

УДК 539.422.5

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НАНОДИСПЕРСНОГО ПОРОШКА ДИОКСИДА ЦИРКОНИЯ ДЛЯ УПРОЧНЕНИЯ АЛЮМООКСИДНОЙ КЕРАМИКИ

**Н.С. Стукачева, С.В. Веселов, Н.Ю. Черкасова,  
Р.И. Кузьмин, Н.А. Неупокоев, А.В. Фелюфьянова**  
*Новосибирский государственный технический университет*

В статье приведены результаты исследования алюмооксидной керамики с упрочняющей добавкой диоксида циркония различной дисперсности. В качестве добавки использовали субмикронный и нанодисперсный порошок  $ZrO_2$ . Нанодисперсный порошок  $ZrO_2$  тетрагональной модификации был получен методом осаждения из раствора с использованием  $ZrOCl_2 \cdot 8H_2O$  в качестве прекурсора и последующей термической обработкой. Для подготовки нанопорошка тетрагональной кристаллической модификации температура окисления осадка составляла 450 °С. Размер частиц синтезированного порошкового материала составлял 5...10 нм. В качестве технологии подготовки керамических образцов использовали метод изостатического формования гранулированного порошка с последующим свободным спеканием. На основании данных микроструктурных исследований керамических материалов показано, что замена субмикронного порошка  $ZrO_2$  наноразмерным позволяет уменьшить размер зерен оксида алюминия с  $\approx 2$  мкм до  $\approx 1$  мкм. Формирование мелкозернистой структуры керамики оказывает положительное влияние на прочность материала при изгибе. Установлено, что использование наноразмерного порошка упрочняющей добавки позволяет повысить предел прочности алюмооксидного керамического материала при изгибе с 550 до 730 МПа. На основании результатов рентгенофазового анализа было показано, что введение более высокодисперсной добавки  $ZrO_2$  позволяет увеличить долю тетрагональной модификации в спеченных образцах. Авторами предполагается, что при использовании наноразмерного  $ZrO_2$  эффективность трансформационного упрочнения керамического материала повышается.

*Ключевые слова:* трансформационное упрочнение, метод осаждения, нанодисперсные добавки, диоксид циркония, алюмооксидная керамика, прочностные испытания.

DOI: 10.17212/1727-2769-2016-4-33-42

### Введение

Одним из направлений развития современного материаловедения является разработка высокопрочной керамики. Среди существующих способов повышения прочности керамики при изгибе наиболее эффективные связаны с изменением химического (легирование) и фазового (дисперсное упрочнение) состава материала, а также с применением современных технологических решений производства. Выбор способа в значительной степени определяется ограничениями области эксплуатации керамического материала.

При разработке керамических материалов медицинского назначения возможности легирования существенно ограничены как по типу используемых добавок, так и по их содержанию. Указанные в стандартах ограничения связаны с обеспе-

---

Работа выполнена в Новосибирском государственном техническом университете при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках реализации комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства (договор № 02.G25.31.0144 от 01.12.2015).

© 2016 Н.С. Стукачева, С.В. Веселов, Н.Ю. Черкасова, Р.И. Кузьмин, Н.А. Неупокоев, А.В. Фелюфьянова

чением биологической совместимости материала с тканями человеческого организма. В то же время при разработке алюмооксидной керамики для элементов эндопротезов суставов хорошо зарекомендовал себя метод дисперсного упрочнения частицами диоксида циркония, являющимися биосовместимым материалом. Частицы  $ZrO_2$ , располагаясь по границам зерен  $Al_2O_3$ , обеспечивают сдерживание роста зерен матрицы на этапе спекания, что приводит к повышению прочности керамики при изгибе более чем в 2 раза [1].

Использование добавки диоксида циркония в алюмооксидной матрице позволяет также реализовать эффект трансформационного упрочнения [2, 3]. Данный эффект связан с фазовым переходом метастабильной при комнатной температуре тетрагональной кристаллической модификации  $ZrO_2$  в стабильную моноклинную фазу, сопровождающийся увеличением объема. Увеличение объема частиц  $ZrO_2$  способствует торможению трещины в керамическом материале в процессе ее распространения. Стабилизацию тетрагональной кристаллической решетки частиц возможно обеспечить как присутствием сжимающих напряжений керамической алюмооксидной матрицы, так и путем уменьшения размеров частиц.

Одним из недостатков диоксида циркония является его низкая твердость, которая коррелирует с показателями износостойкости материала. В связи с этим при разработке керамики для пары трения эндопротезов суставов использование большой объемной доли рассматриваемой добавки нецелесообразно. Наиболее перспективным направлением разработки керамики пары трения является использование нанодисперсных порошков диоксида циркония, что позволяет в условиях ограниченной объемной доли обеспечить максимально полное распределение добавки по границам зерен оксида алюминия и тем самым эффективно сдерживать их рост в процессе спекания.

### 1. Постановка задачи

Цель данной работы заключается в оценке эффективности использования наноразмерной фракции порошкового материала ( $ZrO_2$ ) для повышения механических характеристик алюмооксидной керамики. Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи:

- синтезировать порошок  $ZrO_2$  с наноразмерным фракционным составом;
- подготовить образцы керамического материала, содержащие синтезированный порошок и произвести их анализ;
- получить керамический материал с применением субмикронного порошка  $ZrO_2$  и произвести сравнительный анализ.

### 2. Методика эксперимента

Для проведения исследований были подготовлены две серии керамических образцов на основе  $Al_2O_3$ , содержащие упрочняющую добавку  $ZrO_2$ . В качестве матричного материала выступал субмикронный порошок оксида алюминия марки СТ 3000 GS (Almatis) ромбоэдрической кристаллической модификации. В качестве упрочняющей добавки в образцах первой серии использовали порошок диоксида циркония моноклинной модификации марки ЦРО-К (ГОСТ 21907–76). Средний размер частиц промышленного  $ZrO_2$  после диспергирования составлял  $\approx 0,5$  мкм, что позволяет охарактеризовать данную добавку как субмикронный порошковый материал. Для подготовки образцов второй серии использовали синтезированный нанодисперсный порошок  $ZrO_2$ . Количество упрочняющей фазы составляло 20 и 15 вес. % для образцов первой и второй серий соответственно.

В качестве прекурсора для синтеза наноразмерных частиц диоксида циркония использовали кристаллогидрат оксихлорида циркония  $\text{ZrOCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$  (ТУ 6-00-3677-74). На первом этапе синтеза был подготовлен 1М раствор  $\text{ZrOCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$  в дистиллированной воде. Методом капельного введения 25 % водного раствора аммиака в раствор соли был получен осадок, вакуумную фильтрацию которого производили с применением фильтра «Белая лента». Для обезвоживания и полного удаления ионов хлора отфильтрованный осадок подвергали пятнадцатикратной промывке в изопропиловом спирте в соотношении к продукту 4:1. Сушку продукта производили в сушильном шкафу WOV-30 (DAIHAN Scientific) при температуре 80 °С в течение 6 часов. Окончательную термическую обработку продукта осуществляли в воздушной атмосфере камерной печи SNOL 7.2/1100 при температуре 450...600 °С.

Образцы алюмоциркониевой керамики подготавливали в соответствии с технологическими режимами, подробно представленными в работах [4–7]. Фазовый состав спеченных образцов определяли по результатам дифрактометрического анализа. Рентгенограммы образцов были зарегистрированы на  $\theta - \theta$  дифрактометре ARL X'TRA с применением медной рентгеновской трубки (напряжение 40 кВ, ток 40 мА). Микроструктурные исследования проводили на растровом электронном микроскопе CarlZeiss EVO 50. Для выявления микроструктуры перед анализом производили термическое травление при температуре на 100 °С ниже температуры спекания с выдержкой в течение одного часа. Предел прочности образцов обеих серий определяли по схеме трехточечного нагружения в соответствии с ГОСТ 24409–80. Испытания по оценке прочности проводили на универсальном испытательном комплексе Instron 3369.

### 3. Результаты и обсуждение

Для выявления влияния дисперсности исходных порошковых компонентов на формирование структуры и свойств керамического материала был синтезирован наноразмерный порошок  $\text{ZrO}_2$ . Фотография синтезированного порошка представлена на рис. 1. Видно, что размер частиц составляет около 5...10 нанометров. При этом, как и свойственно высокодисперсным порошковым материалам, частицы стремятся понизить большую поверхностную энергию за счет агрегации. Размеры агрегатов достигают  $\approx 60$  нм.

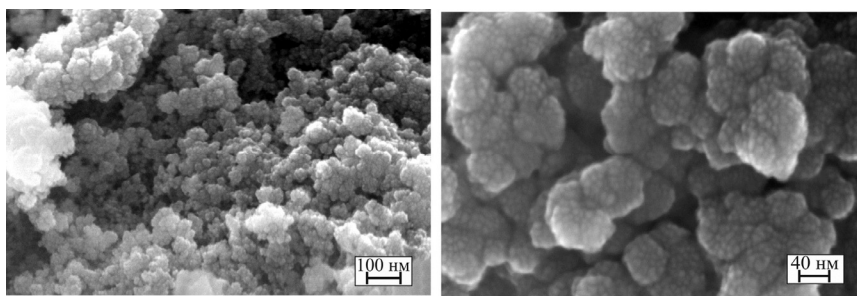


Рис. 1 – Изображение синтезированного порошкового материала

Fig. 1 – The image of synthesized powder material

О наличии наноразмерных частиц диоксида циркония свидетельствуют также результаты рентгенофазового анализа (рис. 2) синтезированного материала. Авторами работы [8] отмечается, что тетрагональная модификация  $\text{ZrO}_2$  сохраняется при размере кристаллитов до 30 нм. Учитывая, что при синтезе диоксида цирко-

ния не использовали стабилизирующие легирующие добавки, преобладание в составе материала, синтезированного при температуре 450 °С, тетрагональной модификации  $ZrO_2$  (около 95 вес. %) свидетельствует о том, что кристаллиты порошка имеют нанометровый размер. При повышении температуры синтеза до 600 °С в связи с ростом кристаллитов стабилизирующий эффект за счет размерности снижается и доля моноклинной модификации увеличивается до 30 %.

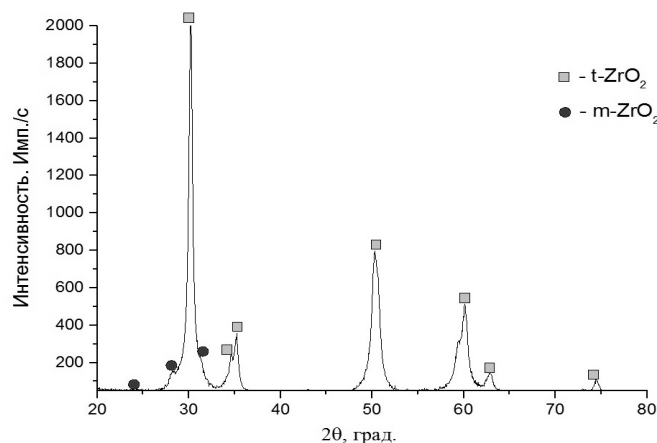


Рис. 2 – Фазовый состав синтезированной добавки  $ZrO_2$

Fig. 2 – The phase composition of the synthesized  $ZrO_2$  additive

Синтезированный при 450 °С диоксид циркония использовался в качестве упрочняющей добавки для получения алюмооксидного керамического материала. Эффективность применения наноразмерного диоксида циркония наблюдается, в первую очередь, в повышении механических характеристик керамического материала. По результатам эксперимента установлено, что применение наноразмерного диоксида циркония даже при меньшем содержании второй фазы способствует повышению предела прочности керамики при трехточечном изгибе до 730 МПа. В то время как использование субмикронного порошка позволяет получить керамический материал с пределом прочности около 550 МПа. Нами предполагается, что рост прочности связан с уменьшением среднего размера зерна керамики.

Согласно литературным данным применение диоксида циркония в качестве упрочняющей добавки позволяет сдерживать диффузионные процессы на границах зерен оксида алюминия, препятствуя их росту во время спекания. На рис. 3 приведена фотография микроструктуры керамики, полученной с использованием нанодисперсного порошка второй фазы. Установлено, что при использовании в качестве упрочняющей добавки нанодисперсного материала наблюдается равномерное распределение зерен второй фазы, которые окружают практически каждое зерно  $Al_2O_3$  (выделенная область). Добиться аналогичного эффекта при использовании упрочняющих частиц субмикронного размера не удастся. Таким образом, для образцов второй серии средний размер зерен алюмооксидной матрицы составляет 1 мкм, а средний размер частиц упрочняющей добавки  $ZrO_2$  – 0,2 мкм (рис. 4, а). В то же время при использовании более крупных частиц второй фазы (образцы первой серии) средний размер зерен оксида алюминия составляет порядка 2 мкм, а диоксида циркония – 0,4 мкм (рис. 4, б). Отдельно следует отметить, что выбранная в работе технология подготовки суспензии позволила обес-

печить гомогенное распределение компонентов во всем объеме материала как в случае применения синтезированного нанодисперсного порошка, так и в случае использования субмикронного порошка.

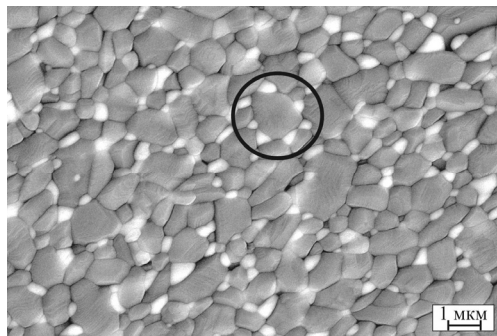


Рис. 3 – Распределение нанодисперсных частиц второй фазы в структуре алюмоциркониевой керамики

Fig. 3 – The distribution of nanoscaled second phase particles in the ZTA ceramic structure

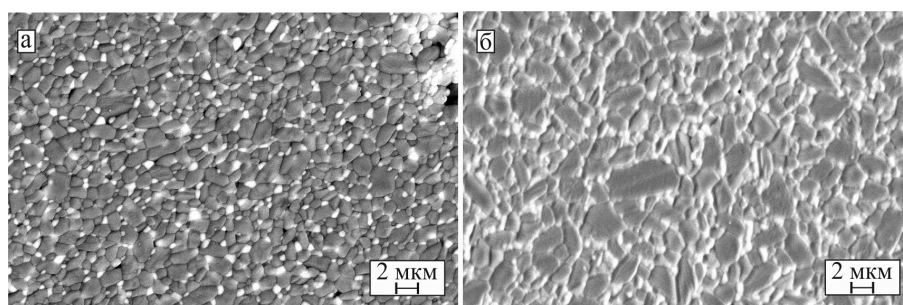


Рис. 4 – Микроструктура алюмоциркониевой керамики с синтезированным нанодисперсным  $ZrO_2$  (a) и субмикронным  $ZrO_2$  (б)

Fig. 4 – The microstructure of ZTA ceramics with synthesized nanodispersed  $ZrO_2$  (a) and submicron  $ZrO_2$  (b)

Таким образом, на основании результатов микроструктурных исследований можно сделать вывод, что при использовании в качестве упрочняющей добавки более высокодисперсного материала эффективность механизма сдерживания роста зерен повышается.

Другим преимуществом керамического материала, полученного с применением нанодисперсного  $ZrO_2$ , является его фазовый состав. Из литературы известно, что для упрочнения керамики целесообразно использовать метастабильную тетрагональную модификацию  $ZrO_2$  [2], реализующую так называемое трансформационное упрочнение. Анализ рентгенограмм спеченных керамических материалов показал, что в образцах обеих серий присутствуют рефлексы оксида алюминия альфа-модификации, а также тетрагонального и моноклинного диоксида циркония. Фазовый состав образцов представлен в таблице.

В спеченной керамике наличие тетрагональной модификации  $ZrO_2$  обусловлено уже не размерным эффектом, в отличие от синтезированного наноразмерного

порошка, а действием сжимающих напряжений алюмооксидной матрицы [2]. Согласно фазовому анализу содержание тетрагональной модификации диоксида циркония в спеченной керамике составляет 32 и 55 % для образцов первой и второй серий соответственно. Эти результаты согласуются с работой [9]. Авторами данной работы отмечается, что эффективность стабилизации тетрагональной модификации  $ZrO_2$  с использованием сжимающих напряжений керамической матрицы зависит от размера частиц второй фазы. А именно с уменьшением размера частиц диоксида циркония количество тетрагональной фазы в образцах увеличивается. Таким образом, можно предположить, что при использовании наноразмерного  $ZrO_2$  эффективность трансформационного упрочнения керамического материала повышается.

**Фазовый состав спеченной керамики**  
**The phase composition of the sintered ceramic**

№ серии	Количество фазы, вес. %		
	$\alpha-Al_2O_3$	t- $ZrO_2$	m- $ZrO_2$
1	79,2	6,7	14,1
2	86,0	7,7	6,3

### Заключение

Методом осаждения из раствора с использованием  $ZrOCl_2 \cdot 8H_2O$  в качестве прекурсора был получен порошок  $ZrO_2$ . Согласно результатам рентгенофазового анализа и данным растровой электронной микроскопии было показано, что средний размер частиц синтезированного материала составляет 5...10 нм.

Использование синтезированного наноразмерного порошка  $ZrO_2$  в качестве упрочняющей добавки для алюмооксидной керамики позволяет существенно уменьшить средний размер зерна спеченных образцов. Установлено, что замена субмикронного порошка синтезированным нанодисперсным материалом приводит к снижению размеров зерен  $Al_2O_3$  с  $\approx 2$  мкм до  $\approx 1$  мкм.

Измельчение микроструктуры положительно отражается на механических свойствах материала. Показано, что использование нанопорошка позволило получить керамику с прочностью при изгибе до 730 МПа. В то же время прочность керамического материала, полученного по аналогичной технологии с применением субмикронного  $ZrO_2$ , составляет 550 МПа.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Оценка влияния добавки диоксида циркония на структуру и свойства алюмооксидной керамики / С.В. Веселов, Н.С. Белоусова, Н.Ю. Черкасова, О.А. Горяйнова, Е.В. Мельникова, А.О. Лазарев // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2014. – № 1. – С. 473–477.
2. Hannink R.H.J., Kelly P.M., Muddle B.C. Transformation toughening in Zirconia-containing ceramics // Journal of the American Ceramic Society. – 2000. – Vol. 83, N 3. – P. 461–487.
3. Ceramics for prosthetic hip and knee joint replacement / M.N. Rahaman, A. Yao, B.S. Bal, J.P. Garino, M.D. Ries // Journal of the American Ceramic Society. – 2007. – Vol. 90, N 7. – P. 1965–1988.
4. Горяйнова О.А., Мельникова Е.В., Кузьмин К.А. Эффективность диспергирования порошка  $Al_2O_3$  в бисерной мельнице // Современные техника и технологии: сборник докладов XX Международной юбилейной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск, 2014. – Т. 2. – С. 21–22.

5. Горьяйнова О.А., Мельникова Е.В., Черкасова Н.Ю. Влияние количества дефлокулянта на гранулометрический состав суспензии  $Al_2O_3$  при диспергировании на бисерной мельнице // Современное материаловедение: материалы и технологии новых поколений: сборник трудов Всероссийской школы-семинара с международным участием. – Томск, 2014. – С. 206–208.
6. Evaluating the effectiveness axial and isostatic pressing methods of ceramic granular powder / N. Belousova, S. Veselov, D. Anufrienko, O. Goryainova // *Applied Mechanics and Materials*. – 2015. – Vol. 698. – P. 472–477.
7. Влияние времени выдержки при спекании на структуру и свойства плотной керамики / С.В. Веселов, Н.Ю. Черкасова, М.Ю. Перепелкин, А.О. Лазарев // Материалы и технологии новых поколений в современном материаловедении: сборник трудов Международной конференции с элементами научной школы для молодежи. – Томск, 2015. – С. 183–185.
8. Garvie R.C. The occurrence of metastable tetragonal zirconia as a crystallite size effect // *The Journal of Physical Chemistry*. – 1965. – Vol. 69, N 4. – P. 1238–1243.
9. Stability of tetragonal  $ZrO_2$  particles in ceramic matrices / A.H. Heuer, N. Claussen, W.M. Kriven, M. Ruhle // *Journal of the American Ceramic Society*. – 1982. – Vol. 65, N 12. – P. 642–650.

#### THE EFFICIENCY OF APPLICATIONS ZIRCONIA NANOPOWDERS FOR REINFORCEMENT OF ALUMINA

Stukacheva N.S., Veselov S.V., Cherkasova N. Yu.,  
Kuzmin R.I., Neupokoev N.A., Felofyanova A.V.

*Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia*

In the paper the results of investigation of alumina ceramic with the addition of a reinforcing zirconia powder with different dispersion are given. As the additives, the submicron and nanosized  $ZrO_2$  powders were used. Nanodispersed tetragonal  $ZrO_2$  powder was obtained by precipitation technique from a solution using  $ZrOCl_2 \cdot 8H_2O$  precursor followed by heat treatment. Precipitate oxidation temperature for the tetragonal nanopowder preparation was 450 °C. The particle size of the synthesized material powder was 5...10 nm. As the technology of the ceramic samples preparation the method of granular powder isostatic formation followed by free sintering are used. The microstructural investigations of ceramic materials have shown that the replacement of submicron  $ZrO_2$  powder with nanosized one allows providing the decrease of alumina grain size from  $\approx 2 \mu m$  to  $1 \mu m$ . The development of fine-grained structure make positive influence on the ceramic bending strength. It was stated that the usage of nanosized reinforcing powder allows increasing the material bending strength from 550 to 730 MPa. According to the results of XRD analysis an addition of more dispersive  $ZrO_2$  result in more volume fraction tetragonal phase formation in sintered samples. It was assumed that under the usage of nanosized zirconia in alumina ceramic the efficiency of phase transformation reinforcing effect increases.

*Keywords:* transformation toughening, method of precipitation, nanoparticles, zirconia, alumina, bending strength.

DOI: 10.17212/1727-2769-2016-4-33-42

#### REFERENCES

1. Veselov S.V., Belousova N.S., Cherkasova N.Yu., Goryainova O.A., Melnikova E.V., Lazarev A.O. Otsenka vliyaniya dobavki dioksida tsirkoniya na strukturu i svoystva alyumooksidnoi keramiki [An appraisal of zirconia additives influence on alumina ceramic structure and properties]. *Aktual'nye problemy v mashinostroenii – Actual problems in machine building*, 2014, no. 1, pp. 473–477.

2. Hannink R.H.J., Kelly P.M., Muddle B.C. Transformation toughening in Zirconia-containing ceramics. *Journal of the American Ceramic Society*, 2000, vol. 83, no. 3, pp. 461–487.
3. Rahaman M.N., Yao A., Bal B.S., Garino J.P., Ries M.D. Ceramics for prosthetic hip and knee joint replacement. *Journal of the American Ceramic Society*, 2007, vol. 90, no. 7, pp. 1965–1988.
4. Goryainova O.A., Mel'nikova E.V., Kuzmin K.A. [The dispersion efficiency of  $Al_2O_3$ -powder in bead mill]. *Sovremennye tekhnika i tekhnologii: sbornik dokladov XX Mezhdunarodnoi yubileinoi nauchno-prakticheskoi konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh* [XX International conference for students and young scientists "Modern Technique and Technologies MTT-2014"]. Tomsk, 2014, vol. 2, pp. 21–22. (In Russian)
5. Goryainova O.A., Mel'nikova E.V., Cherkasova N.Yu. [The influence of on the amount of deflocculant size distribution of  $Al_2O_3$  suspezii when dispersed in the bead mill]. *Sovremennoe materialovedenie: materialy i tekhnologii novykh pokolenii: sbornik trudov Vserossiiskoi shkoly-seminara s mezhdunarodnym uchastiem* [Modern materials science: materials and technologies of new generations. Proceedings of All-Russian school-seminar with international participation]. Tomsk, 2014, pp. 206–208. (In Russian)
6. Belousova N., Veselov S., Anufrienko D., Goryainova O. Evaluating the effectiveness axial and isostatic pressing methods of ceramic granular powder. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 698, pp. 472–477.
7. Veselov S.V., Cherkasova N.Yu., Perepelkin M.Yu., Lazarev A.O. [The influence of the holding time during sintering on the structure and properties of dense ceramics]. *Materialy i tekhnologii novykh pokolenii v sovremennom materialovedenii: sbornik trudov Mezhdunarodnoi konferentsii s elementami nauchnoi shkoly dlya molodezhi* [Materials and technologies of new generations in modern materials science. Proceedings of the International Conference with the elements of scientific school]. Tomsk, 2015, pp. 183–185. (In Russian)
8. Garvie R.C. The occurrence of metastable tetragonal zirconia as a crystallite size effect. *The Journal of Physical Chemistry*, 1965, vol. 69, no. 4, pp. 1238–1243.
9. Heuer A.H., Claussen N., Kriven W.M., Ruhle M. Stability of tetragonal  $ZrO_2$  particles in ceramic matrices. *Journal of the American Ceramic Society*, 1982, vol. 65, no. 12, pp. 642–650.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



**Стукачева Наталья Сергеевна** – родилась в 1983 году, канд. техн. наук, доцент кафедры материаловедения в машиностроении Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – высокопрочная керамика конструкционного назначения. Опубликовано 54 научные работы. (Адрес: 630092, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: belousova\_ns@mail.ru).

**Stukacheva Natalia Sergeeva** (b. 1983) – Candidat of Sciences (Eng.), Assistant professor, Novosibirsk State Technical University. Her research interests are currently focused on obtaining of high-strength ceramics. She is author of 54 scientific papers. (Address: 20 Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: belousova\_ns@mail.ru).



**Веселов Сергей Викторович** – родился в 1982 году, канд. техн. наук, доцент кафедры материаловедения в машиностроении Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – высокопрочная керамика конструкционного назначения. Опубликовано 58 научных работ. (Адрес: 630092, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: veselov\_s@inbox.ru).



**Veselov Sergey Viktorovich** (b. 1982) – Candidat of Sciences (Eng.), Assistant professor, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on obtaining of high-strength ceramics. He is author of 58 scientific papers. (Address: 20 Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. Email: veselov\_s@inbox.ru).



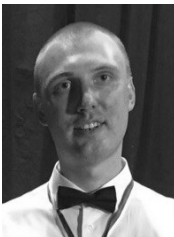
**Черкасова Нина Юрьевна** – родилась в 1990 году, аспирант кафедры материаловедения в машиностроении Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – высокопрочная керамика конструкционного назначения. Опубликовано 22 научные работы. (Адрес: 630092, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: ninacherkasova60@gmail.com).

**Cherkasova Nina Yurevna** – (b. 1983) – post-graduate student of Novosibirsk State Technical University. Her research interests are currently focused on obtaining of high-strength ceramics. She is author of 22 scientific papers. (Address: 20 Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: ninacherkasova60@gmail.com).



**Кузьмин Руслан Изатович** – родился в 1992 году, аспирант кафедры материаловедения в машиностроении Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – высокопрочная керамика конструкционного назначения. Опубликовано 14 научных работ. (Адрес: 630092, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: kuzia2-62@yandex.ru).

**Kuzmin Ruslan Izatovich** (b. 1992) – post-graduate student of Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on obtaining of high-strength ceramics. He is author of 14 scientific papers. (Address: 20 Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. Email: kuzia2-62@yandex.ru).



**Неупокоев Никита Алексеевич** – родился в 1994 году, студент кафедры материаловедения в машиностроении Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – высокопрочная керамика конструкционного назначения. Опубликовано одна научная работа. (Адрес: 630092, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: n.neupokoev154@yandex.ru).

**Neupokoev Nikita Alekseevich** (b. 1994) – student of Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on obtaining of high-strength ceramics. He is author of 1 scientific paper. (Address: 20 Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: n.neupokoev154@yandex.ru).



**Фелюфьянова Анна Владиславовна** – родилась в 1993 году, студентка кафедры материаловедения в машиностроении Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – высокопрочная керамика конструкционного назначения. Опубликовано 5 научных работ. (Адрес: 630092, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: aniytka1993@mail.ru).

**Felofyanova Anna Vladislavovna** (b. 1993) – student of Novosibirsk State Technical University. Her research interests are currently focused on obtaining of high-strength ceramics. She is author of 1 scientific paper. (Address: 20 Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: aniytkal1993@mail.ru).

*Статья поступила 15 ноября 2016 г.  
Received November 15, 2016*

---

To Reference:

Stukacheva N.S., Veselov S.V., Cherkasova N.Yu., Kuzmin R.I., Neupokoev N.A., Felofyanova A.V. Effektivnost' ispol'zovaniya nanodispersnogo poroshka dioksida tsirkoniya dlya uprochneniya alyumooksidnoi keramiki [The efficiency of applications zirconia nanopowders for reinforcement of alumina]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2016, no. 4 (33), pp. 33–42. doi: 10.17212/1727-2769-2016-4-33-42