. Балкевич В. Л. *Техническая керамика*. М.: Стройиздат, 1984. 256 с.
10. Матренин С. В., Ильин А. П., Кулявцева С. В. Низкотемпературное спекание корундовых порошков // *Изв. Томск. политехн. ун-та. Инжиниринг георесурсов*. 2018. Т. 329, № 2. С. 127–135.
11. Технология получения корундовой бронекерамики, модифицированной сложными добавками / П. М. Плетнев [и др.] // *Изв. Томск. политехн. ун-та. Инжиниринг георесурсов*. 2015. Т. 326, № 3. С. 40–49.
12. Лукин Е. С. Современная высокоплотная оксидная керамика с регулируемой микроструктурой. Ч. II. Обоснование принципов выбора добавок, влияющих на степень спекания оксидной керамики // *Огнеупоры и техническая керамика*. 1996. № 4. С. 2–13.
13. Макаров Н. А. Использование добавок, образующих жидкую фазу при обжиге, в технологии корундовой керамики // *Стекло и керамика*. 2003. № 10. С. 31–34.

### References

1. Bakunov V. S., Lukin E. S. Special technology features of high-density technical ceramic production. Structure control upon sintering. *Steklo i keramika* [Glass and Ceramics], 2008, no. 11, pp. 17–21 (In Russian).
2. Lukin E. S. Modern high-density oxide ceramics with the controlled microstructure. Pt.1. Oxide powder aggregation effect on the ceramics sintering and microstructure. *Ogneupory i tekhnicheskaya keramika* [Refractories and Industrial Ceramics], 1996, no. 1, pp. 5–14 (In Russian).
3. Pogrebenkov V. M., Reshetnikov A. A., Vereshchagin V. I. *Keramicheskaya massa* [Ceramic mass]. Patent RF, no. 2136626, 1999.
4. Boldin M. S., Sakharov N. V., Shotin S. V., Chuvil'deev V. N., Nokhrin A. V., Kotkov D. N., Pisklov A. V. Alumina-based ceramic composites fabricated by spark plasma sintering for tribological applications. *Vestnik NNGU* [Vestnik of Lobachevsky University of Nizhni Novgorod], 2012, no. 6-1, pp. 32–37 (In Russian).
5. Garshin A. P., Kulik V. I., Nilov A. S. Friction materials based on fiber-reinforced composites with carbon and ceramic matrix for braking systems. *Novyye ogneupory* [New refractories], 2008, no. 9, pp. 54–60 (In Russian).

6. Murzakova A. R., Valeev I. R., Shayakhmetov U. Sh. Technology of the effective multifunctional ceramic composite materials. *Ogneupory i tekhnicheskaya keramika* [Refractories and Industrial Ceramics], 2012, no. 1–2, pp. 37–39 (In Russian).

7. Aung Ch. M., Popova N. A., Lukin E. S. Composite ceramics based on electroplated corundum with evetic additive system  $Al_2O_3 - TiO_2 - MnO$ . *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii* [Advances in chemistry and chemical technology], 2017, vol. 31, no. 3 (184), pp. 10–12 (In Russian).

8. Garshin A. P., Kulik V. I., Nilov A. S. Impact-resistant materials based on technical ceramics: the achievements and possibility of their ballistic efficiency increasing. *Novyye ogneupory* [New refractories], 2016, no. 4, pp. 53–67 (In Russian).

9. Balkevich V. L. *Tekhnicheskaya keramika* [Technical ceramics]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1984. 256 p.

10. Matrenin S. V., Il'in A. P., Kulyavtseva S. V. Low temperature sintering of corundum powders. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov* [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering], 2018, vol. 329, no. 2, pp. 127–135 (In Russian).

11. Pletnev P. M., Nepochatov Yu. K., Malikova E. V., Bogaev A. A. Technology of producing corundum armor ceramics modified with complex additives. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov* [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering], 2015, vol. 326, no. 3, pp. 40–49 (In Russian).

12. Lukin E. S. Modern high-density oxide ceramics with a controlled microstructure. Part 2. Substantiation of principles for the choice of modifying additions effecting the sintering degree of oxide ceramics. *Ogneupory i tekhnicheskaya keramika* [Refractories and Industrial Ceramics], 1996, no. 4, pp. 2–13 (In Russian).

13. Makarov N. A. Using of additives forming a liquid phase upon sintering in alumina ceramics technology. *Steklo i keramika* [Glass and Ceramics], 2003, no. 10, pp. 31–34 (In Russian).

### Информация об авторах

**Попов Ростислав Юрьевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии стекла и керамики. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: rospopov@mail.ru

**Пантелеенко Федор Иванович** – доктор технических наук, профессор кафедры порошковой металлургии, сварки и технологии материалов, член-корреспондент НАН Беларуси, заслуженный деятель науки Республики Беларусь. Белорусский национальный технический университет (220013, г. Минск, ул. Я. Коласа, 24, корп. 7, Республика Беларусь). E-mail: panteleenkofi@mail.ru

**Шиманская Анна Николаевна** – кандидат технических наук, ассистент кафедры технологии стекла и керамики. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: shimanskaya@belstu.by

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

**Подболотов Кирилл Борисович** – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, доцент. Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси (220141, г. Минск, ул. Академика Купревича, 10, Республика Беларусь). E-mail: kirbor@tut.by

### Information about the authors

**Popov Rostislav Yur'evich** – PhD (Engineering), Assistant Professor, the Department of Glass and Ceramics Technology. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: rospopov@mail.ru

**Pantsialeynka Fedor Ivanovich** – DSc (Engineering), Professor, the Department of Powder Metallurgy, Welding and Materials Technology, NAS Corresponding Member, Honoured Scientist of the Republic of Belarus. Belarusian National Technical University (24, build. 7, Ya. Kolasa str., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: panteleenkofi@mail.ru

**Shymanskaya Hanna Mikalaeuna** – PhD (Engineering), assistant lecturer, the Department of Glass and Ceramics Technology. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: shimanskaya@belstu.by

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

**Podbolotov Kirill Borisovich** – PhD (Engineering), Leading Researcher, Assistant Professor. Physical-technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (10, Akademika Kuprevicha str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: kirbor@tut.by

Поступила 30.04.2021