

Технология и технологические машины

УДК 621.001.5



ГАЛИНОВСКИЙ
Андрей Леонидович
GALINOVSKIY
Andrey Leonidovich



МУЛЯР
Сергей Геннадьевич
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)
MULYAR
Sergey Gennad'evich
(Moscow, Russian Federation,
Bauman Moscow State
Technical University)



СУДНИК
Лариса Владимировна
(Научно-исследовательский
институт импульсных
процессов с опытным
производством)
SUDNIK
Larisa Vladimirovna
(Minsk, Republic of Belarus,
Research Institute of Pulse
Processes with Pilot Production)

Технологические особенности создания конструкционной керамики с использованием наноразмерного порошка бемита и возможности ее ультразвуковой диагностики*

А.Л. Галиновский, С.Г. Муляр, Л.В. Судник

Современная отечественная конструкционная керамика уступает по ряду показателей зарубежным аналогам. Решение этой проблемы лежит не только в области совершенствования технологического процесса производства, но и в структурном составе исходного материала, а также методик экспресс-оценки эксплуатационных свойств готовой композиции.

В статье рассмотрены вопросы создания конструкционной керамики на основе наноразмерного порошка бемита с целью улучшения технологических и эксплуатационных, в том числе, баллистических свойств композиционной конструкционной керамики. Приведено сравнение результатов анализа микроморфологии сколов конструкционной керамики после статического и динамического воздействия. Проанализированы полученные результаты и сделаны выводы о возможности использования метода ультразвуковой диагностики на этапе технологической подготовки производства вместо дорогостоящих и трудоемких натуральных испытаний с применением высокоскоростных твердотельных ударников. Представлены возможности гибридизации ультразвукового метода оценки эксплуатационных (динамических) свойств керамики и метода диагностики на основе измерения волн акустической эмиссии. Обоснована эффективность ультразвуковых методов диагностики, рассмотрены перспективы его применения на практике в производстве изделий из конструкционной композиционной керамики. Основным достоинством метода является возможность диагностики данного материала в лабораторных условиях, что важно для этапа технологической подготовки производства и выбора рациональных технологических режимов.

Ключевые слова: керамика, бемит, испытания, ультразвука, ударник.

* Исследования по рассматриваемым направлениям проведены за счет средств гранта Президента РФ №16.120.11.5069-МД и грантов РФФИ №12-08-33022-мол_a_вед и 13-08-92608 КО_a.

Technological aspects of creating structural ceramics using nano-sized boehmite powder and the possibility of its ultrajet diagnostics

A.L. Galinovskiy, S.G. Mulyar,
L.V. Sudnik

Modern domestic structural ceramics is inferior to foreign analogues in a number of parameters, which explains the relevance of this paper. A solution to this problem is not only to improve the production process but also the structural composition of the initial material, as well as rapid methods to assess the properties of the final composition. This paper deals with the creation of structural ceramics based on nanoscale boehmite powder to improve technological, operational, and ballistic properties of structural composite ceramics. The results of the micromorphology analysis of structural ceramics chips after static and dynamic loading are compared. The obtained results are discussed and conclusions are drawn about the possibility of using the ultrajet diagnostic method at the technological preparation stage instead of expensive and time-consuming field tests with solid high-speed drummers. It is suggested that the ultrajet method for estimating performance (dynamic) properties of ceramics could be integrated with the diagnostic method based on measuring acoustic emission waves. The efficiency of ultrajet diagnostic methods is justified and the prospects of its application in the manufacture of structural composite ceramics are discussed. The main advantage of the method is the ability to diagnose a material in the laboratory, which is important for choosing technological processes at the preparation stage.

Keywords: ceramics, boehmite, tests, ultrajet, drummer.

В настоящее время Институт порошковой металлургии НАН Беларуси, МГТУ им. Н.Э. Баумана и МГУ им. М.В. Ломоносова в рамках трехстороннего договора проводят совместную разработку технологии изготовления и контроля композиционной конструкци-

онной керамики (КК) на основе наноразмерного порошка бемита. Целью проводимых работ является, с одной стороны, повышение эксплуатационных свойств и уменьшение поверхностной плотности КК, а с другой — создание лабораторного метода ее экспресс-диагностики, в том числе, для оценки баллистических свойств, где единственной альтернативой остается традиционный метод, основанный на высокоскоростном ударе твердотельного ударника об образец из КК. Актуальность выбранного направления исследований обусловлена растущими требованиями к физико-механическим, массовым и другим характеристикам КК, увеличением числа деталей, изготавливаемых из данного материала и применяемых в самых различных отраслях машиностроения: энергетике, двигателестроении, авиационной технике, медицине и др. Вместе с тем качественные показатели аналогичных образцов зарубежного производства в ряде случаев превосходят существующие отечественные аналоги, сдерживая тем самым потенциал российской производственной базы и негативно сказываясь на экспортных, экономических и других возможностях. Все сказанное подтверждает актуальность проведения исследований в этом направлении, демонстрирует научную значимость, практическую ценность и приоритетность выполняемых работ.

Технология производства композиционной КК из наноразмерного порошка бемита. В результате исследований, опирающихся в большей степени на эмпирические данные, на текущий момент разработана инновационная технология получения высокоплотных материалов из тугоплавких керамических ультрадисперсных порошков на основе бемита и средств их экспресс-диагностики. Данные порошки обладают большей, в сравнении с обычными порошками, адгезионной активностью. Плотность их прессовок значительно выше, чем плотность прессовок из крупного порошка корунда, а структура при этом характеризуется однородностью, отсутствием раковин и пустот [1—3].

Синтезируемые порошки, независимо от фазового состояния, отлично формируются даже без связки при малых давлениях прессования ($< 1 \text{ т/см}^2$), позволяют получать прессовки,

имеющие прочность на сжатие ~5 МПа, что дает возможность их транспортировать на дальнейшие технологические операции (например, спекание) с сохранением формы изделий [4]. Это свойство весьма полезно при необходимости получения образцов сложной формы, имеющей изломы, отверстия, места перегибов и др. Таким образом, еще до окончания технологического процесса, т. е. спекания КК, возможно их механическое формообразование, например, получение пазов или отверстий различной формы. Такие операции крайне затруднительно проводить с уже спеченными заготовками ввиду необходимости использования дорогостоящих режущих инструментов или применения высокоэнергетических методов обработки, таких как лазерная или гидроабразивная резка.

Формование изделий из порошков может осуществляться по разным технологиям: литьем под давлением, изостатическим, статическим, гидродинамическим и импульсным прессованием [4].

Путем статического прессования шихты на основе бемита или с его добавками в порошки глинозема или корунда достигнута прочность формовок до 5,2 МПа. При этом формовки всех исследуемых составов прессовались без временного связующего. Наряду с модифицирующим эффектом от введения в керамическую шихту нанодисперсного порошка бемита установлен его активирующий эффект, так как температура спекания может быть снижена на 120...150 °С.

По сравнению с обычными порошками исследуемые порошки обладают большей адгезионной (аутогезионной) активностью, что приводит к повышенной склонности к агрегированию. Каждая частица находится под действием системы внутренних и внешних сил, обусловленных прилагаемыми извне нагрузками и гравитационными силами. Внутренние поля создаются межчастичными силами, связанными со структурными компонентами материала, т. е. отдельными нано- и ультрадисперсными частицами. Следует отметить, что плотность прессовок из конгломератов ультрадисперсного порошка $AlOOH$ ($d_{cp} \leq 1,3$ мкм) мало зависит от давления (изменяется всего на 0,5 %).

При импульсном прессовании достигается большая плотность при более мелкозернистой

структуре, благодаря передаче агломератам из наночастиц кинетической энергии, которая, в свою очередь, приводит к деградации межчастичных связей в самом агломерате (рис. 1).

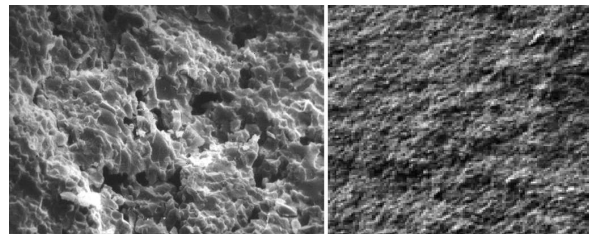


Рис. 1. Морфология поверхности излома образцов из бемита, полученных:

a — методом гидродинамического прессования;
б — методом импульсного прессования

Предложенная композиция КК, использующая в своем составе наноразмерный порошок бемита, обладает высокими динамическими свойствами: твердость, пористость, прочность, зернистость, трещиностойкость и др. Оценка качества пластин, подвергаемых такого рода нагрузкам, в настоящее время проводится с помощью испытаний с применением высокоскоростного воздействия твердотельных ударников по критерию пробитие — непробитие. Наряду с высокой достоверностью результатов у данного метода есть существенные недостатки, обусловленные особыми условиями испытаний, высокими затратами материально-технических и временных ресурсов. Поиск более информативных, менее затратных и быстрых методов оценки эксплуатационных характеристик КК является актуальной и значимой задачей. Особо остро эта проблема проявляется на этапе обработки технологического процесса производства КК, когда требуется проанализировать выходные динамические характеристики в зависимости от изменения одного или нескольких технологических параметров, например, концентрации нанодобавок, времени перемешивания, температуры спекания и т. д. При этом актуальна потребность в применении лабораторного метода динамических испытаний КК.

Экспресс-контроль качества композиционной КК методом ультраструйной диагностики. Одними из информативных параметров ультраструйной диагностики (УСД) являются результаты эрозионного разрушения ультраструей

контролируемой КК [5—8], например, геометрические размеры и форма гидрокаверны, керамических частиц, отделившихся от поверхности исследуемого образца, изменения массы образцов до и после ультразвучного воздействия (унос массы) [9—13]. При этом процесс УСД использует в своей основе оборудование для гидроабразивного резания материалов, применяемое для решения широкого спектра задач современного машиностроения [14—16].

В результате ультразвучного воздействия на поверхности образцов образовывались эрозионные гидрокаверны, размер и форма которых коррелируют на качественном уровне с физико-механическими свойствами материала. Так, например, в материалах с большим количеством внутренних дефектов края гидрокаверны сильно выкрашиваются, образуются крупные сколы материала, сопровождающиеся сравнительно высоким уносом массы. В сочетании с данными о значениях акустической эмиссии (АЭ), т. е. уровня сигнала при возникновении и распространении волн упругих колебаний (акустических волн), во время деформации напряженного образца из КК может быть получена объективная картина качественных и эксплуатационных характеристик данного материала.

В качестве иллюстрации на рис. 2 представлены результаты УСД КК и изображения морфологии изломов в месте эрозионного выкрашивания материала с поверхности.

Расчеты коэффициента корреляции между значениями уноса массы и энергией электрического сигнала АЭ — MARSE (Measured area of the rectified signal envelope) позволили установить значение взаимной корреляции

$r = 0,95$, демонстрирующее эффективность предложенного способа диагностики с использованием ультразвуковой технологии. При этом полученные данные совпадали с результатами испытаний с применением твердотельного высокоскоростного сердечника.

С практической точки зрения предложенный метод УСД позволил достаточно оперативно и в лабораторных условиях определить оптимальное процентное содержание нанопорошка бемита в общей массе оксида алюминия. В ходе экспериментов установлено, что данное значение колеблется в пределах $(10 \pm 2) \%$. Под критерием эффективности принималась динамическая прочность КК.

Подтверждение того, что метод УСД может выступать как альтернатива существующему методу динамических баллистических испытаний было получено в результате изучения морфологии поверхности образцов КК, специально изготовленных для серии сравнительных экспериментов. Целью этих исследований являлось установление соответствия между микроморфологией поверхности КК на сколах, образовавшихся в результате воздействия высокоскоростной струи жидкости (УСД) (образец № 1), изломов, полученных после разрушения под действием статической изгибающей нагрузки (образец № 2) (рис. 3—5) и удара твердотельного металлического сердечника (образец № 3).

Из анализа полученных результатов (см. рис. 3—5) следует вывод, что образцы № 1 и № 3 практически не отличаются по характеру микроморфологии сколов на образцах КК за исключением весьма локальных участков до-

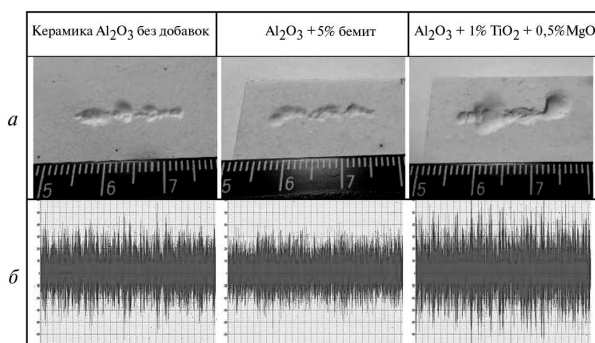


Рис. 2. Образцы КК после УСД:
а — гидрокаверны; б — параметры АЭ

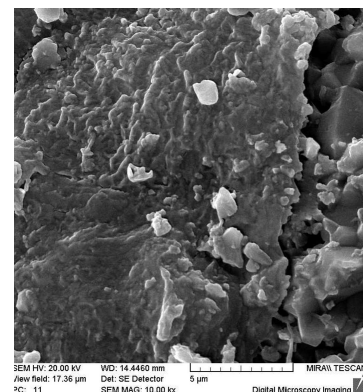


Рис. 3. Морфология места эрозии поверхности в результате воздействия высокоскоростной струи жидкости (образец № 1)

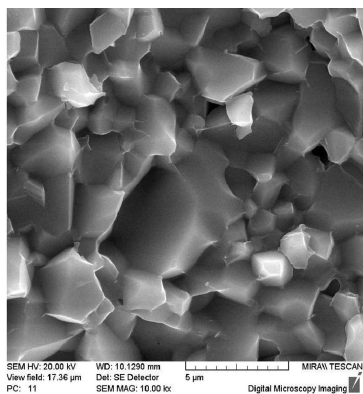


Рис. 4. Морфология излома после действия статической изгибной нагрузки (образец № 2)

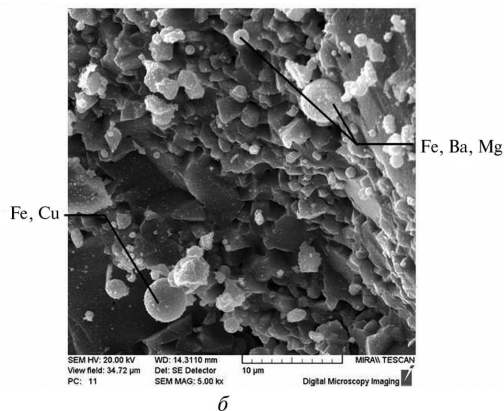
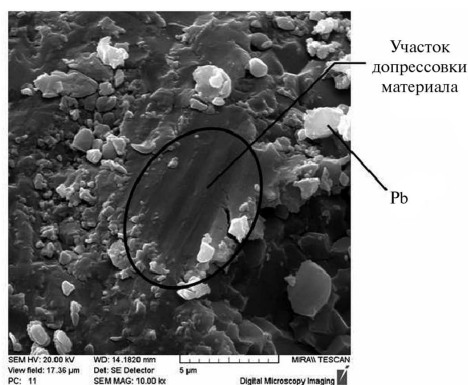


Рис. 5. Морфология скола КК после высокоскоростного воздействия металлического ударника (образец № 3):

a — $\times 10\,000$; *b* — $\times 5\,000$

прессовки данного материала. Образование этих участков очевидно обусловлено механическим воздействием ударника, их отличительной особенностью является наличие на поверхности микрочастиц металлов сердечника, в частности железа, меди, свинца, магния, бария.

Образец № 2 принципиальным образом отличается как по микро-, так и по макроморфологии скола, что свидетельствует о его принци-

пиально ином характере разрушения. Этот факт, по сути, ставит под сомнение возможность использования статических методов испытаний КК для последующей оценки динамических баллистических свойств данного материала.

Дополнительным подтверждением возможности использования УСД для оценки баллистических характеристик КК являются вполне соизмеримые значения напряжений в месте удара высокоскоростной ультраструи и металлического ударника, полученные авторами в результате математического моделирования методом конечных элементов.

Выводы

1. Доказано, что метод УСД может быть эффективно использован на этапе технологической подготовки производства изделий из КК.
2. Применение метода УСД позволит существенно сократить время испытаний КК, снизить материально-технические затраты при сохранении высоких показателей достоверности результатов диагностики.

3. Технология производства КК, использующая наноразмерный порошок бемита, позволяет заметно повысить ряд эксплуатационных показателей изделий, в производстве которых используется данный материал.

4. Перспективами исследований является изготовление образцов КК, в состав которых войдут различные вариации микро- и нанопорошков металлов и сплавов, в том числе полученных на основе метода ультраструйного суспензирования [7].

Следует предположить, что экспресс-возможности УСД КК и представленная технология получения КК из наноразмерного порошка бемита обеспечат расширение сферы их применения и будут способствовать продолжению научно-методических исследований в этой сфере.

Литература

- [1] Витязь П.А., Ильющенко А.Ф., Судник Л.В., Мазалов Ю.А., Берш А.В. *Функциональные материалы на основе гидроксида алюминия*. Минск, Беларуская навука, 2010, 184 с.
- [2] Судник Л.В., Ильющенко А.Ф., Нисс В.С., Подденежный Е.Н., Бойко А.А., Гайшун В.Е., Семченко А.В. Технологические особенности получения наноструктурированных керамических порошков. *Респ. межвед. сб. науч. тр. Порошковая металлургия*. Минск, Беларуская навука, вып. 34, 2011, с. 70–78.
- [3] Горанский Г.Г., Судник Л.В., Шелегов В.И. *Термобарические методы получения тугоплавкой керамики*. Минск, БелНИИНТИ, 1991, 62 с.
- [4] Быков А.И., Гриднева И.В. Взаимодействие карбида бора с карбидами титана и циркония под давлением. *Порошковая металлургия*, 1998, № 1–2, с. 52–55.

[5] Барзов А.А., Галиновский А.Л., Пузаков В.С. *Ультразвуковые технологии жидкостей и суспензий*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009, 250 с.

[6] Барзов А.А., Галиновский А.Л. *Технология ультразвуковой обработки и диагностики материалов*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009, 246 с.

[7] Барзов А.А. *Эмиссионная технологическая диагностика*, Москва, Машиностроение, 2005, 384 с.

[8] Балашов О.Е., Барзов А.А., Галиновский А.Л., Литвин Н.К., Сысоев Н.Н., Шашурин В.Д. *Ультразвуковая технология получения микросуспензий*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011, 352 с.

[9] Коваленко В.И., Маринин В.Г. *Разрушение керамики при воздействии кавитации*. ХФТИ АН УССР. Препринт. Харьков, 1968, ХФТИ 88/65, 7 с.

[10] Галкин Д.И. *Разработка методики безобразцовой экспресс-диагностики поврежденности металла эксплуатируемых магистральных нефтепроводов на основе метода акустической эмиссии*. Автореф. дис. ... канд. техн. наук, Москва, 2011, 16 с.

[11] Горицкий В.М. *Диагностика металлов*. Москва, Металлургия, 2004, 408 с.

[12] Tönshoff H.K., Jung M., Männel S., Rietz W. Using acoustic emission signals for monitoring of production process. *Ultrasonics*, 2000, vol. 37, pp. 681–686.

[13] А. с. 1375994 СССР, МПК G01N3/42. *Способ оценки твердости материалов*, Камалов В.С., Барзов А.А., Вдовин А.А., Зарубина О.В. № 4053010, заявл. 20.02.1986; опубл. 23.02.1988, Бюл. № 12. Изобретения.

[14] Adler W.F. Analytical modeling of liquid and solid particle erosion. *Air Force Materials Laboratory*, 1973, may, pp. 73–174.

[15] El-Domiati A., Abdel-Rahman A. Fracture mechanics-based model of abrasive waterjet cutting for brittle materials. *J Adv Manuf Technol*, 1997, vol. 13, issue 3, pp. 172–181.

[16] Aydin G., Karakurt I., Aydin K. An investigation on surface roughness of granite machined by abrasive waterjet. *Bull Mater Sci*, 2011, vol. 34, pp. 985–992.

References

[1] Vitiaz' P.A., Pi'ushchenko A.F., Sudnik L.V., Mazalov Iu.A., Bersh A.V. *Funktional'nye materialy na osnove gidroksida aliuminiia* [Functional materials based on aluminum hydroxide]. Minsk, Belarusaika navuka publ., 2010. 184 p.

[2] Sudnik L.V., Pi'ushchenko A.F., Niss V.S., Poddenezhnyi E.N., Boiko A.A., Gaishun V.E., Semchenko A.V. *Tekhnologicheskie osobennosti polucheniia nanostrukturirovannykh keramicheskikh poroshkov* [Technological features of the preparation of nanostructured ceramic powders]. *Respublikanskii mezhvedomstvennyi sbornik nauchnykh trudov Poroshkovaia metallurgii* [National Interagency collection of scientific papers Powder Metallurgy]. Minsk, Belarusaika navuka publ., issue 34, 2011, pp. 70–78.

[3] Goranskii G.G., Sudnik L.V., Shelegov V.I. *Termobaricheskie metody polucheniia tugoplavkoi keramiki* [Thermobaric methods for refractory ceramics]. Minsk, BelNIINTI publ., 1991. 62 p.

[4] Bykov A.I., Gridneva I.V. Vzaimodeistvie karbida bora s karbidami titana i tsirkoniia pod davleniem [Interaction of boron carbide and zirconium carbide titanium pressure]. *Poroshkovaia metallurgii* [Powder Metallurgy and Metal Ceramics]. 1998, no. 1–2, pp. 52–55.

[5] Barzov A.A., Galinovskii A.L., Puzakov V.S. *Ul'trazvukovye tekhnologii zhidkostei i suspenzii* [Ultrasound technology liquids and slurries]. Moscow, Bauman Press, 2009. 250 p.

[6] Barzov A.A., Galinovskii A.L. *Tekhnologii ul'trazvukovoi obrabotki i diagnostiki materialov* [Technology ultrasound treatment and diagnostic materials]. Moscow, Bauman Press, 2009. 246 p.

[7] Barzov A.A. *Emisisonnaia tekhnologicheskai diagnostika* [The emission process diagnostics]. Moscow, Mashinostroenie publ., 2005. 384 p.

[8] Balashov O.E., Barzov A.A., Galinovskii A.L., Litvin N.K., Sysoev N.N., Shashurin V.D. *Ul'trazvukovai tekhnologii polucheniia mikrosuspenzii* [Ultrasound technology for microsusensions]. Moscow, Bauman Press, 2011. 352 p.

[9] Kovalenko V.I., Marinin V.G. *Razrushenie keramiki pri vozdeistvii kavitatsii* [Destruction of ceramics under the influence of cavitation]. KhFTI AN USSR publ., Preprint, Khar'kov, 1968, KhFTI 88/65, 7 p.

[10] Galkin D.I. *Razrabotka metodiki bezobraztsvoi ekspress-diagnostiki povrezhdennosti metalla ekspluatiruemyykh magistral'nykh nefteprovodov na osnove metoda akusticheskoi emissii*. Avtoreferat diss. kand. tekhn. nauk [Development of methodology for rapid diagnosis bezobraztsvoy damage metal trunk pipelines operated on the basis of the acoustic emission method. Abstract cand. techn. sci. diss.], Moscow, 2011. 16 p.

[11] Goritskii V.M. *Diagnostika metallov* [Diagnosis of metals]. Moscow, Metallurgizdat publ., 2004. 408 p.

[12] Tönshoff H.K., Jung M., Männel S., Rietz W. Using acoustic emission signals for monitoring of production process. *Ultrasonics*, 2000, vol. 37, pp. 681–686.

[13] Kamalov V.S., Barzov A.A., Vdovin A.A., Zarubina O.V. *Sposob otsenki tverdosti materialov* [A method of estimating the hardness of materials]. Certificate of authorship 1375994 USSR, MPK G01N3/42, no. 4053010, 1986.

[14] Adler W.F. *Analytical modeling of liquid and solid particle erosion*. Air Force Materials Laboratory, 1973. Pp. 73–174.

[15] El-Domiati A., Abdel-Rahman A. Fracture mechanics-based model of abrasive waterjet cutting for brittle materials. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1997, vol. 13, issue 3, pp. 172–181.

[16] Aydin G., Karakurt I., Aydin K. An investigation on surface roughness of granite machined by abrasive waterjet. *Bulletin of Materials Science*, 2011, vol. 34, pp. 985–992.

Статья поступила в редакцию 11.06.2013

Информация об авторах

ГАЛИНОВСКИЙ Андрей Леонидович (Москва) — кандидат технических наук, доктор педагогических наук, доцент, профессор кафедры «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).

МУЛЯР Сергей Геннадьевич (Москва) — аспирант кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр.1, e-mail: m_servey@inbox.ru).

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

Information about the authors

GALINOVSKIY Andrey Leonidovich (Moscow) — Cand. Sc. (Eng.), Dr. Sc. (Pedag.), Associate Professor, Professor of «Technology of Rocket-and-Space Engineering» Department. Bauman Moscow State Technical University (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation, e-mail: galcomputer@mail.ru).

MULYAR Sergey Gennad'evich (Moscow) — Post-Graduate of «Technology of Rocket-and-Space Engineering» Department. Bauman Moscow State Technical University (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation, e-mail: m_servey@inbox.ru).

SUDNIK Larisa Vladimirovna (Minsk) — Dr. Sc. (Eng.), Director of Research Institute of Pulse Processes with Pilot Production (Platonova st., 12b, 220005, Minsk, Republic of Belarus, e-mail: impuls@bn.by).