

УДК 55.20.15; 61.35.29; 29.19.22

doi: 10.18698/0536-1044-2019-8-25-33

Наномодифицированная оксидная композиционная конструкционная керамика и ультраструйный метод оценки ее эксплуатационных свойств*

А.Л. Галиновский¹, С.В. Бочкарев², Л.В. Судник³, В.П. Казанцев²

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана

² Пермский национальный исследовательский политехнический университет

³ Научно-исследовательский институт импульсных процессов с опытным производством

Nanomodified Oxide Composite Structural Ceramics and Ultra-Jet Method for Evaluating Its Operational Properties

A.L. Galinonskiy¹, S.V. Bochkaev², L.V. Sudnik³, V.P. Kazantsev²

¹ Bauman Moscow State Technical University

² Perm National Research Polytechnic University

³ Institute of Pulse Processes with Pilot Production

Приведены результаты экспериментальных исследований корундовой композиционной керамики с модификатором в виде нанопорошка бемита (АЮ(ОН)). Изучение морфологии образцов с использованием сканирующей электронной микроскопии Carl Zeiss, Gemeni (Германия) показало, что введение бемита повышает трещиностойкость корундовой керамики. Применение метода ультраструйной диагностики на этапе технологической подготовки производства керамических изделий дает возможность определить оптимальное содержание бемита. Предлагаемый метод позволяет существенно сократить время испытаний корундовой композиционной керамики и материально-технические затраты.

Ключевые слова: электротехническая продукция, ультраструйная диагностика, корундовая композиционная керамика, наноразмерный порошок бемита

The paper presents the results of experimental studies of corundum composite ceramics with a modifier in the form of a nanopowder of boehmite (AЮ (ОН)). The study of the morphology of the samples using scanning electron microscopy by Carl Zeiss, Gemeni (Germany) shows that the introduction of boehmite improves the crack resistance of corundum ceramics. It is possible to determine the optimal content of boehmite using the method of ultra-jet diagnostics at the stage of technological preparation of the production of ceramic products. The proposed method can significantly shorten the time of testing of the corundum composite ceramics, reduce consumption of the material and other production costs.

Keywords: electrical products, ultra-jet diagnostics, corundum composite ceramics, nanosized boehmite powder

* Исследования выполнены в рамках гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки ведущих научных школ (НШ-3778.2018.8) и гранта РФФИ 18-29-18081.

В отечественной промышленности используют широкую группу керамических материалов: стеатитовую, титановую и пьезоэлектрическую керамику, электрофарфор и др.

Помимо большого удельного электрического сопротивления (объемного и поверхностного), высокой электрической прочности и малых значений тангенса угла диэлектрических потерь, к керамике предъявляются достаточно жесткие требования по механической прочности, зависящей от размера ее пор, структуры, химического и фазового состава, размера кристаллических зерен и др. [1].

Среди перечисленных марок керамики широкое практическое применение нашла корундовая керамика, содержащая до 99 % окиси алюминия Al_2O_3 . Удельная теплопроводность алюминоксида в 10–20 раз больше, чем у изоляционного фарфора. Благодаря хорошим диэлектрическим свойствам и малым диэлектрическим потерям при повышенных температурах [2, 3] корундовая керамика получила большое распространение в электротехнических изделиях.

В высокотемпературной технике корундовую композиционную керамику (ККК) используют в качестве изоляции и защитных чехлов для термопар [4]. Производители и потребители изделий из ККК уделяют заметное внимание вопросам контроля качества материалов и готовых изделий [5].

В последние годы появились работы, связанные с решением указанной научно-технической задачи. В частности, предложены способы получения проекции объекта диагностики с помощью проникающего излучения [6], определения дефектов в изделии методом теплового неразрушающего контроля [7] и исследования процесса разрушения с применением акустической эмиссии [8].

Однако при известных достоинствах указанных способов они имеют такие недостатки, как высокая стоимость и потенциальная радиационная опасность, что не позволяет использовать их для оценивания керамических изделий в больших объемах и керамических элементов функционирующего оборудования.

Проблемы и задачи совершенствования методов диагностики корундовой керамики. В настоящее время на практике применяют небольшое количество методов контроля, в то время как потребность в них значительно выше. Традиционные лабораторные методы тре-

буют изготовления испытательных образцов, поэтому инженеру приходится иметь дело с ограниченным числом информативных параметров, не в полной мере отражающих реальную картину качества ККК.

В связи с этим идет поиск новых методов контроля и диагностики ККК, которые можно было бы эффективно использовать на этапах технологической подготовки производства при выборе рациональных технологических режимов, обеспечения их стабильности и состава.

Вместе с тем существует очевидное противоречие, заключающееся в том, что, с одной стороны, наблюдается интенсивное развитие ККК и появление новых групп таких материалов (например, модифицированных различными микро- и нанодобавками) [9, 10], а, с другой — заметное отставание от них новых методов диагностики.

Цель работы — исследование возможности применения нового метода ультразвуковой диагностики для оценки эксплуатационных свойств ККК при технологической подготовке производства на примере изготовления изделий электротехнического назначения.

В качестве примера рассмотрим технологический процесс производства образцов из ККК методом статического прессования и его основные этапы, требующие введения контрольных операций.

Основной проблемой обеспечения качества производственного этапа создания деталей из ККК является экономически обоснованный выбор метода или рациональной комбинации способов контроля, диагностики и/или испытаний, функционально входящих в маршрутно-операционную структуру технологии их изготовления (рис. 1).

Очевидно, что введение дополнительных параллельных диагностических операций в структуру технологического процесса производства образцов из ККК согласно известным положениям теории надежности повысит вероятность принятия готового изделия заданного уровня качества [11]. При этом методы диагностики должны быть реализуемы в лабораторных и производственных условиях.

В работах [12, 13] показано, что метод ультразвуковой диагностики (УСД) можно эффективно использовать на этапе технологической подготовки производства.

В настоящее время на этапе контроля оценивают такие параметры, как геометрия детали или

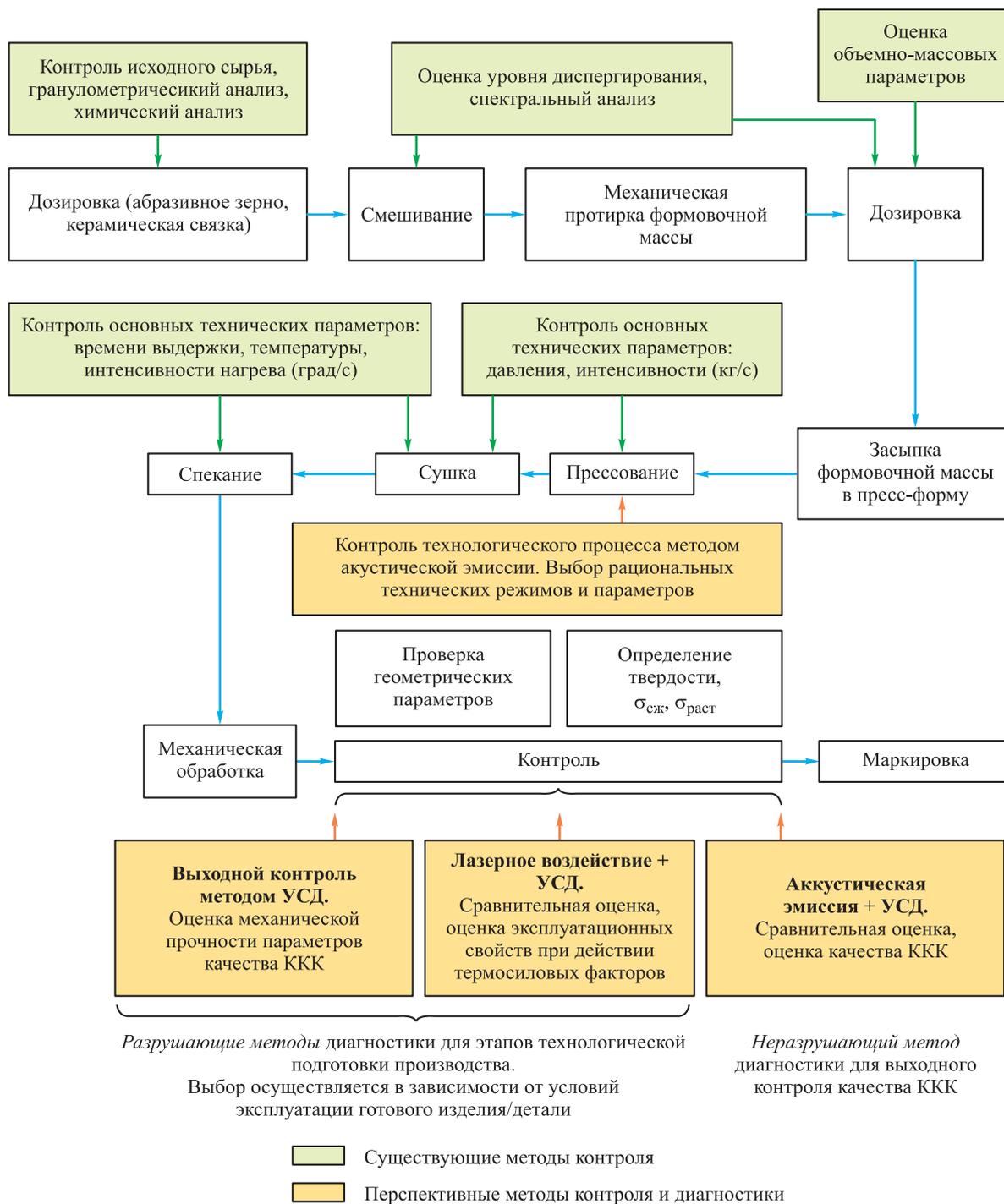


Рис. 1. Технологический процесс производства образцов из ККК методом статического прессования и его основные этапы, требующие введения контрольных операций

заготовки, твердость образцов, напряжения сжатия $\sigma_{сж}$ и растяжения $\sigma_{раст}$ (см. рис. 1). Вместе с тем ответственные детали должны соответствовать высоким требованиям надежности, что можно проверить путем введения дополнительного метода контроля и испытаний, в частности УСД.

С учетом этого рассмотрим возможность реализации процедуры УСД на примере оценки

механических характеристик ККК, применяемой для производства изделий электротехнического назначения: изоляторов, подложек и т. п. Технологический процесс производства ККК имеет множество параметров, варьированием которых его можно оптимизировать с целью изменения механических характеристик [14]. Здесь наряду с варьированием технологических

режимов и параметров появилась задача выбора рациональной концентрации нанодобавок.

Результаты совместных исследований МГТУ им. Н.Э. Баумана, МГУ им. М.В. Ломоносова и НИИ «Импульсных процессов с опытным производством» (Республика Беларусь) показали, что при производстве изделий из ККК на этапе подготовки шихты в качестве нанодобавок можно эффективно использовать нанопорошок бемита (AlO(OH)) [15, 16]. Такие нанодобавки обладают отличной формуемостью даже без связки при малом давлении прессования ($< 1 \text{ т/см}^2$), что позволяет их транспортировать на дальнейшие технологические операции (например, спекание) с сохранением формы изделий. Другими словами, на этапе технологического процесса, следующего после прессования (см. рис. 1), предоставляется возможность механического формообразования формовок.

Наряду с модифицирующим эффектом от введения в керамическую шихту нанодисперс-

ного порошка бемита установлен его активирующий эффект, так как температура спекания (см. рис. 1) может быть снижена на $120...150 \text{ }^\circ\text{C}$.

Традиционно для оценки механических свойств ККК используют разрушающие методы, что не позволяет осуществлять контроль всех изделий, выходящих с производства. Этого недостатка лишен метод УСД, с помощью которого можно оценить механические свойства изделия путем локального воздействия на его ненагруженные участки [17–19].

Для проверки работоспособности технологии УСД изготовлена партия образцов из ККК, имевших различное процентное содержание наноразмерного порошка бемита.

На первом этапе экспериментальных исследований изучена морфология образцов с использованием сканирующей электронной микроскопии Carl Zeiss, Gemini (Германия) на изломах произвольной формы. Морфология поверхности образцов из ККК без нанодобавок

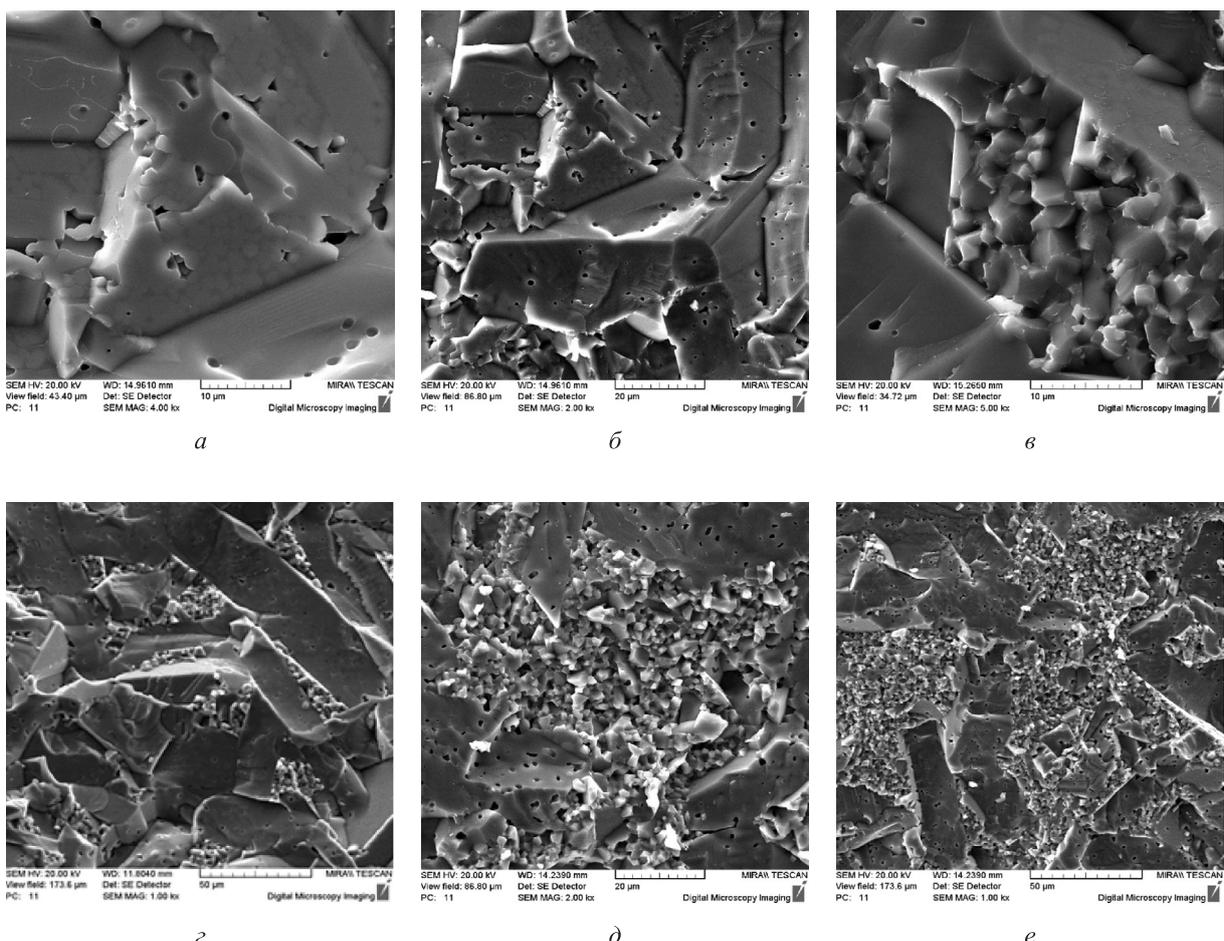


Рис. 2. Морфология поверхности образцов из ККК без нанодобавок (а, б), с 10- (в, г) и 30%-ным (д, е) содержанием наноразмерного порошка бемита при разной масштабной сетке:

а, в — 10 мкм; б, д — 20 мкм; г, е — 50 мкм

и с разным процентным содержанием наноразмерного порошка бемита приведена на рис. 2, а–е.

Обсуждение результатов экспериментов. Анализ морфологии поверхности образцов из ККК (см. рис. 2, а–е) наглядно показывает, что наноразмерный порошок бемита заполняет пространство (пустоты) между кристаллами основной массы порошкового материала, тем самым улучшая показатели ККК, влияющие на механические характеристики — плотность и пористость. Другими словами, введение бемита повышает трещиностойкость корундовой керамики.

Процедуру контроля образцов из ККК методом УСД, подробно описанным в работах [19–22], можно эффективно использовать для отработки технологического процесса производства, а также для выборочного контроля готовой партии изделий (см. рис. 1).

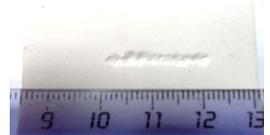
Реализация методики УСД на примере образцов ККК с разным содержанием наноразмерного порошка бемита (5...30 % при шаге 5 %) позволила установить оптимальные значения концентрации нанодобавки бемита. Информативным параметром являлись данные о минимальном уносе массы ККК в результате ультразвукового воздействия.

В качестве примера в таблице приведены некоторые результаты УСД образцов из ККК. Эксперименты выполнены в Центре гидрофизических исследований Физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова с использованием установки для гидроабразивного резания Flow System (США). Давление в системе составляло 400 МПа, скорость подачи — 0,17 мм/с, расстояние от среза фокусирующего сопла до поверхности образца — 3 мм.

Выводы

1. На основании результатов исследования можно утверждать, что технология производ-

Результаты УСД образцов из ККК

Процентное содержание бемита, %	Унос массы материала Δm , г	Каверна после ультразвукового воздействия
0	0,104	
10	0,072	
20	0,094	

ства ККК, использующая наноразмерный порошок бемита, позволяет повысить эксплуатационные характеристики материала — трещиностойкость и динамическую прочность. При этом очевидно, что электрические свойства электротехнической продукции будут оставаться неизменными.

2. Показано, что метод УСД можно эффективно задействовать на этапе технологической подготовки производства изделий из ККК, применяемых для производства электротехнической продукции.

3. Реализация процедуры УСД позволила определить, что оптимальная концентрация наноразмерного порошка бемита составляет около 10 %.

4. Достоинством предлагаемого метода диагностики является возможность использования стандартного технологического оборудования для гидроабразивной резки материалов. Кроме того, этот метод обеспечивает существенное сокращение времени испытаний ККК и материально-технические затраты.

Литература

- [1] Анисимов А.Г., Бардаханов С.П., Завьялов А.П., Зобов К.В., Лысенко В.И., Мали В.И., Труфанов Д.Ю. Влияние условий спекания на структуру и свойства керамики из наноразмерных порошков оксида кремния. *Вестник Новосибирского государственного университета. Сер. Физика*, 2013, т. 8, № 1, с. 107–114.
- [2] Смирнов В.В. *Корундовая керамика с добавками, содержащими компоненты с низким поверхностным натяжением*. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2011.
- [3] Cruz D., Vila R., Gómez-Ferrer B. Dielectric Properties of alumina ceramics for fusion applications. *Energetika*, 2017, no. 63(2), pp. 39–45, doi: 10.6001/energetika.v63i2.3518

- [4] Еремина В.В., Мироненко А.М. Комплексное моделирование диэлектрических и оптических показателей корундовых электрокерамик. *Современные научные исследования и инновации*, 2015, № 4–1(48), с. 17–20. URL: <http://web.snauka.ru/en/issues/2015/04/52101> (дата обращения 15 декабря 2018).
- [5] Fracz P., Urbaniec I., Turba T., Krzewiński Sł. Diagnosis of High Voltage Insulators Made of Ceramic Using Spectrophotometry. *Journal of Spectroscopy*, 2016, article no. 9548302, doi: 10.1155/2016/9548302
- [6] Курбатов А.В., Лазарев П.И. Способ получения проекции объекта с помощью проникающего излучения и устройство для его осуществления. Пат. 2098797 РФ, 1997, бюл. № 9, 5 с.
- [7] Поклад В.А., Мулишкин И.А., Баженов Б.Н., Оспенникова О.Г., Павлухин В.В., Чумаков А.Г. Способ определения дефектов в изделии методом теплового неразрушающего контроля. Пат. 2315983 РФ, 2008, бюл. № 3, 9 с.
- [8] Беликов В.Т., Рывкин Д.Г. Исследование режимов развития процесса разрушения на основе данных наблюдений акустической эмиссии. *Физическая мезомеханика*, 2017, т. 20, № 4, с. 77–84.
- [9] Анисимов А.Г., Бардаханов С.П., Завьялов А.П., Зобов К.В., Лысенко В.И., Мали В.И., Труфанов Д.Ю. Влияние условий спекания на структуру и свойства керамики из наноразмерных порошков оксида кремния. *Вестник Новосибирского государственного университета. Сер. Физика*, 2013, т. 8, № 1, с. 107–114.
- [10] Шут В.Н., Костомаров С.В. Полупроводниковая керамика, полученная на основе нанокристаллических порошков титаната бария. *Неорганические материалы*, 2009, т. 45, № 12, с. 1516–1521.
- [11] Бочкарев С.В., Цаплин А.И., Схиртладзе А.Г. *Диагностика и надежность автоматизированных технологических систем*. Старый Оскол, ТНТ, 2013. 616 с.
- [12] Бочкарев С.В., Цаплин А.И., Галиновский А.Л. Способ диагностики качества конструкционных материалов. Пат. 2518590 РФ, 2013, бюл. № 16.
- [13] Шмитц Ф., Штамм В. Способ диагностики качества конструкционных материалов. Пат. 2518850 РФ, 2014, бюл. № 16, 9 с.
- [14] Олифирова Л.К. *Механохимический синтез функциональных наноструктурных композиций на полимерной основе*. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2016. 20 с.
- [15] Судник Л.В., Абашин М.И., Галиновский А.Л., Осипков А.С., Муляр С.Г., Сайфутдинов Р.Р., Хафизов М.В. Перспективы использования наномодифицированных материалов для повышения эксплуатационных свойств бронезащиты. *Наноинженерия*, 2014, № 4 (34), с. 26–28.
- [16] Судник Л.В., Галиновский А.Л., Колпаков В.И., Хафизов М.В., Муляр С.Г., Сайфутдинов Р.Р. Формирование и ультраструйная диагностика спеченного материала из наноразмерного порошка бемита. *Наноинженерия*, 2013, № 1(19), с. 26–31.
- [17] Bochkaev S.V., Tsaplin A.I., Galinovskii A.L., Abashin M.I., Barzov A.A. Ultra-jet diagnosis of heat treated material microstructure. *Metal Science and Heat Treatment*, 2017, vol. 59, № 5–6, pp. 384–388, doi: 10.1007/s11041-017-0160-7
- [18] Судник Л.В., Муляр С.Г., Рычкова А.Р. Технология оценки эксплуатационных динамических свойств композиционной конструкционной керамики путем использования гидроабразивной ультраструи. *Перспективные подходы и технологии проектирования и производства деталей и изделий аэрокосмической техники. Сб. тр. Междунар. молодежной науч.-техн. конф.*, Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017, с. 29–33.
- [19] Абашин М.И., Галиновский А.Л., Бочкарев С.В., Цаплин А.И., Проваторов А.С., Хафизов М.В. Моделирование ультраструйного воздействия для контроля качества покрытий. *Физическая мезомеханика*, 2015, т. 18, № 1, с. 84–89.
- [20] Абашин М.И., Барзов А.А., Денчик А.И., Мусина Ж.К. Анализ инновационного потенциала ультраструйных гидротехнологий. *Наука и техника Казахстана*, 2016, № 3-4, с. 7–15.

- [21] Абашин М.И. *Ускоренное определение параметров качества поверхностного слоя материала изделий по результатам воздействия на него сверхзвуковой струи жидкости*. Автореф. дис. ... канд. техн. наук, 2013.
- [22] Тарасов В.А., Галиновский А.Л. Проблемы и перспективы развития гидроструйных технологий ракетно-космического машиностроения. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, № 3(15), с. 23. URL: <http://engjournal.ru/articles/636/eng/636.pdf>, doi: 10.18698/2308-6033-2013-3-636

References

- [1] Anisimov A.G., Bardakhanov S.P., Zav'yalov A.P., Zobov K.V., Lysenko V.I., Mali V.I., Trufanov D.Yu. Influence of sintering on the structure and properties of ceramics from silica nanopowders. *Vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Fizika*, 2013, vol. 8, no. 1, pp. 107–114 (in Russ.).
- [2] Smirnov V.V. *Korundovaya keramika s dobavkami, soderzhashchimi komponenty s nizkim poverkhnostnym natyazheniem*. Avtoref. Kand. Diss. [Corundum ceramics with additives containing low surface tension components. Cand. Diss.]. Moscow, 2011.
- [3] Cruz D., Vila R., Gómez-Ferrer B. Dielectric Properties of alumina ceramics for fusion applications. *Energetika*, 2017, no. 63(2), pp. 39–45, doi: 10.6001/energetika.v63i2.3518
- [4] Eremina V.V., Mironenko A.M. Complex modeling of dielectric and optical characteristics of corundum electroceramic. *Modern scientific researches and innovations*, 2015, no. 4–1(48), pp. 17–20 (in Russ.). Available at: <http://web.snauka.ru/en/issues/2015/04/52101> (accessed 15 December 2018).
- [5] Fracz P., Urbaniec I., Turba T., Krzewiński Sł. Diagnosis of High Voltage Insulators Made of Ceramic Using Spectrophotometry. *Journal of Spectroscopy*, 2016, article no. 9548302, doi: 10.1155/2016/9548302
- [6] Kurbatov A.V., Lazarev P.I. *Sposob polucheniya proektsii ob'ekta s pomoshch'yu pronikayushchego izlucheniya i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya* [The method of obtaining the projection of the object using penetrating radiation and device for its implementation]. Patent RF no. 2098797, 1997, 5 p.
- [7] Poklad V.A., Mulishkin I.A., Bazhenov B.N., Ospennikova O.G., Pavlukhin V.V., Chumakov A.G. *Sposob opredeleniya defektov v izdelii metodom teplovogo nerazrushayushchego kontrolya* [The method of determining defects in the product by the method of thermal non-destructive testing]. Patent RF no. 2315983, 2008, 9 p.
- [8] Belikov V.T., Ryvkin D.G. A study of fracture modes on the basis of acoustic emission data. *Fizicheskaya mezomekhanika*, 2017, vol. 20, no. 4, pp. 77–84 (in Russ.).
- [9] Anisimov A.G., Bardakhanov S.P., Zav'yalov A.P., Zobov K.V., Lysenko V.I., Mali V.I., Trufanov D.Yu. Eutectic and Peritectic Lines for Diagrams of Quasi Equilibria of Binary Systems with Partially Soluble Components. *Vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Fizika*, 2013, vol. 8, no. 1, pp. 107–114 (in Russ.).
- [10] Shut V.N., Kostomarov S.V. Semiconductor ceramics based on barium titanate nanocrystalline powders. *Neorganicheskie materialy*, 2009, vol. 45, no. 12, pp. 1516–1521 (in Russ.).
- [11] Bochkarev S.V., Tsaplin A.I., Skhirtladze A.G. *Diagnostika i nadezhnost' avtomatizirovannykh tekhnologicheskikh sistem* [Diagnostics and reliability of automated technological systems]. Staryy Oskol, TNT publ., 2013. 616 p.
- [12] Bochkarev S.V., Tsaplin A.I., Galinovskiy A.L. *Sposob diagnostiki kachestva konstruktsionnykh materialov* [Method for diagnosing the quality of structural materials]. Patent RF no. 2518590, 2013.
- [13] Shmitts F., Shtamm V. *Sposob diagnostiki kachestva konstruktsionnykh materialov* [Method for diagnosing the quality of structural materials]. Patent RF no. 2518850, 2014, 9 p.
- [14] Olifirov L.K. *Mekhanokhimicheskii sintez funktsional'nykh nanostruktornykh kompozitov na polimernoy osnove*. Avtoref. Kand. Diss. [Mechanochemical synthesis of functional nanostructured polymer-based composites. Cand. Diss.]. Moscow, 2016.

- [15] Sudnik L.V., Abashin M.I., Galinovskiy A.L., Osipkov A.S., Mulyar S.G., Sayfutdinov R.R., Khafizov M.V. Prospects of a nanomodified materials use for increase of armored protection operational properties. *Nanoinzheneriya*, 2014, no. 4(34), pp. 26–28 (in Russ.).
- [16] Sudnik L.V., Galinovskiy A.L., Kolpakov V.I., Khafizov M.V., Mulyar S.G., Sayfutdinov R.R. Formation and ultra-jet diagnostics sintered powder of nanosized boehmite. *Nanoinzheneriya*, 2013, no. 1(19), pp. 26–31 (in Russ.).
- [17] Bochkarev S.V., Tsaplin A.I., Galinovskii A.L., Abashin M.I., Barzov A.A. Ultra-jet diagnosis of heat treated material microstructure. *Metal Science and Heat Treatment*, 2017, vol. 59, no. 5–6, pp. 384–388, doi: 10.1007/s11041-017-0160-7
- [18] Sudnik L.V., Mulyar S.G., Rychkova A.R. Technology for assessing the operational dynamic properties of composite structural ceramics using hydroabrasive ultra-jet. *Perspektivnyye podkhody i tekhnologii proyektirovaniya i proizvodstva detaley i izdeliy aerokosmicheskoy tekhniki. Sb. tr. Mezhdunar. molodezhnoi nauch.-tekhn. konf.* [Perspective approaches and technologies for the design and production of parts and products of aerospace equipment. Proceedings of the International Youth Scientific and Technical Conference]. Moscow, 2017, pp. 29–33.
- [19] Abashin M.I., Galinovskiy A.L., Bochkarev S.V., Tsaplin A.I., Provatorov A.S., Khafizov M.V. Modeling of ultra-jet influence for coating quality control. *Fizicheskaya mezhmekhanika*, 2015, vol. 18, no. 1, pp. 84–89 (in Russ.).
- [20] Abashin M.I., Barzov A.A., Denchik A.I., Musina Zh.K. Analysis of the innovation potential of ultra-hydraulic technologies. *Nauka i tekhnika Kazakhstana*, 2016, no. 3-4, pp. 7–15 (in Russ.).
- [21] Abashin M.I. *Uskorennoe opredelenie parametrov kachestva poverkhnostnogo sloya materiala izdeliy po rezul'tatam vozdeystviya na nego sverkhzvukovoy strui zhidkosti*. Avtoref. Kand. Diss. [Accelerated determination of the quality parameters of the surface layer of the material of products based on the results of exposure to a supersonic jet of liquid. Cand. Diss.]. Moscow, 2013.
- [22] Tarasov V.A., Galinovskiy A.L. Problems and prospects of ultra-jet technology in rocket space engineering. *Engineering Journal: Science and Innovation*, 2013, no. 3(15), p. 23 (in Russ.). Available at: <http://engjournal.ru/articles/636/eng/636.pdf>, doi: 10.18698/2308-6033-2013-3-636

Статья поступила в редакцию 27.03.2019

Информация об авторах

ГАЛИНОВСКИЙ Андрей Леонидович — доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Технологии ракетно-космического машиностроения». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: galcomputer@mail.ru).

БОЧКАРЕВ Сергей Васильевич — доктор технических наук, профессор кафедры «Микропроцессорные средства автоматизации». Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, Пермь, Пермский край, Российская Федерация, Комсомольский пр., д. 29, e-mail: bochkarev@msa.pstu.ru).

СУДНИК Лариса Владимировна — доктор технических наук, директор Научно-исследовательского института импульсных процессов с опытным производством (220005, Минск, Республика Беларусь, ул. Платонова, 12-Б-307, e-mail: impuls@bn.by).

КАЗАНЦЕВ Владимир Петрович — доктор технических наук, профессор кафедры «Микропроцессорные средства автоматизации». Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, Пермь, Российская Федерация, Комсомольский пр., д. 29, e-mail: kvp.pnipu@mail.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Галиновский А.Л., Бочкарев С.В., Судник Л.В., Казанцев В.П. Наномодифицированная оксидная композиционная конструкционная керамика и ультраструйный метод оценки ее эксплуатационных свойств. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2019, № 8, с. 25–33, doi: 10.18698/0536-1044-2019-8-25-33

Please cite this article in English as:

Galinonskiy A.L., Bochkarev S.V., Sudnik L.V., Kazantsev V.P. Nanomodified Oxide Composite Structural Ceramics and Ultra-Jet Method for Evaluating Its Operational Properties. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2019, no. 8, pp. 25–33, doi: 10.18698/0536-1044-2019-8-25-33

Information about the authors

GALINOVSKIY Andrei Leonidovich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Head of Technology of Rocket-Space Engineering Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: galcomputer@mail.ru).

BOCHKAREV Sergei Vasilievich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Microprocessor Automation. Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, Perm region, Russian Federation, Komsomolskiy Ave., Bldg. 29, e-mail: bochkarev@msa.pstu.ru).

SUDNIK Larisa Vladimirovna — Doctor of Science (Eng.), Director of Research Institute of Pulse Processes with Pilot Production (220005, Republic of Belarus, Minsk, Platonov St., Bldg. 12b-307, e-mail: impuls@bn.by).

KAZANTSEV Vladimir Petrovich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Microprocessor Automation. Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, Russian Federation, Komsomolskiy Ave., Bldg. 29, e-mail: kvp.pnipu@mail.ru).