

Научная статья

УДК 666.762.14

DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-1-119-127

**ИЗУЧЕНИЕ ГАБИТУСА КРИСТАЛЛОВ МУЛЛИТА  
В КОМПОЗИЦИОННОЙ КЕРАМИКЕ «МУЛЛИТ–ДИОКСИД ЦИРКОНИЯ»***В.Г. Максимов<sup>1</sup>, В.Г. Бабашов<sup>1</sup>, Н.М. Варрик<sup>1</sup>, Г.Ю. Люлюкина<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

**Аннотация.** *Представлены результаты изучения особенностей микроструктуры керамического композиционного материала «муллит–диоксид циркония». Подтверждено, что кристаллы муллита, как и в традиционных муллитовых керамиках, имеют габитус удлиненной четырехгранной призмы. Кристаллы диоксида циркония обеспечивают упрочнение материала по механизму разворота трещины на границу раздела, что в сочетании со специфическим габитусом кристаллов основной фазы приводит к образованию характерной высокоразвитой поверхности излома и повышению стойкости материала к растрескиванию.*

**Ключевые слова:** *керамический композиционный материал, золь-гель метод, муллит, диоксид циркония, кристаллическая структура, габитус*

**Для цитирования:** Максимов В.Г., Бабашов В.Г., Варрик Н.М., Люлюкина Г.Ю. Изучение габитуса кристаллов муллита в композиционной керамике «муллит–диоксид циркония» // Труды ВИАМ. 2023. № 1 (119). Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-1-119-127.

Scientific article

**STUDY OF THE HABITUS OF MULLITE CRYSTALS  
IN COMPOSITE CERAMICS «MULLITE–ZIRCONIUM DIOXIDE»***V.G. Maksimov<sup>1</sup>, V.G. Babashov<sup>1</sup>, N.M. Varrik<sup>1</sup>, G.Yu. Lyulyukina<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

**Abstract.** *Presents the results of studying the microstructure features of the ceramic composite material «mullite–zirconium dioxide». It is confirmed that the crystals of mullite, as in traditional mullite ceramics, have the habit of a long four-sided prism. Zirconium dioxide crystals provide hardening of the material by the mechanism of turning the crack to the interface, which, in combination with the specific habitus of the crystals of the main phase, leads to the formation of a characteristic highly developed fracture surface and improves the resistance of the material to cracking.*

**Keywords:** *ceramic composite material, sol-gel method, mullite, zirconium dioxide, crystal structure, habitus*

**For citation:** Maksimov V.G., Babashov V.G., Varrik N.M., Lyulyukina G.Yu. Study of the habitus of mullite crystals in composite ceramics «mullite–zirconium dioxide». *Trudy VIAM*, 2023, no. 1 (119), paper no. 10. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-1-119-127.

**Введение**

Развитие перспективных технологий обуславливает потребность в новых материалах, обладающих повышенными механическими и теплофизическими свойствами [1, 2]. В частности, производство керамических и металлических деталей современных

объектов техники в горячих цехах требует соответствующей технологической оснастки из керамических огнеупоров, способных выдерживать многоцикловые термические нагрузки. При этом процесс ее получения должен быть достаточно недорогим и на основе доступного сырья.

Наиболее высокими характеристиками среди широкого круга огнеупорных материалов обладают корундовые и муллитовые огнеупоры. На их основе разработан целый ряд материалов, предназначенных для различных отраслей промышленности – химической, фарфоровой, строительной и металлургической [3–8].

Следует отметить, что свойства огнеупоров могут варьироваться в зависимости от исходных компонентов синтеза и параметров технологического процесса их получения. В частности, керамические композиционные огнеупорные материалы благодаря введению модифицирующих добавок обладают высокими спекаемостью и прочностью за счет образования структуры, содержащей различные фазы, такие как диоксид циркония, периклазохромит и циркон, в результате чего расширяется интервал спекания, снижается пористость и повышаются твердость и механическая прочность материалов.

Муллит является одним из наиболее широко применяемых керамических материалов. Благодаря своим физическим свойствам, хорошей прозрачности для света в среднем инфракрасном диапазоне и высокой стойкости к ползучести он приобретает все большее значение при изготовлении электронных, оптических и высокотемпературных конструкций. Классическое применение муллита включает огнеупоры в металлургической промышленности для изготовления заглушек электропечей, емкостей для горячего металла и для облицовки индукционных печей низкой частоты. В стекольной промышленности такие огнеупоры используют в верхней части резервуара, в котором плавится стекло, а также при изготовлении вытяжных камер для горячих газов. Муллит часто применяют в качестве оснастки для обжига керамических изделий, а также для облицовки высокотемпературных реакторов. В течение последнего десятилетия спектр фактического или потенциального применения муллита также включает его использование в качестве матричного материала для разработки композиционных материалов и защитных покрытий.

На прочность муллита при изгибе и его сопротивление ползучести при повышенных температурах значительно влияет наличие включений стекловидной фазы по границам зерна муллита. При отсутствии стеклофазы поликристаллический муллит при нагреве до 1500 °С сохраняет 90 % от прочности при комнатной температуре. Обеспечения высокой температурной стабильности можно достичь в том случае, когда граница зерен муллита будет свободна от стекла.

При получении муллитовой керамики золь-гель методом коллоидные частицы или молекулы в золе под воздействием внешних факторов (например, при изменении pH) объединяются в непрерывную сеть, называемую гелем. Данный метод позволяет получить однородный и реакционноспособный гель, который может быть спечен при низкой температуре и, следовательно, иметь однородную субмикронную микроструктуру.

Использование различных режимов термической обработки огнеупорной муллитосодержащей керамики приводит к получению различной кристаллической структуры, от которой зависит ее способность к релаксации термических напряжений при перепадах температур. При регулировании составов исходных прекурсоров и режимов синтеза можно добиться структуры материала с оптимальным сочетанием кристаллических и аморфных фаз, что позволяет получить для материала требуемый комплекс эксплуатационных характеристик [9–16].

В частности, установлено, что введение электрокорунда и циркона в муллитокордиеритовые керамические массы способствует существенному повышению их прочностных характеристик при незначительном увеличении температурного коэффициента линейного расширения материала [9].

В различных научно-технических источниках представлено влияние рН среды на получение муллита золь-гель методом [10], а также режимов спекания и скоростей нагрева [11, 12] на его кинетику кристаллизации.

В настоящее время материаловедами достаточно подробно изучены особенности микроструктуры муллита, образующегося при воздействии высоких температур в процессе получения муллитосодержащей керамики различными методами. Золь-гель метод представляет собой синтетический способ, который обеспечивает хорошее смешивание или однородность исходных материалов на наноуровне, что приводит к однородному распределению компонентов. Вследствие высокой степени однородности прекурсора температура, необходимая для образования муллита, относительно низкая (от ~1150 до 1350 °С). В научно-технической литературе также отмечаются следующие формы кристаллов муллита: призматические образования [11], равноосные структуры [12], кристаллы в форме игольчатых ежей [13], игольчатые и столбчатые структуры [14–16]. При этом утверждается, что муллит игольчатой морфологии способствует получению керамики с малой пористостью, низкой линейной усадкой и повышенной прочностью.

Цель данной работы – изучение особенностей микроструктуры керамического композиционного материала «муллит–диоксид циркония ( $ZrO_2$ )», полученного из композиционного порошка методом полусухого прессования, и их потенциального влияния на распространение трещин в материале.

### Материалы и методы

Для эксперимента изготовлены образцы из керамического композиционного материала, содержащего муллитовую матрицу и частично стабилизированный диоксид циркония в количестве 10 % (по массе) в качестве второй фазы. Исходный муллитовый порошок получен золь-гель методом с введением диоксида циркония в виде микропорошка в исходный раствор перед его осаждением. Формование заготовки выполняли методом полусухого прессования. Исследование фазового состава полученных экспериментальных образцов проводили на рентгенофазовом анализаторе с компьютерной приставкой, а микроструктуру поверхности скола образцов и травленные микрошлифы изучали методами сканирующей электронной микроскопии (СЭМ).

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

### Эксперимент

Порошки для получения исследуемого материала синтезировали методом осаждения с использованием (в качестве исходных компонентов) растворимых солей алюминия и частично гидролизованного тетраэтоксисилана с добавкой предварительно полученного микропорошка частично стабилизированного диоксида циркония. Осаждение производили аммиаком в виде водного раствора [17, 18].

После обжига и помола порошка-полуфабриката проведены полусухое прессование заготовки и ее обжиг [19]. Затем спеченную заготовку разрезали алмазным кругом на пластины толщиной 4–5 мм и шлифовали с помощью корундового микропорошка М7.

Традиционный метод изучения микроструктур путем исследования полированных шлифов при рассмотрении неокрашенных керамических материалов, состоящих из прозрачных или полупрозрачных кристаллов, затруднен из-за низкого контраста видимых структур. Использование традиционных методов контрастирования аншлифов (таких как травление границ зерен и избирательное окрашивание) при исследовании не склонных к адсорбции прозрачных материалов также нецелесообразно, поскольку не дает существенного увеличения контраста. Наиболее эффективными в таком случае становятся методы, превращающие структуру в рельеф поверхности: фрактография излома

(применяется для хрупких материалов, на изломе остается «отпечаток» структуры) и глубокое травление (при наличии подходящих высокоизбирательных травителей).

Таким образом, для микроскопических исследований использовали шлифы, подвергнутые глубокому травлению после тонкой шлифовки корундовым микропорошком. Ввиду того, что в данном случае травление вели на глубину, существенно превышающую размер зерна, полировку не проводили. Для травления, учитывая аномально высокую стойкость муллита к фторводородной кислоте и нестойкость к ней всех модификаций  $ZrO_2$ , в качестве травящего реагента выбрана данная кислота. Исходя из узости щелей, заполненных в данном материале диоксидом циркония, и необходимости вскрытия поверхности на глубину, существенно больше, чем размер типичного муллитового кристалла, экспериментальным путем подобран режим травления шлифов – в 40%-ной фторводородной кислоте в течение 16 ч.

### Результаты и обсуждение

Фазовый состав экспериментального образца «муллит–10 % (по массе)  $ZrO_2$ », полученного золь-гель методом с последующим обжигом и прессованием порошковой смеси, представлен на рис. 1. Из данных диаграммы видно, что керамический композиционный материал содержит фазы муллита, диоксида циркония и отдельные фазы оксида алюминия.

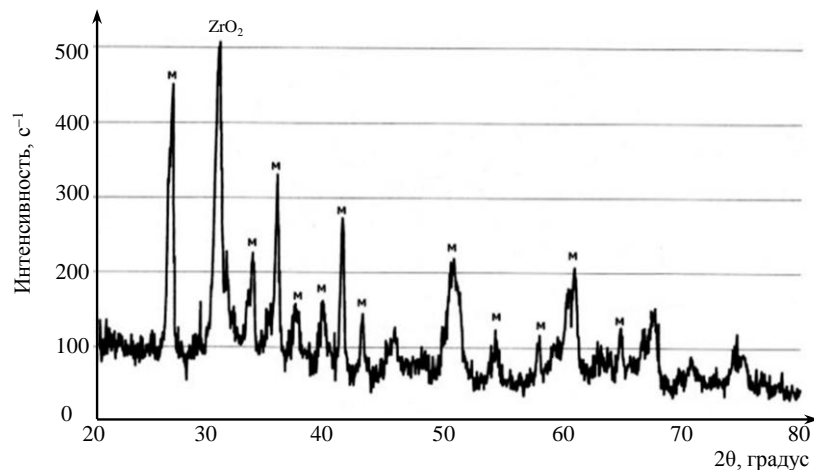


Рис. 1. Диаграмма экспериментального образца «муллит– $ZrO_2$ » (где М – муллит), полученная на рентгенофазовом анализаторе

Общее содержание всех обнаруживаемых методом рентгенофазового анализа фаз диоксида циркония, определенное при сравнении интенсивности рефлексов с эталоном, составило  $\sim(4,5\pm 1)$  % (по массе). При этом общее содержание  $ZrO_2$ , определенное рентгенофлуоресцентным методом, соответствовало составу по синтезу с точностью до погрешности метода.

Разницу в содержании диоксида циркония в композиционной керамике можно объяснить тем, что существенная его часть находится в виде не фиксируемых при рентгенофазовом анализе тонких пленок на поверхностях зерен основной фазы муллита.

В работе [20] показано, что микроструктуру керамики «муллит–диоксид циркония» исследовали путем наблюдения изломов методами СЭМ и оптической микроскопии. На рис. 2 представлена поверхность излома образца «муллит– $ZrO_2$ ». На изломах можно наблюдать характерную для собирательной рекристаллизации бимодальную структуру, состоящую из крупных, весьма сильно вытянутых кристаллов муллита

и заполняющей пространство между ними мелкозернистой массы аналогичных по морфологии муллитовых кристаллов. Диоксид циркония как отдельная фаза наблюдается в виде достаточно редких мелких включений, что позволяет, опираясь на данные рентгенофазового анализа, которые свидетельствуют о присутствии существенного количества указанного соединения в рентгеноаморфном виде, сделать вывод о том, что данный оксид распределен по границам зерен муллитовых кристаллов. Поскольку практически все выходящие на скол кристаллы имели резко выраженную вытянутость и во многих случаях хотя бы одну острую грань, идущую вдоль кристалла, то можно констатировать следующее: структура состоит из пластинчатых кристаллов, расколотых при разрушении образца. В данном случае следует ориентироваться на то, что при сечении объемного образца плоскостью наблюдаемая структура имеет размерность  $N - 1$ , т. е. срезы стержней выглядят как изотропные частицы, а срезы пластин – как стержни. Данный подход при анализе объемных структур по их изображениям на плоских срезах изложен, например, в классической работе [21].

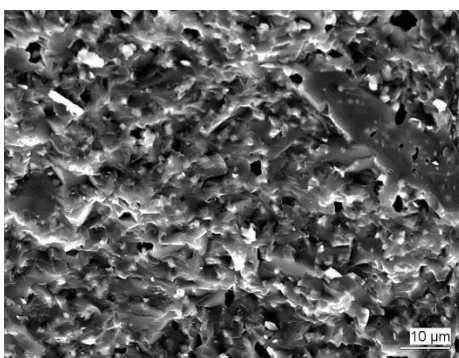


Рис. 2. Поверхность излома экспериментального образца «муллит– $ZrO_2$ »

Однако при учете того, что кристаллы муллита независимо от способа выращивания наблюдались в виде призматических стержней (это приведено как в классических руководствах по технологии керамических материалов, так и в современных работах по муллитосодержащим керамикам и композитам), принято решение – уточнить истинный габитус кристаллов в данном материале более прямыми методами.

*Микроструктура высокомуллитовой керамики,  
наблюдаемая на шлифах, подвергнутых глубокому травлению*

На изображениях поверхности протравленных шлифов, полученных методом СЭМ, можно наблюдать «лес» из переплетающихся в трех плоскостях кристаллов муллита, имеющих форму вытянутых четырехгранных призм с наиболее типичным соотношением ширины и длины как 1:(5–8) (рис. 3).

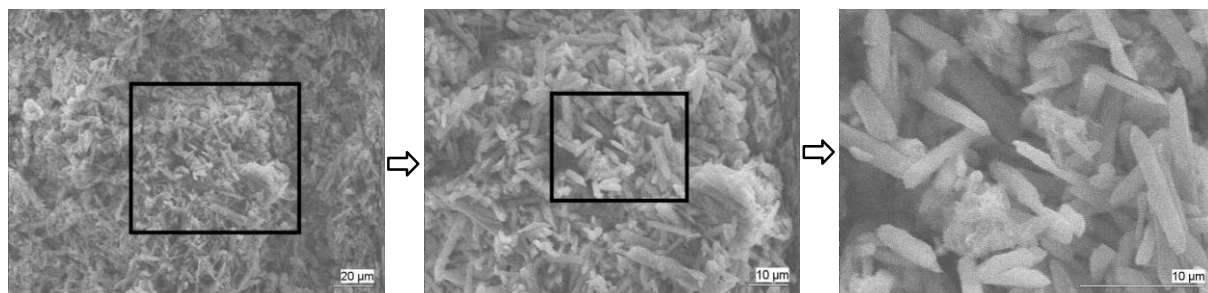


Рис. 3. Изображения поверхности протравленного шлифа экспериментального образца из материала «муллит– $ZrO_2$ » с разным увеличением (СЭМ)

С учетом того, что на полученных в результате травления структурах отсутствуют не только межфазные пленки диоксида циркония, но и некоторая часть мелкокристаллической цементирующей массы, можно сделать вывод о том, что в процессе травления наблюдается растворение не только  $ZrO_2$ , но и слоя некоторой толщины на поверхности муллитовых кристаллов. Однако характер наблюдаемой структуры, в которой муллитовые стержни заполняют значительную часть объема материала, свидетельствует о разных скоростях травления муллита и высокоциркониевой цементирующей массы, отличающихся в десятки и даже в сотни раз. Дополнительным подтверждением того, что использованные параметры травления обеспечивали низкую скорость растворения муллитовой фазы, является факт образования на поверхности подвергнутых травлению образцов большого объема свободных муллитовых игл. Таким образом, при продвижении фронта травления по граничной фазе на глубину  $\sim 1$  мм (1000 мкм) разрушение поверхности муллитовых кристаллов не превышало 1–2 мкм, что подтверждает вывод о высокой селективности использованного травителя.

### *Анализ полученных изображений*

При сравнении изображений микроструктуры, полученных двумя использованными методами, возникла необходимость объяснения существенной разницы между наблюдаемой на изломе «псевдопластинчатой» структурой и трехмерным каркасом из игольчатых кристаллов, видимым на протравленном материале.

Вероятность того, что при травлении вследствие резкой анизотропии его скорости происходит разрезка пластин на пакеты призм, отвергнута на следующем основании: наблюдаемые призматические иглы муллита практически всегда развернуты под большими углами к соседям; а если еще учитывать, что рассматривались только те кристаллы, которые сохранили связь с материалом и, следовательно, свое первоначальное положение, то «нарезанные» иглы должны присутствовать тогда в виде параллельных пакетов.

Исходя из изложенного ранее, сделан вывод, что истинный габитус кристаллов муллита в данном материале – это удлиненная четырехгранная призма, а видимая на изломах «пластинчатоподобная» структура образовалась в процессе межзеренного (строго по границам зерен) разрушения материала. При этом ограниченные боковые поверхности удлиненных призматических кристаллов создают визуальное впечатление выходящих на поверхность разрушения сколотых пластин.

Подобное разрушение с высокой вероятностью возникает в оксидных материалах, содержащих диоксид циркония, вследствие низкой энергии взаимодействия поверхности зерен  $ZrO_2$  как с другими фазами, так и с соседями того же состава, что обеспечивает типичный для таких материалов межзеренный характер разрушения.

При учете формы и расположения муллитовых зерен в объеме материала, обеспеченного добавкой диоксида циркония, межзеренное разрушение сопровождается эффективным ветвлением трещин, а также резко увеличивает площадь скола и, как следствие, энергию разрушения. Данный вывод подтверждается чрезвычайно высокой устойчивостью исследуемого материала к технологическим сколам при механической обработке в сравнении с керамиками на основе оксида магния и немодифицированного оксида алюминия.

### **Заключения**

Проведено изучение формы кристаллов муллита, образующихся при воздействии высоких температур в процессе получения композиционной керамики «муллит– $ZrO_2$ » и дана оценка влияния габитуса кристаллов муллита на ее свойства. В результате проведенных исследований подтверждено, что в керамических материалах на основе муллита, модифицированного диоксидом циркония, кристаллы муллита, как и в традиционных муллитовых керамиках, имеют габитус удлиненной четырехгранной призмы.

При этом кристаллическая структура композиционного материала была бимодальной и состояла из крупных вытянутых кристаллов муллита и заполняющей пространство между ними мелкозернистой массы муллитовых кристаллов аналогичной формы. Диоксид циркония как отдельная фаза наблюдался в виде редких мелких включений по границам зерен муллитовых кристаллов. Поскольку практически все выходящие на скол кристаллы имели резко выраженную вытянутость и в большинстве случаев хотя бы одну острую грань, идущую вдоль кристалла, сделан вывод о наличии структуры, состоящей из пластинчатых кристаллов, расколотых при разрушении образца.

Присутствие диоксида циркония в составе материала обеспечивает весьма эффективное его упрочнение по механизму разворота трещины на границу раздела, что в сочетании со специфическим габитусом кристаллов основной фазы приводит к образованию характерной высокоразвитой поверхности излома и явному улучшению стойкости материала к растрескиванию.

Для получения упрочняющего эффекта путем ослабления межфазных границ в муллитовой керамике, при принятии мер против образования самостоятельной фазы  $ZrO_2$ , достаточно введения равномерно распределенной добавки диоксида циркония в количестве 5 % (по массе), что при высокой стоимости качественных цирконийсодержащих полуфабрикатов является очень существенным фактором.

#### Список источников

1. Каблов Е.Н., Евгенов А.Г., Петрушин Н.В., Базылева О.А., Мазалов И.С., Дынин Н.В. Материалы нового поколения и цифровые аддитивные технологии производства ресурсных деталей ФГУП «ВИАМ». Часть 3. Адаптация и создание материалов // *Электротехнология*. 2022. № 4. С. 15–25.
2. Каблов Е.Н. Маркетинг материаловедения, авиастроения и промышленности: настоящее и будущее // *Директор по маркетингу и сбыту*. 2017. № 5–6. С. 40–44.
3. Попов Р.Ю., Дятлова Е.М., Сергиевич О.А., Погребенков В.М. Влияние модифицирующих огнеупорных и высокопрочных добавок на физико-технические характеристики муллитокордиеритовой керамики // *Труды Кольского научного центра РАН*. 2018. № 2-2. С. 889–894. DOI: 10.25702/KSC.2307-5252.2018.9.1.889-894.
4. Sadik C., El Amranib I.-E., Albizane A. Recent advances in silica-alumina refractory: A review // *Journal of Asian Ceramic Societies*. 2014. Vol. 2. P. 83–96.
5. Лебедева Ю.Е., Щеголева Н.Е., Воронов В.А., Солнцев С.С. Керамические материалы на основе оксидов алюминия и циркония, полученные золь-гель методом // *Труды ВИАМ*. 2021. № 4 (98). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.07.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-4-61-73.
6. Лебедева Ю.Е., Щеголева Н.Е., Воронов В.А., Ковалева В.С., Чайникова А.С. Влияние модифицирующей добавки оксида циркония на свойства керамических материалов системы  $Y_2O_3-Al_2O_3-SiO_2$ , полученных золь-гель методом // *Труды ВИАМ*. 2021. № 10 (104). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.07.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-10-67-78.
7. Щеголева Н.Е., Чайникова А.С., Орлова Л.А. Исследование процесса спекания при получении стеклокерамики на основе стронцийалюмосиликатного стекла методом полусухого прессования // *Авиационные материалы и технологии*. 2018. № 4 (53). С. 55–62. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-4-55-62.
8. Лавров А.В., Яковлев Н.О., Ерасов В.С. К вопросу разрушения керамики при воздействии высокоскоростного индентора // *Авиационные материалы и технологии*. 2018. № 2 (51). С. 88–94. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-88-94.
9. Дятлова Е.М., Миненкова Г.Я., Колонтаева Т.В. Интенсификация спекания муллитокордиеритовой керамики с применением минерализаторов // *Стекло и керамика*. 2000. № 12. С. 21.
10. Osawa C.C., Bertran C.A. Mullite Formation from Mixtures of Alumina and Silica Sols: Mechanism and pH Effect // *Journal of the Brazilian Chemical Society*. 2005. Vol. 16. No. 2. P. 251–258.

11. Седмале Г., Граце Л., Залите И. и др. Микроструктура и свойства муллит– $ZrO_2(Y_2O_3)$ – $Si_3N_4$ -керамики, спеченной различными методами // Новые огнеупоры. 2018. № 7. С. 49–54.
12. Orgaz F. Densification and crystallization kinetics of mullite diphasic gels from non-isothermal dilatometry experiments // Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio. 2008. Vol. 47. No. 6. P. 358–365.
13. Chen Yi, Lu Z., Wan W. et al. Effect of Urchin-Like Mullite Whiskers on the High-Temperature Performance of Porous  $SiO_2$ -Based Ceramic Molds // Materials. 2019. No. 12. Art. 1181. DOI: 10.3390/ma12071181.
14. Barrientos-Hernandez F.R., Prerez-Labra M., Lobo-Guerrero A. et al. Effect of Particle Size and Sintering Temperature on the Formation of Mullite from Kyanite and Aluminum Mixtures // Advances in Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 2021. Art. 6678297. DOI: 10.1155/2021/6678297.
15. Плетнев П.М., Тюлькин Д.С. Физико-химические принципы получения огнеупоров для производства технической керамики // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2016. № 1. С. 21–26.
16. Lian J., Zhu B., Li X., Chen P. In-situ Synthesis of Column-like Mullite and SiC Whiskers and its Effect on  $Al_2O_3$ –SiC–C Refractory Properties // Journal of the Chinese Ceramic Society. 2016. Vol. 44. No. 9. URL: <http://www.gxyb.cbpt.cnki.net> (дата обращения: 01.07.2022). DOI: 10.14062/j.issn.0454-5648.2016.09.21.
17. Способ получения порошка керамического композиционного материала: пат. 2292320 Рос. Федерация; заявл. 15.08.05; опубл. 27.01.07.
18. Варрик Н.М., Максимов В.Г. Синтез исходного порошка для получения муллитовой керамики, модифицированной диоксидом циркония // Огнеупоры и техническая керамика. 2021. № 5–6. С. 3.
19. Способ получения керамического изделия: пат. 2486159 Рос. Федерация; заявл. 22.06.11; опубл. 27.06.13.
20. Бабашов В.Г., Максимов В.Г., Варрик Н.М. К вопросу о кристаллизации муллита в керамическом композиционном материале // Стекло и керамика. 2021. № 12. С. 9–14.
21. Гуляев А.П., Гуляев А.А. Металловедение: учеб. для вузов. Изд. 7-е, перераб. и доп. М.: Альянс, 2011. 644 с.

### References

1. Kablov E.N., Evgenov A.G., Petrushin N.V., Bazyleva O.A., Mazalov I.S., Dynin N.V. New generation materials and digital additive technologies for the production of resource parts FSUE "VIAM". Part 3. Adaptation and creation of materials. *Elektrometallurgiya*, 2022, no. 4, pp. 15–25.
2. Kablov E.N. Marketing of materials science, aircraft building and industry: present and future. *Direktor po marketingu i sbytu*, 2017, no. 5–6, pp. 40–44.
3. Popov R.Yu., Dyatlova E.M., Sergievich O.A., Pogrebenkov V.M. Influence of modifying refractory and high-strength additives on the physical and technical characteristics of mullite-cordierite ceramics. *Trudy Kolskogo nauchnogo tsentra RAN*, 2018, no. 2-2, pp. 889–894. DOI: 10.25702/KSC.2307-5252.2018.9.1.889-894.
4. Sadik C., El Amranib I.-E., Albizane A. Recent advances in silica-alumina refractory: A review. *Journal of Asian Ceramic Societies*, 2014, vol. 2, pp. 83–96.
5. Lebedeva Yu.E., Shchegoleva N.E., Voronov V.A., Solntcev S.S.  $Al_2O_3$  and  $ZrO_2$  ceramic materials obtained by sol-gel method. *Trudy VIAM*, 2021, no. 4 (98), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 1, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-4-61-73.
6. Lebedeva Yu.E., Shchegoleva N.E., Voronov V.A., Kovaleva V.S., Chainikova A.S. Effect of modifying zirconium oxide additive on the properties of ceramic materials of the  $Y_2O_3$ – $Al_2O_3$ – $SiO_2$  system obtained by the sol-gel method. *Trudy VIAM*, 2021, no. 10 (104), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 07, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-10-67-78.
7. Shchegoleva N.E., Chainikova A.S., Orlova L.A. Sintering process analysis in the manufacture of strontiumalumi-nosilicate glass ceramics by power-pressed method. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 4 (53), pp. 55–62. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-4-55-62.

8. Lavrov A.V., Yakovlev N.O., Erasov V.S. Destruction of ceramic materials under the influence of high-speed indenter. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 2 (51), pp. 88–94. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-88-94.
9. Dyatlova E.M., Minenkova G.Ya., Kolontaeva T.V. Intensification of sintering of mullite-cordierite ceramics using mineralizers. *Glass and Ceramics*, 2000, no. 12, p. 21.
10. Osawa C.C., Bertran C.A. Mullite Formation from Mixtures of Alumina and Silica Sols: Mechanism and pH Effect. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 2005, vol. 16, no. 2, pp. 251–258.
11. Sedmale G., Grace L., Zalite I. et al. Microstructure and properties of mullite–ZrO<sub>2</sub>(Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)–Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ceramics sintered by various methods. *Novye ognepory*, 2018, no. 7, pp. 49–54.
12. Orgaz F. Densification and crystallization kinetics of mullite diphasic gels from non-isothermal dilatometry experiments. *Boletin de la Sociedad Espanola de Ceramica y Vidrio*, 2008, vol. 47, no. 6, pp. 358–365.
13. Chen Yi, Lu Z., Wan W. et al. Effect of Urchin-Like Mullite Whiskers on the High-Temperature Performance of Porous SiO<sub>2</sub>-Based Ceramic Molds. *Materials*, 2019, no. 12, art. 1181. DOI: 10.3390/ma12071181.
14. Barrientos-Hernandez F.R., Prerez-Labra M., Lobo-Guerrero A. et al. Effect of Particle Size and Sintering Temperature on the Formation of Mullite from Kyanite and Aluminum Mixtures. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2021, vol. 2021, art. 6678297. DOI: 10.1155/2021/6678297.
15. Pletnev P.M., Tyulkin D.S. Physical and chemical principles of obtaining refractories for the production of technical ceramics. *Bulletin of the Siberian State University of Communications*, 2016, no. 1, pp. 21–26.
16. Lian J., Zhu B., Li X., Chen P. In-situ Synthesis of Column-like Mullite and SiC Whiskers and its Effect on Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–SiC–C Refractory Properties. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2016, vol. 44, no. 9. Available at: <http://www.gxyb.cbpt.cnki.net> (accessed: July 01, 2022). DOI: 10.14062/j.issn.0454-5648.2016.09.21.
17. *Method for obtaining a powder of a ceramic composite material*: pat. 2292320 Rus. Federation; filed 15.08.05; publ. 27.01.07.
18. Varrik N.M., Maksimov V.G. Synthesis of the initial powder for obtaining mullite ceramics modified with zirconium dioxide. *Ogneupory i tekhnicheskaya keramika*, 2021, no. 5–6, p. 3.
19. *Method for producing a ceramic product*: pat. 2486159 Rus. Federation; filed 22.06.11; publ. 27.06.13.
20. Babashov V.G., Maksimov V.G., Varrik N.M. On the question of mullite crystallization in a ceramic composite material. *Steklo i keramika*, 2021, no. 12, pp. 9–14.
21. Gulyaev A.P., Gulyaev A.A. *Metallurgy*: textbook for universities. Ed. 7th, rev. and add. Moscow: Alliance, 2011, 644 p.

#### Информация об авторах

**Максимов Вячеслав Геннадьевич**, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Бабашов Владимир Георгиевич**, начальник лаборатории, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Варрик Наталья Мироновна**, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Люлюкина Галина Юрьевна**, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

#### Information about the authors

**Vyacheslav G. Maksimov**, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Vladimir G. Babashov**, Head of Laboratory, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Natalia M. Varrik**, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Galina Yu. Lyulyukina**, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

Статья поступила в редакцию 18.07.2022; одобрена и принята к публикации после рецензирования 31.08.2022.

The article was submitted 18.07.2022; approved and accepted for publication after reviewing 31.08.2022.