

Д. В. Харитонов, М. Ю. Русин, Н. Е. Шер,
М. К. Алексеев, А. А. Анашкина, Г. И. Куликова

ПОЛУЧЕНИЕ КОРУНДОВОЙ КЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ МИКРОПОРОШКОВ ЭЛЕКТРОКОРУНДА

Ключевые слова: корундовая керамика, микропорошки электрокорунда, активность к спеканию, спекающая добавка, алюмомагниева шпинель, электроплавленный муллит, прессование.

Исследованы процессы спекания микропорошков электрокорунда разных марок, при этом установлено, что наибольшую активность имеет электрокорунд F1500, производимый в России в промышленных масштабах. Электрокорунд F1500 по фазовому составу представляет собой α - Al_2O_3 с небольшими примесями β - Al_2O_3 , состоит из частиц микронных и субмикронных размеров и не требует никакой предварительной подготовки перед применением. Показана эффективность использования спекающей добавки, состоящей из смеси алюмомагниева шпинели и муллита в массовом соотношении 1:4, для получения на его основе конструкционной корундовой керамики. Такое сочетание способствует формированию мелкокристаллической структуры материала с высокими механическими свойствами и создает предпосылки для разработки ресурсосберегающей технологии, в которой операция синтеза спекающей добавки совмещена с процессом обжига. Изучены зависимости свойств получаемой керамики от дисперсности исходных материалов, взаимного соотношения компонентов, параметров формования и температурного режима спекания. Высокие значения плотности 3.81-3.83 г/см³, прочности при изгибе 370 ± 30 МПа и микротвердости 13.8-15.5 ГПа керамики обеспечиваются при введении в электрокорунд спекающей добавки в количестве 4.0-10.0 % мас., относительно низком давлении прессования ~50 МПа и умеренной температуре обжига 1600 °С. Достигнутые свойства определяют возможность применения этого материала в изделиях, работающих в условиях повышенных ударных, истирающих, статических и динамических нагрузок.

D. V. Kharitonov, M. Y. Rusin, N. E. Sher,
M. K. Alekseev, A. A. Anashkina, G. I. Kulikova

OBTAINING CORUNDUM CERAMICS BASED ON ELECTROCORUNDUM MICROPOWDERS

Keywords: corundum ceramics, electrocorundum micropowders, sintering activity, sintering additive, aluminum-magnesium spinel, electrofused mullite, pressing.

The processes of sintering of micropowders of electrocorundum of different brands were studied, and it was found that the greatest activity has electrocorundum F1500, produced in Russia on an industrial scale. The phase composition of electrocorundum F1500 is α - Al_2O_3 with small admixtures of β - Al_2O_3 , consists of particles of micron and submicron sizes and does not require any preliminary preparation before use. The effectiveness of a sintering additive consisting of a mixture of aluminum-magnesium spinel and mullite in a mass ratio of 1:4 for producing structural corundum ceramics based on it has been shown. This combination promotes the formation of a fine-crystalline structure of the material with high mechanical properties and creates the prerequisites for the development of resource-saving technology in which the synthesis of a sintering additive is combined with the firing process. The dependences of the properties of the resulting ceramics on the dispersion of the starting materials, the mutual ratio of the components, molding parameters and sintering temperature conditions were studied. High values of density 3.81-3.83 g/cm³, bending strength 370 ± 30 MPa and microhardness 13.8-15.5 GPa of ceramics are ensured by introducing a sintering additive into electrocorundum in an amount of 4.0-10.0% wt., relatively low pressing pressure ~50 MPa and moderate firing temperature of 1600 °C. The achieved properties determine the possibility of using this material in products operating under conditions of increased shock, abrasion, static and dynamic loads.

Введение

Среди широкого спектра керамических материалов корундовая керамика является одной из самых востребованных в различных отраслях промышленности и сферах жизнедеятельности. Благодаря совокупности уникальных химических, электрофизических и механических свойств, доступности и сравнительно низкой стоимости, научно-практический интерес к ней в последнее время только возрастает [1-7].

Основные характеристики алюмооксидных материалов во многом обусловлены структурой и свойствами самого оксида алюминия, который представляет собой бинарное химическое соединение алюминия и кислорода с химической формулой Al_2O_3 . Безводный оксид алюминия существует в двух основных модификациях – α -

Al_2O_3 и γ - Al_2O_3 , которые отличаются друг от друга по строению кристаллической решетки, плотности и другим свойствам. Высокотемпературной и термодинамически устойчивой формой является α - Al_2O_3 (корунд), который кристаллизуется в тригональной сингонии при температурах выше 1200 °С и сохраняет эту структуру вплоть до температуры плавления [1, 2]. Корунд имеет высокую энергию кристаллической решетки – 15,4 МДж/моль и большую прочность внутрикристаллических связей, определяющую низкую скорость диффузии атомов, соответственно, высокие температуры плавления Al_2O_3 – 2050 °С и спекания керамики на его основе – до 1900 °С. [8, 9].

По той же причине у корунда высокие показатели твердости – 9 по шкале Мооса, что соответствует 90 по шкале Роквелла [1] и прочности плотносеченных

корундовых материалов – до 500 МПа и даже выше [10]. Плотность корунда в зависимости от наличия в нем примесей колеблется от 3.98 до 4.00 г/см³ [1, 11].

Корунд отличается исключительно высокой химической стойкостью в отношении кислот и щелочей. При комнатной температуре на него практически не действует даже плавиковая кислота. Он также устойчив к действию большинства расплавов щелочных металлов [12]. Алюмооксидная керамика отличается высокими показателями электроизоляционных характеристик и низкими диэлектрическими потерями, поэтому к традиционным сферам ее применения относятся электро-, СВЧ- и радиотехника, авиастроение, ракетная и космическая техника, где она используется в качестве электроизоляторов, корпусов газоразрядных ламп, окон выводов энергии и разнообразных конструкционных диэлектрических элементов [10, 13-15].

Наиболее распространенными сырьевыми материалами, применяемыми для изготовления корундовой керамики, являются неметаллургические и металлургические глиноземы, которые состоят из двух основных кристаллических модификаций оксида алюминия: α - и γ -формы в различном соотношении. α -модификация является высокотемпературной и стабильной формой, переход в которую из γ -фазы происходит необратимо при температуре выше 1200 °С и сопровождается уменьшением объема материала на 14 % [1, 2]. Поэтому такое сырье перед применением подвергается дополнительной высокотемпературной обработке с целью перевода оксида алюминия в α -форму.

Одним из видов сырья с содержанием α -фазы, близким к 100 % мас., является электрокорунд, что делает его перспективным для применения в керамической технологии без предварительной термообработки [16, 17]. Известно [18, 19], что наиболее активны к спеканию частицы корунда, размер которых не превышает 5 мкм; у более крупных частиц активность к спеканию резко падает, и при размере зерна более 10 мкм она практически отсутствует. Исходя из этого, наибольший интерес среди промышленного сырья представляют микронные и субмикронные порошки электроплавленного корунда, в частности, микропорошки зернистости F1500 ($ds_{50} = 2,5$ мкм), F1200 ($ds_{50} = 3,0$ мкм), F1000 ($ds_{50} = 4,5$ мкм) и F600 ($ds_{50} = 9,3$ мкм).

Целью настоящей работы является разработка конструкционного керамического материала из промышленных микропорошков электрокорунда.

Экспериментальная часть

В качестве основного сырья при разработке керамического материала использовали порошки электрокорунда белого марки 25А зернистости F1500, F1200, F1000 и F600 производителя ООО «Технокерамика» (г. Обнинск), изготовленные в соответствии с СТО 68051575.001-2015. Типичные показатели гранулометрического состава и

содержания значимых для применения примесей этих порошков приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Гранулометрический состав микропорошков электрокорунда и содержание в них примесей

Table 1 – Granulometric composition of electrocorundum micropowders and their impurity content

Марка порошка	Содержание примесей, % мас.			Грансостав порошка, мкм		
	Na ₂ O	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	ds ₃	ds ₅₀	ds ₉₄
F600	0.3	0.03	0.01	6.6	9.4	3.7
F1000	0.2	0.1	0.03	10.0	4.5	1.0
F1200	0.2	0.1	0.03	7.0	3.0	1.0
F1500	0.3	0.08	0.025	5.0	2.0	0.8

Удельная поверхность ($S_{уд}$) порошков F600, F1000 и F1200, измеренная на приборе ПСХ-12, составляет 2350, 4507 и 7240 см²/г, соответственно. Значения $S_{уд}$ для электрокорунда F1500 превышают возможности корректного измерения на этом приборе и оцениваются величиной выше 10000 см²/г. Согласно результатам анализа порошков методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), морфология частиц порошков электрокорунда всех исследуемых марок обломочная с острыми краями.

Для получения спекающей добавки системы MgO-SiO₂-Al₂O₃, используемой в работе в качестве активатора спекания электрокорунда, использовали смесь порошков алюмомагниевого шпинели MgAl₂O₄ (АМШ) и электроплавленного муллита. АМШ применяли в виде продукта «CERALIT AMS78» фракции 0-0.045 мм (Р-ТО-023-2017, ООО «Кералит»), который представляет собой порошок, получаемый размолотом спеченной при 1700-1800 °С смеси избытка глинозема с оксидом магния. Фактически этот продукт является твердым раствором корунда в шпинели с содержанием оксида магния 21-23 % мас.

В качестве источника SiO₂, необходимого для образования системы MgO-SiO₂-Al₂O₃, был использован порошок муллита плавленого ПМЛП-3 (ТУ 1527-026-00188162-98), который является продуктом размолота закристаллизованного эвтектического расплава «муллит-корунд» и представляет собой твердый раствор корунда в муллите с избытком корунда. Согласно указанным техническим условиям, содержание оксида алюминия в нем составляет 72-77 % мас., диоксида кремния – 22-23 % мас., а регламентируемая примесь оксида железа не превышает 0.3 % мас.

Спекающую добавку готовили путем совместного сухого помола в шаровой мельнице порошков шпинели и муллита, взятых в массовом соотношении 1 : 4, до разной степени измельчения. Изучаемый диапазон удельной поверхности добавки составлял 1720-7000 см²/г. Смешивание ее с электрокорундом для получения шихты осуществляли многократной протиркой через мелкое сито.

В качестве технологического связующего применяли неионогенное поверхностно-активное вещество – продукт оксипропилирования этаноламидов кислот кокосового масла «Синтаид-5К» (ТУ 2483-064-05807977-2003, ООО «ТД Синтез-Ока»).

Пресс-порошок, используемый для формования заготовок образцов и изделий, готовили путем смешивания шихты со связующим в количестве 5.0-8.0 % с последующей протиркой через сито. Заготовки образцов материала в виде плиток размерами 100 x 100 x (10-15) мм формовали способом полусухого прессования в металлической пресс-форме на гидравлическом прессе при давлении 20-100 МПа.

Определение гранулометрического состава исходных сырьевых порошков проводили методом лазерной дифракции, и удельной поверхности – на приборе ПСХ-12М по методу Козени и Кармана, основанному на измерении их газопроницаемости. Изучение фазового состава и структуры объектов исследования осуществляли с использованием рентгенофазового и электронно-микроскопического методов анализа. Для определения плотности, пористости и водопоглощения керамических образцов применяли метод гидростатического взвешивания, прочности при статическом изгибе – метод трехточечного изгиба, микротвердости – метод вдавливания алмазных наконечников.

Результаты исследований и их обсуждение

Изучение спекания исследуемых порошков электрокорунда без активатора проводили на плитках, которые получали путем прессования порошка, увлажненного 2 % раствором синтаида, при давлении 50 МПа и последующего обжига при температуре 1650 °С. Установлено, что наибольшую активность к спеканию проявляет электрокорунд F1500, который обеспечивает получение керамики с высокой относительной плотностью – до 90 %. В ряду порошков F1500→F1200→F1000→F600 спекаемость заметно снижается, и в результате наблюдается соответственное уменьшение кажущейся плотности керамических образцов на их основе: 3.62→3.25→2.58→2.00 (г/см³) и относительной плотности: 90.0→81.3→64.5→50.0 (%). Вероятно, это связано с наименьшими размерами зерен у F1500, их максимальной удельной поверхностью, что обуславливает большее число межчастичных контактов, увеличивающих массоперенос вещества и способствующих консолидации керамического каркаса в процессе высокотемпературного нагрева. На основании полученных результатов все дальнейшие исследования проводили только с электрокорундом F1500.

С целью повышения плотности керамики из порошков F1500 была использована спекающая добавка состава АМШ: муллит = 1:4 с разной удельной поверхностью. Ее эффективность проверяли на образцах-плитках размерами 100 x 100 x 10 мм, которые изготавливали из смеси порошков электрокорунда F1500 и добавки в

количестве 5.0 % мас. путем прессования пресс-порошка при давлении 50 МПа и последующего обжига при 1600 °С.

Исследование плотности керамического материала в зависимости от дисперсности спекающей добавки показало, что образцы, полученные с добавкой, у которой $S_{уд.} = 1720 \text{ см}^2/\text{г}$, имеют плотность $\sim 3.70 \text{ г/см}^3$. Более тонкодисперсная добавка с $S_{уд.} = 3310 \text{ см}^2/\text{г}$ обеспечивает большую плотность керамики – 3.80-3.84 г/см³. Дальнейшее повышение удельной поверхности от 3500 вплоть до 7000 см²/г не приводит к увеличению плотности материала, что, вероятно, связано с достаточной реакционной способностью добавки уже при ее удельной поверхности 3200-3400 см²/г, обеспечивающей образование расплава и его равномерное распределение между зёрнами. В связи с этим, в дальнейшем для разработки керамики использовали спекающую добавку с $S_{уд.} = 3200-3400 \text{ см}^2/\text{г}$.

Изучение влияния количества спекающей добавки, вводимой в порошок электрокорунда F1500, на плотность и прочность материала проводили, варьируя ее массовое содержание в диапазоне 0.0-13.5 %. Шихту смачивали 2 % раствором синтаида 5К до влажности 7 % мас.; образцы-плитки размерами 100 x 100 x 10-15 мм прессовали при давлении 50 МПа и обжигали при температуре 1600 °С.

Установлено, что наибольшие показатели плотности и прочности керамики достигаются в близких интервалах значений содержания спекающей добавки: 4-10 % мас. и 6-10 % мас., соответственно (рис. 1).

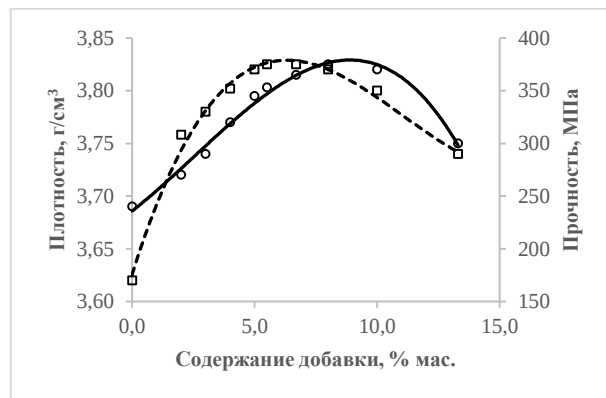


Рис. 1 – Зависимости плотности (пунктирная линия) и прочности при изгибе (сплошная линия) керамики на основе электрокорунда F1500 от содержания спекающей добавки в шихте

Fig. 1 – Dependences of density (dotted line) and bending strength (solid line) of ceramics based on electrocorundum F1500 on the content of sintering additive in the charge

При использовании добавки в количестве 4-10 % мас. различия в плотностях керамики не превышают 0.03 г/см³. Содержание ее менее 3.0 % недостаточно для эффективного активирования спекания электрокорунда и приводит к уменьшению плотности образцов относительно максимально

достигнутых значений. При повышении содержания добавки от 10 до 13,5 % мас. имеет место снижение плотности материала. Вероятно, это связано с образованием в процессе спекания керамики значительного количества новых фаз с меньшей плотностью, чем у электрокорунда.

Установлено, что характеры зависимостей плотности и прочности при изгибе керамики от содержания добавки коррелируют между собой. С повышением количества добавки в шихте до 7,0 % мас. прочность материала монотонно возрастает вследствие увеличения объема образующейся при спекании стеклофазы, способствующей консолидации твердых частиц, уплотнению и упрочнению керамики. Максимальные значения прочности 370 ± 30 МПа достигаются при содержании добавки 7-10 % мас. Дальнейшее повышение ее содержания от 10 до 13,5 % мас. приводит к снижению как плотности, так и прочности материала, что, вероятно, обусловлено большим количеством образующихся в нем новых фаз с меньшей плотностью и прочностью, чем у корунда.

В настоящей работе была изучена зависимость микротвердости керамики от содержания спекающей добавки. Исследование проводили на тех же образцах, на которых определяли прочность керамики (рис. 2).

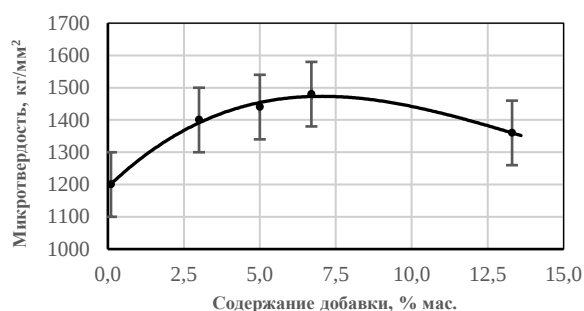


Рис. 2 – Зависимость микротвердости керамики от содержания спекающей добавки в шихте ($T_{\text{обж.}} = 1600^\circ\text{C}$)

Fig. 2 – Dependence of ceramic microhardness on the content of sintering additive in the charge ($T_{\text{roast.}} = 1600^\circ\text{C}$)

Установлено, что максимальные значения микротвердости 13,3-15,8 ГПа имеют образцы с 5-8 % мас. добавки, что соответствует наибольшим показателям плотности керамики в этом диапазоне (рис. 1). Более низкая микротвердость материала при содержании добавки < 5 % мас. и > 8 % мас. объясняется меньшей плотностью образцов, получаемых при таких количествах спекающей добавки. В первом случае это связано с нехваткой добавки для эффективного активирования процесса спекания, а во втором – с избытком образующихся в процессе спекания фаз с более низкой плотностью по сравнению с корундом.

Важным технологическим параметром, определяющим качество заготовки и, как следствие, свойства керамического материала, является давление прессования. Изучение влияния этого

параметра на плотность сырца проводили на образцах-плитках, которые получали прессованием в металлической пресс-форме с сечением рабочей полости 100×100 мм в диапазоне давлений 20-100 МПа.

Для исследования использовали шихту, состоящую из смеси порошка электрокорунда F1500 с содержанием спекающей добавки 5 % мас. Пресс-порошок готовили путем ее увлажнения 2 % раствором синтамида в количестве 7 % мас.

Графики зависимости плотности формовок от давления прессования в диапазоне 20-100 МПа показывают, что она повышается с увеличением прикладываемого усилия, однако ее рост в относительном измерении не столь значителен и в исследуемом интервале составляет не более 10 % (рис. 3).

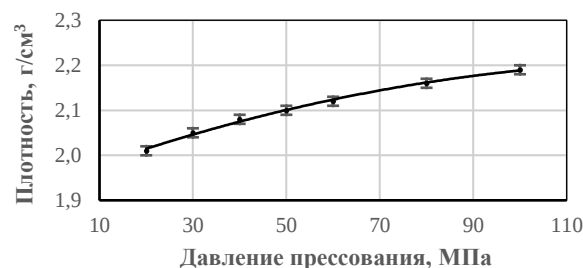


Рис. 3 – Зависимость плотности сырца от давления прессования пресс-порошка на основе электрокорунда с содержанием спекающей добавки 5 % мас.

Fig. 3 – Dependence of raw material density on pressing pressure of press powder based on electrocorundum with the content of sintering additive 5 wt%

Это обусловлено особенностями морфологии зерен электрокорунда осколочной формы, их высокой твердостью и прочностью, препятствующими уплотнению пресс-порошка даже при высоких давлениях. По той же причине в формовке начинают появляться перепрессовочные трещины при относительно низких давлениях – >70 МПа. Поэтому прессование смесей на основе порошков электрокорунда при давлениях, превышающих 70 МПа, становится проблематичным и нецелесообразным.

В области давлений 40-60 МПа вероятность проявления расслоенных дефектов минимальна. При давлениях менее 40 МПа плотность и прочность получаемых сырцов уменьшается, что создает риск их разрушения в процессе дальнейших операций. В связи с этим, 40-60 МПа сочли оптимальными значениями давлений прессования разработанного пресс-порошка для формования бездефектных заготовок.

Исследование зависимости плотности и прочности керамического материала на основе электрокорунда F1500 с 5 % мас. спекающей добавки от температуры обжига показало, что основное уплотнение материала происходит до температуры 1600°C (рис. 4). Дальнейшее ее повышение до 1700°C не приводит к заметному росту плотности.

При увеличении температуры обжига до 1600 °С одновременно с повышением плотности керамического материала происходит его упрочнение. Однако ближе к 1700 °С наблюдается снижение прочности, что может быть связано с ростом зерен корунда.

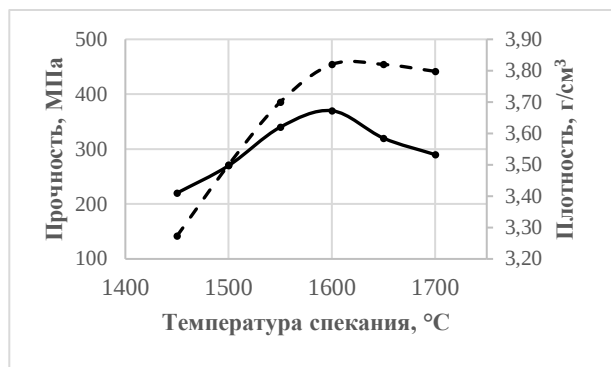


Рис. 4 – Зависимости плотности (пунктирная линия) и прочности при изгибе (сплошная линия) керамики из электрокорунда F1500 с 5 % мас. спекающей добавки от температуры обжига

Fig. 4 – Density (dashed line) and flexural strength (solid line) of F1500 electrocorundum ceramics with 5 wt% sintering additive as a function of firing temperature

Рентгенофазовый анализ керамики, спеченной при 1600 °С, показал наличие в ней основной ярко выраженной фазы α - Al_2O_3 и сопутствующих фаз: следов нефелина $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ и алюмомагниевого шпинели MgAl_2O_4 . Присутствие в материале нефелина в незначительном количестве обусловлено образованием его с участием примеси натрия в исходном электрокорунде F1500 и кремния в муллите в процессе спекания корунда. Следы MgAl_2O_4 являются вторичным продуктом кристаллизации стеклофазы, образующейся из спекающей добавки, и остатками непрореагировавшей алюмомагниевого шпинели.

Микроструктура скола материала является мелкокристаллической и состоит из зерен размерами до 10 мкм, которые плотно соединены между собой прослойками фаз субмикронной толщины, образующихся в процессе кристаллизации стеклофазы при охлаждении материала после обжига (рис. 5). Частицы корунда имеют высокую плотность с незначительным объемом мелких закрытых пор. Видно, что разрушение керамики носит транскристаллитный характер, свидетельствующий о высокой прочности керамики.

Закключение

Результаты исследований свидетельствуют о возможности получения конструкционной корундовой керамики с использованием в качестве сырья электрокорунда F1500, производимого в России в промышленных масштабах. Микropорошок, представляющий собой α - Al_2O_3 с небольшими примесями β - Al_2O_3 и состоящий из активных к спеканию микронных и субмикронных

частиц, не требует предварительной термообработки и измельчения.

Применение эффективной спекающей добавки в виде смеси алюмомагниевого шпинели и муллита способствует формированию мелкокристаллической структуры материала с высокими механическими свойствами и создает предпосылки для разработки ресурсосберегающей технологии получения керамики, в которой операция синтеза спекающей добавки совмещена с процессом обжига материала.

Высокие значения плотности 3,81-3,83 г/см³, прочности при изгибе 370±30 МПа и микротвердости 13,8-15,5 ГПа керамики обеспечиваются при введении в электрокорунд спекающей добавки в количестве 4-10 % мас., относительно низком давлении прессования ~50 МПа и умеренной температуре обжига 1600 °С. Достигнутые свойства определяют перспективу использования этого материала в изделиях, работающих в условиях повышенных ударных, истирающих, статических и динамических нагрузок.

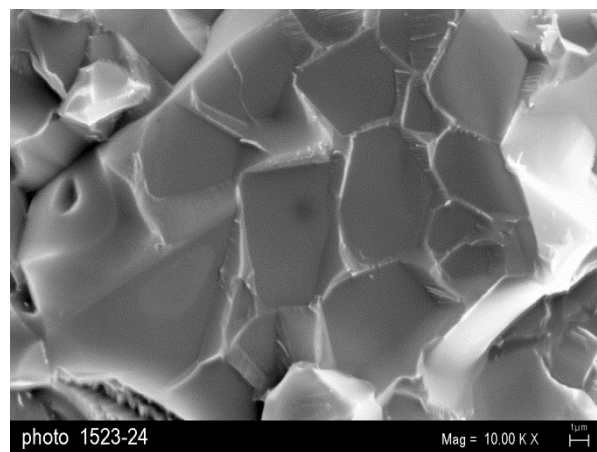


Рис. 5 – Микроструктура корундового материала, полученного на основе электрокорунда F1500 с 5 % мас. спекающей добавки

Fig. 5 – Microstructure of corundum material obtained on the basis of electrocorundum F1500 with 5 wt% sintering additive

Литература

1. В.Л. Балкевич, *Техническая керамика*. Стройиздат, Москва, 1984. 256 с.
2. Н.М. Павлушкин, *Спеченный корунд*. Государственное издательство литературы по строительству, архитектуре и строительным материалам, Москва, 1961. 208 с.
3. Е.С. Лукин, Н.А. Макаров, А.И. Козлов, Н.А. Попова, А.Л. Кутейникова, Е.В. Ануфриева, М.А. Варганян, И.А. Козлов, М.Н. Сафина, И.И. Нагаюк, Е.И. Горелик, И.Н. Сабурова, Э.Н. Муравьев, *Конструкции из композиционных материалов*. 1, 3-13 (2007).
4. В.М. Андреев, М.Н. Бронгулеева, С.Н. Дацко, Л.В. Яманова, *Материалы микроэлектронной техники*. Радио и связь, Москва, 1989. 352 с.
5. О.Д. Амелина, С.Б. Нестеров, *Инновационное машиностроение, Упрочняющие технологии и покрытия*. 3, 44-48 (2016).

6. С.Н. Свирская, А.А. Панич, Е.В. Карюков, А.В. Нагаенко, В.П. Попов, *Известия вузов. Северокавказский регион*. 4, 118-122 (2017).
7. А.М. Абызов, *Новые огнеупоры*. 2, 13-22 (2019).
8. Р.Я. Попильский, Ю.Ф. Панкратов, Н.М. Койфман, *Доклады АН СССР*. 155, 2, 326-329 (1964).
9. А.С. Толкачева, *Технология керамики для материалов электронной промышленности : учеб. пособие. В 2 ч. Часть 1*. Издательство Уральского университета, Екатеринбург, 2019. 124 с.
10. Е.С. Лукин, Н.Т. Андрианов, Н.Б. Мамаева, Н.А. Попова, Н.И. Здвизкова, Н.А. Назин, *Огнеупоры*. 5, 11-15 (1993).
11. И.С. Кайнарский, Э.В. Дегтярёва, И.Г. Орлова, *Корундовые огнеупоры и керамика*. Металлургия, Москва, 1981. 168 с.
12. С.В. Матрёнин, *Исследование свойств оксидной керамики на основе Al_2O_3 и ZrO_2 : учеб. пособие*. Издательство ТПУ, Томск, 2009. 15 с.
13. Е.С. Лукин, Н.А. Ануфриева, Н.А. Новые огнеупоры. 3, 155-160 (2008).
14. Е.И. Суздальцев, Д.В. Харитонов, А.А. Анашкина, *Новые огнеупоры*. 6, 45-49 (2010).
15. Е.И. Суздальцев, Д.В. Харитонов, А.А. Анашкина, *Новые огнеупоры*. 7, 38-44 (2010).
16. Аунг Чжо Мое. Автореф. дисс. канд. техн. наук, РХТУ им. Д.И.Менделеева, 2020. 19 с.
17. Аунг Чжо Мое, Е.С. Лукин, Н.А. Попова, *Новые огнеупоры*. 7, 20-23 (2018).
18. Н.Ф. Косенко, *Химия и химическая технология*. 54, 8, 3-16 (2011).
19. Е.С. Лукин, М.Б. Аяди, Н.А. Попова, *Огнеупоры и техническая керамика*. 10, 2-5 (1996).
- M.N. Safina, I.I. Nagayuk, E.I. Gorelik, I.N. Saburina, E.N. Muravyev, *Structures from composite materials*. 1, 3-13 (2007).
4. V.M. Andreev, M.N. Bronguleeva, S.N. Datsko, L.V. Yamanova, *Materials of microelectronic technology*. Radio and Communication, Moscow, 1989. 352 p.
5. O.D. Amelina, S.B. Nesterov, *Innovative mechanical engineering, Strengthening technologies and coatings*. 3, 44-48 (2016).
6. S.N. Svirskaya, A.A. Panich, E.V. Karyukov, A.V. Nagaenko, V.P. Popov, *Izvestiya vuzov. North Caucasus region*. 4, 118-122 (2017).
7. A.M. Abyzov, *New refractories*. 2, 13-22 (2019).
8. R.Y. Popilsky, Y.F. Pankratov, and N.M. Koifman, *Doklady AS USSR*. 155, 2, 326-329 (1964).
9. A.S. Tolкачева, *Technology of ceramics for materials of electronic industry: textbook. In 2 parts. Part 1*. Ural University Publishing House, Ekaterinburg, 2019. 124 p.
10. E.S. Lukin, N.T. Andrianov, N.B. Mamaeva, N.A. Popova, N.I. Zdvizhkova, N.A. Nazin, *Ogneupory*. 5, 11-15 (1993).
11. I.S. Kainarskii, E.V. Degtyaryova, I.G. Orlova, *Corundum refractories and ceramics*. Metallurgy, Moscow, 1981. 168 p.
12. S.V. Matryonin, *Investigation of properties of oxide ceramics based on Al_2O_3 and ZrO_2 : textbook*. TPU Publishing House, Tomsk, 2009. 15 p.
13. E.S. Lukin, N.A. Anufrieva, N.A. New refractories. 3, 155-160 (2008).
14. E.I. Suzdaltsev, D.V. Kharitonov, A.A. Anashkina, *Novye refractories*. 6, 45-49 (2010).
15. E.I. Suzdaltsev, D.V. Kharitonov, A.A. Anashkina, *New Refractories*. 7, 38-44 (2010).
16. Aung Jo Moe. Author's dissertation of candidate of technical sciences, D.I.Mendeleev Russian Chemical Technology University, 2020. 19 p.
17. Aung Jo Moye, E.S. Lukin, N.A. Popova, *New refractories*. 7, 20-23 (2018).
18. N.F. Kosenko, *Chemistry and Chemical Technology*. 54, 8, 3-16 (2011).
19. E.S. Lukin, M.B. Ayadi, N.A. Popova, *Refractories and technical ceramics*. 10, 2-5 (1996).

References

1. V.L. Balkevich, *Technical Ceramics*. Stroyizdat, Moscow, 1984. 256 p.
2. N.M. Pavlushkin, *Sintered Corundum*. State Publishing House of Literature on Construction, Architecture and Building Materials, Moscow, 1961. 208 p.
3. E.S. Lukin, N.A. Makarov, A.I. Kozlov, N.A. Popova, A.L. Kuteinikova, E.V. Anufrieva, M.A. Vartanyan, I.A. Kozlov,

© **Д. В. Харитонов** - д-р техн. наук, доцент, заместитель директора НПК по производственной деятельности – начальник цеха, АО «ОНПП «Технология» им. А.Г.Ромашина», Обнинск, Россия; Российский химико-технологический университет (РХТУ им. Д.И.Менделеева), Москва, Россия, i.atrokhin@bk.ru; **М. Ю. Русин** - д-р техн. наук, проф., директор НПК – главный конструктор, АО «ОНПП «Технология» им. А.Г.Ромашина»; **Н. Е. Шер** - инженер-технолог, АО «ОНПП «Технология» им. А.Г.Ромашина»; **М. К. Алексеев** - ведущий инженер-технолог, АО «ОНПП «Технология» им. А.Г.Ромашина»; **А. А. Анашкина** - канд. техн. наук, начальник лаборатории, АО «ОНПП «Технология» им. А.Г.Ромашина», Обнинск, Россия; РХТУ им. Д.И.Менделеева, Москва, Россия; **Г. И. Куликова** - канд. техн. наук, начальник сектора, АО «ОНПП «Технология» им. А.Г.Ромашина».

© **D. V. Kharitonov** - Doctor of Sciences (Technical Sci.), Associate Professor, Deputy Director of the scientific and production complex for production activities - Head of the workshop, JSC ONPP Technologiya named after A.G.Romashin, Obninsk, Russia; D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia (MUCTR), Moscow, Russia; i.atrokhin@bk.ru; **M. Yu. Rusin** – Doctor of Sciences (Technical Sci.), Professor, Director of the scientific and production complex - Chief designer, JSC ONPP Technologiya named after A.G.Romashin; **N. E. Sher** – Process Engineer, JSC ONPP Technologiya named after A.G.Romashin; **M. K. Alekseev** - Leading Process Engineer, JSC ONPP Technologiya named after A.G.Romashin; **A. A. Anashkina** – PhD (Technical Sci.), Head of the laboratory, JSC ONPP Technologiya named after A.G.Romashin, Obninsk, Russia; MUCTR, Moscow, Russia; **G. I. Kulikova** – PhD (Technical Sci.), Head of the sector, JSC ONPP Technologiya named after A.G.Romashin.