

УДК 66.017

А.В. Соколов<sup>1</sup>, Г.И. Дейнега<sup>1</sup>, Н.А. Кузьмина<sup>1</sup>, И.Г. Кузьмина<sup>1</sup>

**СТРУКТУРНО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА  
КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ  
ЧАСТИЧНО СТАБИЛИЗИРОВАННОГО ДИОКСИДА ЦИРКОНИЯ,  
ДОПИРОВАННОГО АЛЮМОМАГНЕЗИАЛЬНОЙ ШПИНЕЛЬЮ**

DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-3-78-85

*Керамические материалы на основе диоксида циркония ( $ZrO_2$ ) – это высокотехнологичное сырье для изделий конструкционного назначения, применяемых в разных областях техники. Благодаря своим уникальным прочностным характеристикам, химической стойкости и огнеупорности  $ZrO_2$  нашел широкое применение в различных отраслях промышленности. Однако недостатком циркониевой керамики является низкое сопротивление термическому удару, что ограничивает его применение в изделиях, работающих в условиях частой смены температур. Рассмотрена возможность увеличения стойкости к термическому удару керамики на основе диоксида циркония при введении добавки алюмомагнезимальной шпинели ( $MgAl_2O_4$ ).*

**Ключевые слова:** диоксид циркония, алюмомагнезимальная шпинель, композит, термостойкая керамика, прочная керамика, трансформационное упрочнение, полиморфизм.

A. V. Sokolov<sup>1</sup>, G. I. Deynaga<sup>1</sup>, N. A. Kuzmina<sup>1</sup>, I. G. Kuzmina<sup>1</sup>

**STRUCTURAL AND MECHANICAL PROPERTIES  
OF A COMPOSITE MATERIAL BASED ON PARTIALLY STABILIZED  
ZIRCONIUM DIOXIDE DOPED WITH MAGNESIUM ALUMINATE SPINEL**

*Ceramic materials based on zirconia ( $ZrO_2$ ) are high-tech raw materials for structural products used in various fields of technology.  $ZrO_2$  has a wide range of application due to its unique strength characteristics, chemical resistance and fire resistance. However, the disadvantage of zirconium ceramics is low resistance to thermal shock, which limits its use in products functioning in conditions of frequent temperature changes. In this paper, we consider the possibility of increasing the resistance to thermal shock of ceramics based on zirconium dioxide, due to the introduction of an aluminum-magnesium spinel additive ( $MgAl_2O_4$ ).*

**Keywords:** zirconia, magnesium aluminate spinel, composite, heat-resistant ceramics, toughness ceramic, transformational hardening, polymorphism.

---

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

**Введение**

Высокий спрос на конструкционные и жаростойкие материалы преобладает в области авиа-, ракето- и двигателестроения, где ключевым фактором является способность материалов работать при высоких температурах в условиях агрессивной среды под действием механических напряжений [1, 2]. Создание новой перспективной авиационной техники, а также наземных энергетических газотурбинных установок нового поколения с повышенной надежностью, эффективностью и ресурсом эксплуатации,

обеспечивающих снижение выброса вредных веществ, требует повышения температуры газа перед турбиной [3] и, следовательно, разработки облегченных материалов с высокими показателями прочности, жесткости и коррозионной стойкости. Керамические материалы обладают уникальным комплексом свойств по сравнению с металлическими материалами: способностью сохранять свойства в окислительной среде при температурах  $>1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ , высокой износостойкостью, малой плотностью, низким показателем температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР) и высокой коррозионной стойкостью. Эти преимущества делают их безальтернативными для применения в теплонагруженных узлах и деталях перспективных изделий, эксплуатирующихся в окислительной среде при высоких температурах [4].

Отдельно можно выделить керамические материалы на основе диоксида циркония ( $\text{ZrO}_2$ ). Данные материалы нашли широкое применение во многих областях промышленности благодаря высоким значениям основных свойств. Ввиду высоких показателей механических свойств диоксидциркониевые материалы используются для изготовления износостойких, режущих изделий и материалов конструкционного назначения [5]. Благодаря высоким термическим свойствам циркониевая керамика применяется для изготовления жаростойких материалов, радиаторов, газовых сенсоров и термобарьерных покрытий. Диоксид циркония также обладает высокой химической стойкостью, что позволяет использовать изделия из него в качестве биологических имплантов, а сочетание химической инертности и высоких показателей термических свойств позволило применять диоксидциркониевую керамику как огнеупорный материал.

Керамические материалы на основе диоксида циркония находят широкое применение в огнеупорной промышленности, а именно – для изготовления огнеупорных кирпичей и элементов свода печей, труб из пористой керамики, блоков газовых горелок, огнеупорных тиглей, а также стаканов дозаторов и плит шибберных затворов для непрерывной разливки стали. Применение диоксида циркония в качестве материала для изготовления вышеуказанных изделий выгодно еще и потому, что, помимо высоких показателей огнеупорности и химической стойкости, эти материалы обладают повышенными теплоизоляционными свойствами. Это позволяет сэкономить большое количество электроэнергии, а также снизить производственные издержки [6].

В настоящее время керамика из диоксида циркония применяется в качестве теплозащитных покрытий для лопаток ГТД благодаря низким значениям теплопроводности и ТКЛР, схожим со свойствами никелевых сплавов [7].

Диоксид циркония, как материал конструкционного назначения, получил широкое применение в первую очередь благодаря высоким прочностным характеристикам, которыми он обязан присущему ему структурному полиморфизму [8].

В зависимости от температуры, давления, напряженного состояния и других термодинамических условий диоксид циркония может иметь одну из трех кристаллических решеток – моноклинную ( $m$ ), тетрагональную ( $t$ ) или кубическую ( $c$ ). Моноклинная фаза  $m\text{-ZrO}_2$  является термодинамически устойчивой и существует при комнатной температуре. Тетрагональная фаза  $t\text{-ZrO}_2$  метастабильна и существует при температуре от  $1000$  до  $2285\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Тетрагональная фаза диоксида циркония способна переходить в моноклинную под действием механических напряжений или при уменьшении температуры. Переход ( $m$ )  $\rightleftharpoons$  ( $t$ ) сопровождается изменением объема величиной  $7,7\text{--}9\%$ . Для перехода диоксида циркония в кубическую фазу требуется температура  $>2285\text{ }^{\circ}\text{C}$ . В кубической модификации диоксид циркония существует до температуры плавления  $2715\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Переход ( $t$ )  $\rightleftharpoons$  ( $c$ ) происходит без значительного объемного изменения структуры.

Для управления фазовым составом керамических материалов на основе диоксида циркония существует несколько способов, главный из которых заключается в легировании  $ZrO_2$  оксидами гетеровалентных металлов с последующей термообработкой.

Установлено, что диоксид циркония способен образовывать твердые растворы типа замещения со многими двух-, трех- и четырехвалентными оксидами, такими как  $MgO$ ,  $CaO$ ,  $MnO$ ,  $FeO$ ,  $CoO$ ,  $NiO$ ,  $ZnO$ ,  $CdO$ ,  $Cr_2O_3$ ,  $Al_2O_3$ ,  $Mn_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $Y_2O_3$ , а также с оксидами некоторых редкоземельных элементов:  $Er_2O_3$ ,  $Sc_2O_3$ ,  $TiO_2$ ,  $CeO_2$ ,  $ThO_2$  [6, 9]. Важным свойством легирования  $ZrO_2$  оксидом-стабилизатором является увеличение петли гистерезиса перехода ( $t$ )  $\rightleftharpoons$  ( $m$ ) и смещение фазовых равновесий, благодаря чему образующиеся твердые растворы способны существовать при комнатной температуре, практически не подвергаясь превращениям и распаду. В настоящее время механизмы стабилизации керамики на основе диоксида циркония достаточно хорошо изучены, установлены оптимальные условия стабилизации фазы  $t-ZrO_2$ , способной существовать при комнатной температуре [10]. Достижению устойчивости флюоритовой структуры при комнатной температуре соответствует сочетание трехвалентности вводимого катиона и достаточной близости его радиуса с радиусом  $Zr^{4+}$  (0,082 нм). Наиболее распространен способ стабилизации  $ZrO_2$  оксидом иттрия –  $Y^{3+}$  (0,096 нм) [11, 12].

Получение высокопрочной циркониевой керамики возможно благодаря наличию трансформационного упрочнения за счет контролируемого фазового перехода ( $t$ )  $\rightarrow$  ( $m$ ) и его мартенситного характера [13]. Механизм трансформационного упрочнения позволяет получать керамические материалы на основе  $t-ZrO_2$  с вязкостью разрушения до  $17 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ , пределом прочности при изгибе 1000–1500 МПа и твердостью по Виккерсу 12–14 ГПа [5].

Однако проблемой керамики на основе диоксида циркония является низкая термостойкость. Добавление стабилизирующих оксидов в повышенных концентрациях не приводит к увеличению термостойкости, а только снижает температуру начала деформации на 100–200 °С. Увеличение стойкости к термоциклированию керамики на основе диоксида циркония является актуальной задачей [14].

Один из способов увеличения термостойкости керамических материалов на основе диоксида циркония – введение второй фазы, имеющей более высокую устойчивость к термическому удару. Однако в большинстве композиционных материалов между наполнителем и матрицей существует различие в величине ТКЛР. При термическом ударе с резким понижением температуры разница в значениях ТКЛР может привести к негативным последствиям, поскольку внутри структуры материала возникают напряжения, что может вызвать в структуре зарождение и дальнейший рост микротрещин. Такие напряжения представляют особую опасность для керамических композиционных материалов ввиду того, что керамическая матрица не обладает достаточной пластичностью, необходимой для релаксации возникающих напряжений. Кроме того, когда наполнитель композиционного материала имеет более высокие значения ТКЛР, чем у матрицы, это может привести к растрескиванию материалов уже на стадии спекания. В случае, когда присутствует неравномерность распределения наполнителя в матрице композита, напряжения могут носить локальный характер и, соответственно, увеличивается вероятность зарождения микротрещин на границах вторичной фазы.

Термонапряжения, вызванные разницей в значениях ТКЛР матрицы композита и наполнителя, могут иметь и положительное значение прочностных характеристик композиционного материала. Правильный выбор материалов в качестве матрицы и наполнителя композита, дисперсность частиц и добавок (в том числе добавок, образующих стекловидную фазу), а также равномерность распределения их и наполнителя в матрице

позволяют не только сохранить возникающие термические напряжения на низком уровне, но и достичь увеличения прочности за счет равномерной микротрещиноватой структуры. При этом происходит снижение коэффициента интенсивности напряжений за счет уменьшения упругости материала в окрестности вершины трещины.

Однако керамические материалы на основе частично стабилизированного диоксида циркония могут сдерживать развитие трещины за счет своего полиморфного перехода ( $t \rightleftharpoons m$ ), что также положительно влияет на прочность.

Алюмомагнезиальная шпинель ( $MgAl_2O_4$ ) применяется в качестве высокоогнеупорного материала благодаря высокой температуре плавления ( $2135\text{ }^\circ\text{C}$ ) [15]. До температуры плавления алюмомагнезиальная шпинель устойчива, не разлагается на оксиды и не вступает в реакцию с концентрированными минеральными кислотами.

Получение изделий на основе шпинели  $MgAl_2O_4$  проводят по двухстадийной технологии. Данный способ связан с объемными изменениями на величину 22–24 %, вызванными уменьшением плотности шпинели ( $3,58\text{ г/см}^3$ ) по сравнению с глиноземом ( $3,99\text{ г/см}^3$ ) [16]. Максимальное расширение совпадает со стадией завершения шпинелеобразования и происходит при температурах 1200–1300 °С. Плотноспекшаяся алюмомагнезиальная шпинель имеет более низкий ТКЛР по сравнению с диоксидом циркония ( $\alpha_{ZrO_2} = 10,7 \cdot 10^{-6}\text{ К}^{-1}$ ;  $\alpha_{MgAl_2O_4} = 8 \cdot 10^{-6}\text{ К}^{-1}$ ) [5] и обладает более высокой термостойкостью. Благодаря своим высоким показателям термических свойств алюмомагнезиальная шпинель применяется для изготовления деталей футеровки зон обжига вращающихся печей, стекольных печных регенераторов, сливных отверстий конверторов, а также датчиков измерения высоких температур в авиационных газотурбинных двигателях (ГТД) и защитных чехлов термопар для плавки многих металлов, в том числе и сплавов для лопаток ГТД.

Таким образом, введение в состав циркониевой керамики алюмомагнезиальной шпинели позволит получить композиционный материал, обладающий высокими показателями физико-механических свойств и повышенной устойчивостью к термоциклированию.

Цель данного исследования – изучение влияния концентрации добавки шпинели  $MgAl_2O_4$  на структурно-механические свойства оксидной керамики на основе фазы  $t\text{-}ZrO_2$ .

### Материалы и методы

Получение тетрагонального диоксида циркония осуществляли методом гетерофазного осаждения с последующим смешением с солью стабилизатора и термической обработкой. Гетерофазное осаждение прекурсора проводили из водного раствора оксихлорида циркония в водный раствор аммиака. Для стабилизации тетрагональной фазы вводили добавку оксида иттрия ( $Y_2O_3$ ) в количестве 3 % (мольн.). Смешивание и измельчение прекурсора и стабилизирующей добавки выполняли в планетарной мельнице в спиртовой среде. Синтез  $t\text{-}ZrO_2$  проводили методом термолиза при температуре 1100 °С.

Качественный и количественный структурный анализ полученных материалов осуществляли методом порошковой рентгенографии на установке ДРОН-4 в  $Cu\text{ K}_\alpha$ -излучении. Съемку дифракционного спектра проводили в непрерывном режиме с шагом 0,02 градуса. Угловой диапазон съемки составлял  $2\theta = 10\text{--}90$  градусов. Съемку проводили в непрерывном режиме.

### Результаты и обсуждение

Фазовые и морфологические характеристики полученного порошка диоксида циркония приведены на рис. 1 и 2.

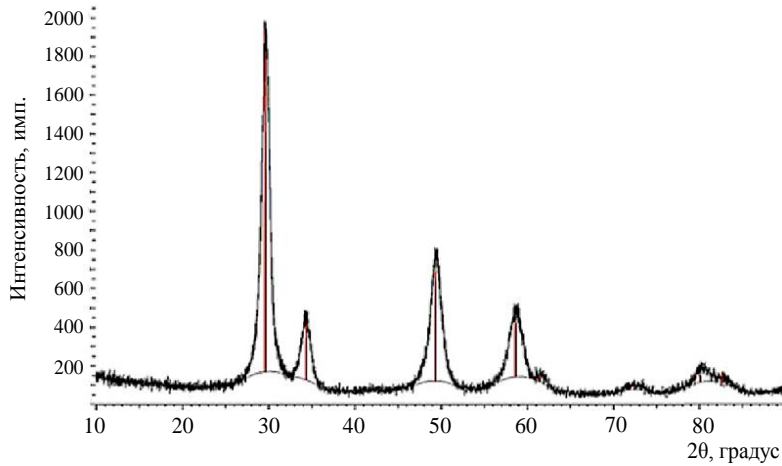


Рис. 1. Дифрактограмма порошка диоксида циркония (данные рентгенофазового анализа), частично стабилизированного добавкой оксида иттрия –  $ZrO_2-3\%$  (мольн.)  $Y_2O_3$

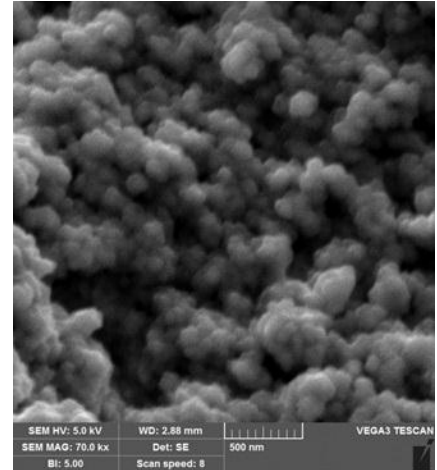


Рис. 2. СЭМ-изображение порошка диоксида циркония с добавкой оксида иттрия

Рентгенофазовый анализ порошка диоксида циркония с добавкой оксида иттрия показал, что основной кристаллической фазой является тетрагональный твердый раствор оксида иттрия в диоксиде циркония.

Полученный порошок диоксида циркония с добавкой оксида иттрия состоит из частиц шарообразной формы.

Алюмомагнезиальную шпинель стехиометрического состава  $71,7\% Al_2O_3 + 28,3\% MgO$  синтезировали при температуре  $1100\text{ }^\circ C$  из  $Al(OH)_3$  и  $MgCO_3$  с учетом потерь при прокаливании.

Фазовые и морфологические характеристики полученного порошка алюмомагнезиальной шпинели приведены на рис. 3 и 4.

Рентгенофазовый анализ керамического порошка алюмомагнезиальной шпинели показал, что после высокотемпературного синтеза образовалась фаза  $MgAl_2O_4$  в количестве 100 %.

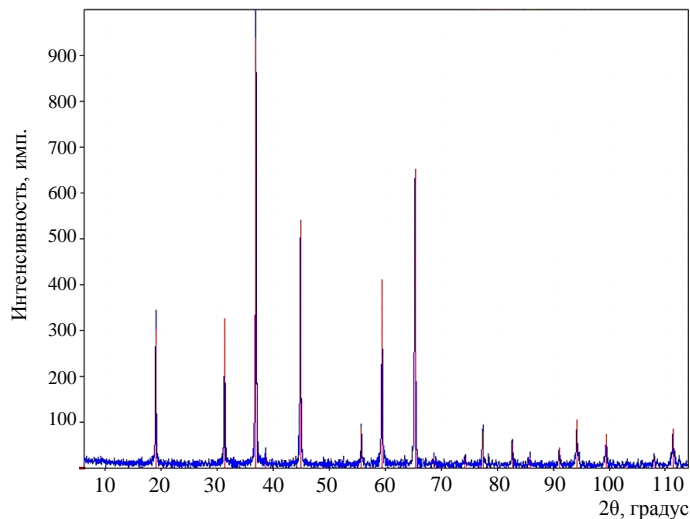


Рис. 3. Дифрактограмма порошка алюмомагнезиальной шпинели (данные рентгенофазового анализа)

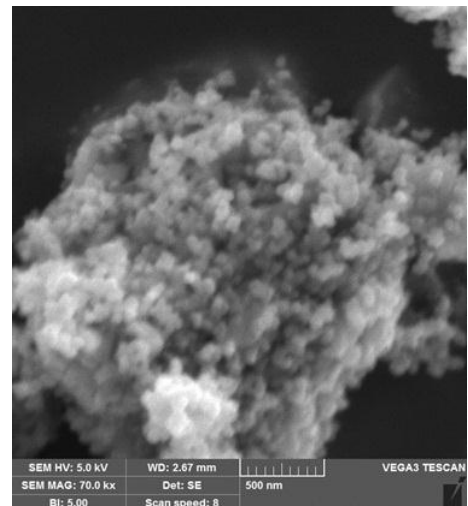


Рис. 4. СЭМ-изображение порошка алюмомагнезиальной шпинели

Порошок алюмомагнезиальной шпинели состоит из частиц с формой, близкой к сферической, границы частиц – сглаженные, что делает их похожими на правильные шары.

Приготовлено три состава композиционного материала на основе матрицы  $t\text{-ZrO}_2$  с различным количеством добавки шпинели  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$ , равным 10, 20 и 30 % (по массе).

Образцы формовали в виде балочек размером  $40 \times 6 \times 6$  мм методом холодного одноосного прессования на гидравлическом прессе. Усилие при прессовании составляло 100 МПа. Высокотемпературный обжиг проводили в воздушной среде в температурном интервале  $1400\text{--}1600$  °С с шагом 100 °С. На образцах, прошедших высокотемпературный обжиг, определяли прочность методом трехточечного изгиба и открытую пористость методом гидростатического взвешивания. Результаты проведенных испытаний приведены в табл. 1.

Таблица 1

Температурная зависимость средней прочности и открытой пористости

Температура испытания, °С	Значения свойств для композиции состава, % (по массе)					
	$90\text{ZrO}_2 + 10\text{MgAl}_2\text{O}_4$		$80\text{ZrO}_2 + 20\text{MgAl}_2\text{O}_4$		$70\text{ZrO}_2 + 30\text{MgAl}_2\text{O}_4$	
	$\sigma_{\text{изг.}}$ , МПа	$\Pi_{\text{откр.}}$ , %	$\sigma_{\text{изг.}}$ , МПа	$\Pi_{\text{откр.}}$ , %	$\sigma_{\text{изг.}}$ , МПа	$\Pi_{\text{откр.}}$ , %
1400	$515 \pm 43$	3,2	$400 \pm 43$	2,8	$240 \pm 38$	0,1
1500	$565 \pm 83$	0,1	$440 \pm 86$	0,7	$410 \pm 80$	0,4
1600	$455 \pm 59$	0,1	$430 \pm 91$	0,8	$215 \pm 22$	0,78

С увеличением температуры обжига до 1500 °С у всех составов композиционного материала наблюдается увеличение прочности. Это объясняется взаимным сдерживанием роста кристаллов фазы  $t\text{-ZrO}_2$  и шпинели  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$ , что приводит к равномерному росту зерен обеих фаз. С увеличением концентрации наполнителя в виде шпинели  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$  в композиционном материале происходит снижение механической прочности по причине аномального роста кристаллов фазы  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$ , а также уменьшения доли более высокопрочного компонента – фазы  $t\text{-ZrO}_2$  (рис. 5).

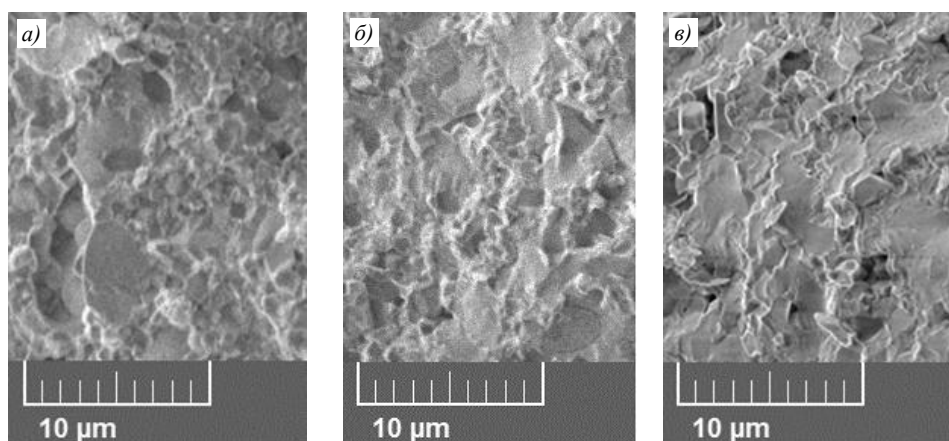


Рис. 5. Микроструктура образцов составов с наполнением шпинелью  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$  с содержанием 10 (а), 20 (б) и 30 % (по массе) (в) после обжига при температуре 1500 °С

Испытание на термическую стойкость проводили методом термоциклирования. Образцы нагревали в электропечи до температуры 1300 °С с последующим охлаждением естественным образом на воздухе. Термостойкость образцов оценивали по потере

прочности материала после трех теплосмен. Результаты испытаний приведены в табл. 2.

Таблица 2

## Результаты испытаний на термостойкость

Содержание шпинели $MgAl_2O_4$ , % (по массе)	Температура испытания, °С	Средняя прочность при изгибе, МПа		Потеря прочности, %
		до теплосмен	после теплосмен	
10	1400	515	495	4,3
	1500	565	545	3,7
	1600	455	415	8,7
20	1400	400	385	3,5
	1500	440	420	4,3
	1600	430	410	5,4
30	1400	240	230	4,8
	1500	410	395	4,1
	1600	215	205	5,2

## Заключения

В проведенном исследовании после высокотемпературной обработки при 1500 °С получен композиционный материал на основе фазы  $t-ZrO_2$  с добавкой алюмомагнезиальной шпинели  $MgAl_2O_4$  в количестве 10 % (по массе), который обладает средней прочностью при изгибе 550 МПа, малой открытой пористостью, плотностью 5,20 г/см<sup>3</sup>, а также устойчивостью к термическому удару. Результаты исследования показали, что полученный керамический материал может быть использован для производства изделий конструкционного назначения, применяемых в ответственных узлах и агрегатах.

## Библиографический список

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. № 1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Ломберг Б.С., Сидоров В.В. Приоритетные направления развития технологий производства жаропрочных материалов для авиационного двигателестроения // Проблемы черной металлургии и материаловедения. 2013. № 3. С. 47–54.
3. Кашин Д.С., Стехов П.А. Защитные покрытия для жаропрочных сплавов на основе ниобия // Труды ВИАМ. 2015. № 6. Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.12.2020). DOI: 10.18577/2307-60446-2015-0-6-1-1.
4. Каблов Е.Н., Гращенков Д.В., Исаева Н.В., Солнцев С.С., Севастьянов В.Г. Высокотемпературные конструкционные композиционные материалы на основе стекла и керамики для перспективных изделий авиационной техники // Стекло и керамика. 2012. № 4. С. 7–11.
5. Гузман И.Я. Химическая технология керамики. М.: Стройматериалы, 2003. 496 с.
6. Оковитый В.В. Выбор оксидов для стабилизации диоксида циркония при получении теплозащитных покрытий // Наука и техника. 2015. № 5. С. 26–32.
7. Кульметьева В.Б., Сибирякова Е.А. Влияние концентрата редкоземельных элементов на стабилизацию высокотемпературных фаз и свойства керамики на основе  $ZrO_2-7$  мас. %  $Y_2O_3$  // Актуальные проблемы порошкового материаловедения: материалы Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 85-летию со дня рождения акад. В.Н. Анциферова / под ред. А.А. Ташкинова. М.: Пермск. нац. иссл. политех. ун-т, 2018. С. 298–302.

8. Милявский В.В., Акопов Ф.А., Лукин Е.С. и др. Полиморфные переходы частично стабилизированного  $ZrO_2$  на поверхностях разрушения образцов трансформационно-упрочненной керамики в результате различных силовых и термических воздействий // Новые огнеупоры. 2014. № 7. С. 44–48.
9. Жигачев А.О., Лысков Н.В., Жигачева Д.В. Стабилизация кубической фазы  $Sc_2O_3-ZrO_2$  легированием оксидами иттрия и иттербия // Пятый междисциплинарный форум с междунар. участием «Новые материалы и перспективные технологии» (Москва, 30 окт. – 1 нояб. 2019 г.): сб. материалов. М.: НПП «ИСИС», 2019. Т. II. С. 140–142.
10. Жигачев А.О., Головин Ю.И., Умрихин А.В. и др. Керамические материалы на основе диоксида циркония / под общ. ред. Ю.И. Головина. М.: Техносфера, 2018. 358 с.
11. Кашин Д.С., Стехов П.А. Современные теплозащитные покрытия, полученные методом электронно-лучевого напыления (обзор) // Труды ВИАМ. 2018. № 2 (62). Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.12.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-2-10-10.
12. Медведев П.Н., Мубояджян С.А. Рентгеноструктурные исследования электронно-лучевого керамического слоя теплозащитного покрытия на основе  $ZrO_2 \cdot Y_2O_3$  // Труды ВИАМ. 2017. № 1 (49). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.12.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-1-3-3.
13. Милявский В.В., Акопов Ф.А., Вальяно Г.Е. и др. Разрушение керамики на основе  $ZrO_2$  при механическом воздействии // Физика и техника высоких давлений. 2013. № 2. С. 68–77.
14. Каблов Е.Н., Ечин А.Б., Бондаренко Ю.А. История развития технологии направленной кристаллизации и оборудования для литья лопаток газотурбинных двигателей // Труды ВИАМ. 2020. № 3 (87). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.12.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-3-3-12.
15. Владимиров В.С., Лукин Е.С., Попова Н.А. и др. Новые виды легких огнеупоров и теплоизоляционных материалов для экстремально высоких температур длительного применения // Стекло и керамика. 2011. № 4. С. 14–21.
16. Бакунов В.С., Балкевич В.Л., Власов А.С. и др. Керамика из высокоогнеупорных окислов М.: Металлургия, 1977. 304 с.