

05

## **Прочностные свойства полученной с применением аддитивной технологии керамики на основе оксида алюминия при ударно-волновом нагружении**

© В.В. Промахов<sup>1</sup>, А.С. Савиных<sup>1,2</sup>, Я.А. Дубкова<sup>1</sup>, Н.А. Шульц<sup>1</sup>,  
Н.В. Грунт<sup>1</sup>, С.В. Разоренов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

<sup>2</sup> Институт проблем химической физики РАН, Черноголовка, Московская обл., Россия

E-mail: vvromakhov@mail.ru

Поступило в Редакцию 18 мая 2018 г.

С помощью аддитивной технологии с последующим спеканием получены керамические образцы на основе оксида алюминия. Путем анализа полных волновых профилей образцов, зарегистрированных с помощью лазерного интерферометра в процессе их ударного сжатия амплитудой 6.8 и 13.8 GPa, определены динамический предел упругости и откольная прочность керамики.

DOI: 10.21883/PJTF.2018.19.46688.17393

В настоящее время для создания сложных инженерных изделий и конструкций широкое развитие получили аддитивные технологии. Основное отличие аддитивных технологий от традиционных методов получения изделий заключается в том, что модель (деталь или изделие) создается наращиванием тела изделия при точном объемном (3D) воспроизведении формы независимо от ее сложности. Широкое внедрение аддитивных технологий в производственный процесс может обеспечить революционный прорыв в промышленности, прежде всего потому, что аддитивные технологии позволяют с минимальными затратами реализовать любые конструкторские и инженерные идеи в наукоемких отраслях производства, таких как авиастроение, двигателестроение, ракетостроение, современные электронные приборы и др.

Аддитивные технологии находятся на стадии понимания границ применимости материалов и изделий, полученных с их помощью. В связи с этим весьма актуальны вопросы о прочностных свойствах таких материалов при различных условиях внешних воздействий. Разработанные в Томском государственном университете технические решения позволяют создавать (печатать) изделия из технической керамики заданной геометрии. В настоящее время реализованы методы печати из оксидных керамических материалов, в частности из оксида алюминия. На их основе, например, появилась возможность создавать ячеистые сэндвич-панели с сотовой структурой, предназначенные для теплозащиты и защиты от микрометеоритов современных космических устройств. Параметры таких панелей предполагают рабочие температуры до 2000°С в условиях воздействия высокоскоростными потоками плотностью не более 0,8 г/см<sup>3</sup>.

Для достижения высокой эффективности таких керамических материалов, применяемых в изделиях и конструкциях, подверженных высокоскоростной интенсивной деформации, необходима детальная информация об их прочностных свойствах в условиях динамического деформирования и разрушения. Она необходима также для построения адекватных моделей разрушения новых аддитивных материалов и конструкций, правильно описывающих весь спектр явлений, сопровождающих их динамическое разрушение. Построение адекватной модели невозможно без экспериментальных исследований процесса разрушения материалов в субмикросекундном диапазоне динамических воздействий. Такая информация может быть актуальна при решении задач защиты космических аппаратов от ударов микрометеоритов и экстремальных тепловых воздействий при прохождении ими, например, через пылевые облака в непосредственной близости от ядра кометы. Оценки показывают, что при этом можно ожидать столкновений с пылевыми частицами, имеющими массу  $10^{-1}$ – $10^{-3}$  г и скорость относительно аппарата 60–80 км/с [1,2].

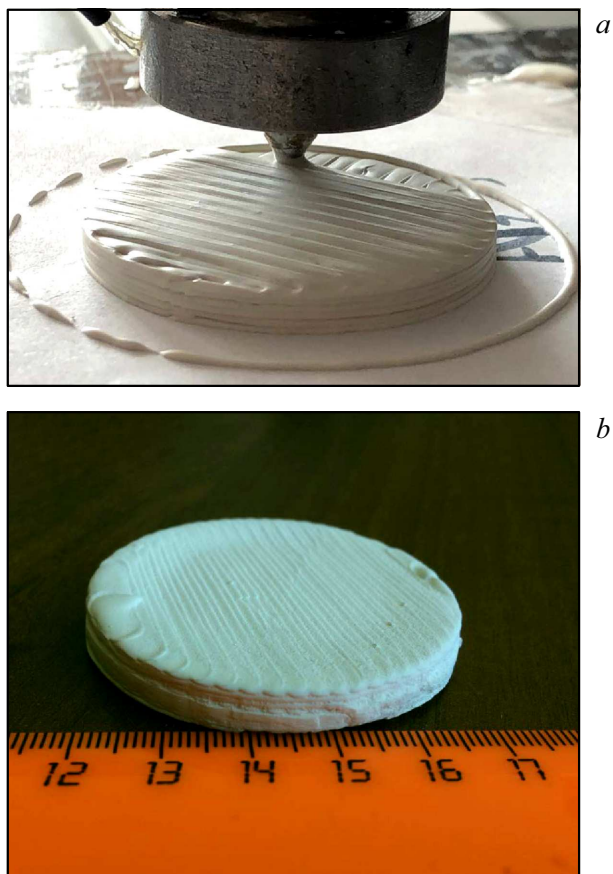
Задачей настоящей работы является исследование прочностных свойств при ударно-волновом нагружении керамики на основе оксида алюминия, полученной с применением аддитивной технологии.

Для 3D-печати керамических образцов использовалось устройство, описанное в работе [3], требуемая геометрия детали проектировалась в системе САД (computer-aided design). Изготовление образцов необходимой формы из термопластичной суспензии (смеси керамических

порошков и термопластичного связующего) осуществлялось послойно методом наплавления. На рис. 1, *a* представлена фотография процесса послойного наплавления термопластичной высоконаполненной суспензии из керамических порошков на основе оксида алюминия, на рис. 1, *b* — снимок полученного образца. После формования полуфабриката с целью удаления связующего заготовка отжигалась в воздушной печи при температуре  $1100^{\circ}\text{C}$ , затем проводилось высокотемпературное спекание образцов при  $1700^{\circ}\text{C}$  в течение часа. Исследования структуры полученных образцов керамики проводились с использованием растрового электронного микроскопа PHILIPS SEM 515 и электронного микроскопа системы QUANTA 3D. Исследования структуры полученных образцов керамики на основе оксида алюминия показали, что после спекания в образцах присутствует остаточная пористость около 7–10%. Средний размер зерен оксида алюминия составлял  $\sim 7\ \mu\text{m}$  (рис. 2, *a*). Установлено, что после спекания образцов контролируемая высота слоя составила около  $400\ \mu\text{m}$ . Особое значение имеет результат, свидетельствующий о том, что внутренняя структура керамики монолитна, не было зафиксировано различимых границ между слоями материала в образцах (рис. 2, *b*).

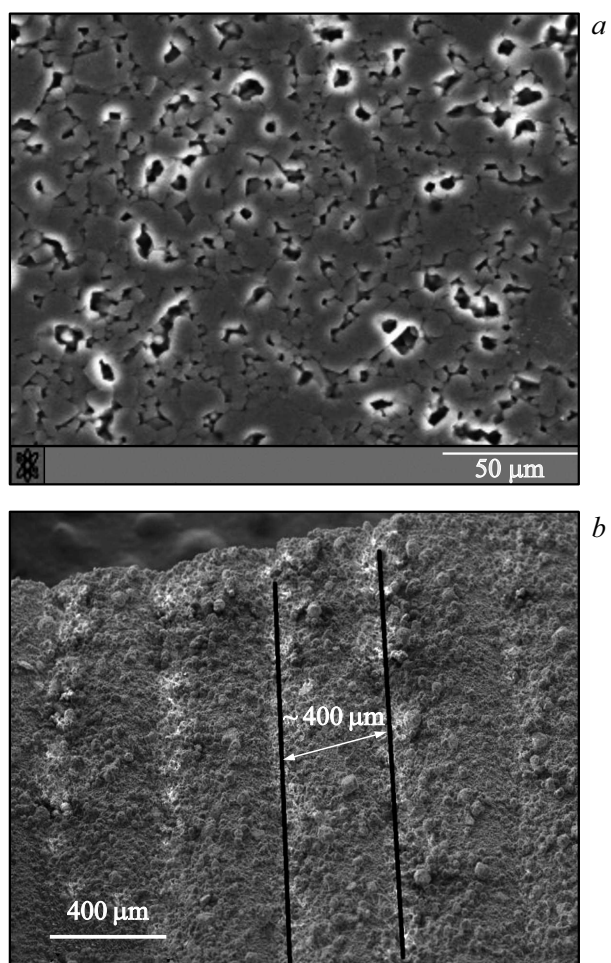
Прочностные свойства керамики на основе оксида алюминия, полученной с применением аддитивных технологий, при динамическом нагружении изучались с использованием техники ударно-волнового эксперимента [4]. При измерениях использовался тот факт, что структура ударной волны и динамика волновых взаимодействий в исследуемом материале определяются помимо термодинамического уравнения состояния вещества процессами упругопластического деформирования и разрушения в материале. В работе регистрировались профили скорости свободной поверхности образцов в процессе ударного сжатия с последующим расчетом динамического предела упругости (HEL) и критических растягивающих напряжений (откольной прочности).

Исследуемые образцы керамики оксида алюминия представляли собой шлифованные с обеих сторон диски диаметром 35 mm с номинальной толщиной 5 mm. Измеренная гидростатическим методом плотность составила  $3.5\ \text{g/cm}^3$ , среднее значение продольной скорости звука —  $8.6 \pm 0.15\ \text{km/s}$ . Плоские волны сжатия в исследуемых образцах генерировались ударом алюминиевой пластины-ударника толщиной 2 mm, разогнанной до скорости  $0.66 \pm 0.03$  и  $1.8 \pm 0.05\ \text{km/s}$  с использованием взрывных устройств [4]. Образцы размещались на



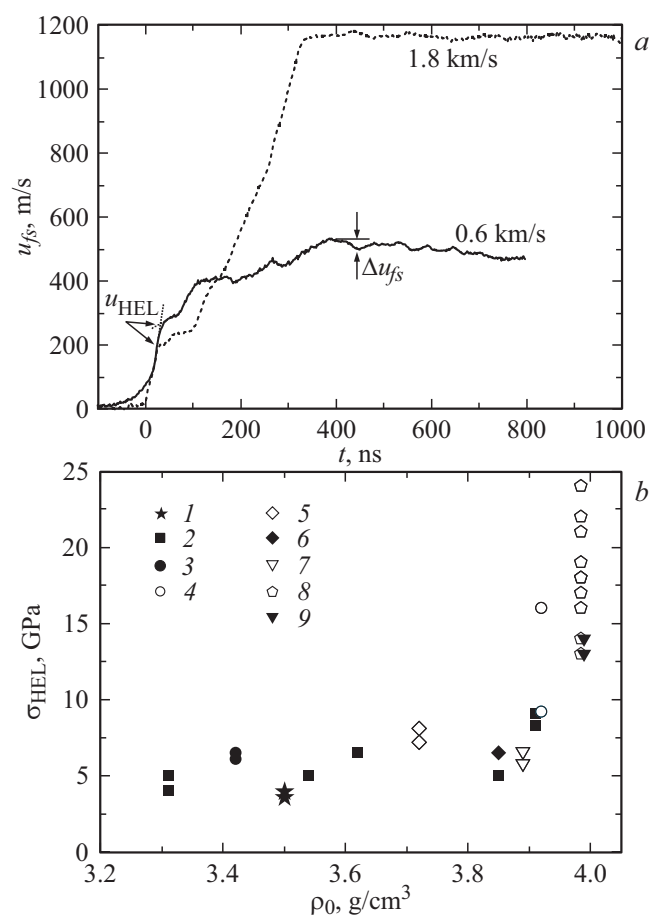
**Рис. 1.** *a* — изображение процесса 3D-печати образцов из керамики на основе оксида алюминия, *b* — фотография полученного образца.

алюминиевых экранах толщиной 2 mm. Во всех экспериментах с помощью лазерного доплеровского измерителя скорости VISAR [5] регистрировались профили скорости свободной поверхности  $u_{fs}(t)$ . Для отражения лазерного излучения на поверхность образца путем вакуумного напыления наносилось отражающее покрытие из алюминия толщиной несколько микрон.



**Рис. 2.** Структура керамики (снимки получены с применением растровой электронной микроскопии). *a* — зеренная структура материалов, *b* — торцевая поверхность образцов (линиями обозначены границы одного печатного слоя).

На рис. 3, *a* представлены профили свободной поверхности исследуемых образцов керамики оксида алюминия. В обоих случаях фиксируется



**Рис. 3.** Результаты ударно-волнового нагружения керамических образцов, полученных с применением аддитивной технологии. *a* — профили скорости свободной поверхности (указаны скорости ударников). *b* — динамический предел упругости керамики оксида алюминия в сопоставлении с литературными данными. 1 — данные настоящей работы, 2 — ENSCI [6] (размер зерна слева направо: 0.6, 1, 11, 5–125, 4.7  $\mu\text{m}$ ), 3 — AD-85 [7], 4 — горячепрессованный Carborundum Co. [7], 5 — Diamonite P-3142-1 [7], 6 — спеченный В6 [8], 7 — AD-995 [9], 8 — монокристаллический сапфир различных ориентаций [10], 9 — D999 [11].

выход на поверхность упругой и пластической волн сжатия. В пластической волне рост скорости происходит ступенчато. Такая структура пластической волны связана с неоднородностью объемной структуры, наличием пор и других дефектов. Четкий переход от упругого к пластическому сжатию не регистрируется, поэтому величина динамического предела упругости  $\sigma_{HEL}$  определялась экстраполяцией скорости поверхности за фронтом предвестника к нулевому моменту времени, как это показано на рис. 3, *a* пунктирными линиями. По найденному таким способом значению  $u_{HEL}$  величина  $\sigma_{HEL}$  рассчитывается как  $\sigma_{HEL} = \rho_0 c_l u_{HEL} / 2$ , где  $\rho_0$  — плотность,  $c_l$  — продольная скорость звука. Результаты измерений динамического предела упругости суммированы на рис. 3, *b*, где они сопоставлены с имеющимися данными для других керамик на основе окиси алюминия. Видно, что полученные значения  $\sigma_{HEL}$  для исследованной керамики лежат в нижней части массива точек, взятых из литературы.

На профилях скорости свободной поверхности фиксируется только начальная часть волны разрежения, распространяющейся вслед за волной сжатия, ограниченная величиной откольной прочности  $\sigma_{sp}$ . Ее значение для исследуемой керамики оценивалось по измеренной величине  $\Delta u_{fs}$  как  $\sigma_{sp} = \rho_0 c_l \Delta u_{fs} / 2$  [4]. Найденные значения  $\sigma_{sp}$  при скорости удара 1.8 km/s, что соответствует максимальному напряжению ударного сжатия 13.8 GPa, составили 0.38 GPa, при скорости удара 0.6 km/s (6.8 GPa) — 0.44 GPa. Максимальные напряжения ударного сжатия превышают значения  $\sigma_{HEL}$  в 3.8 и 1.8 раза соответственно. Следует отметить, что при превышении динамического предела упругости значения  $\sigma_{sp}$  исследованной керамики значительно больше нуля. Например, в работе [11] проведены измерения  $\sigma_{sp}$  керамики AD-85 и показано, что при максимальных напряжениях сжатия, равных  $\sigma_{HEL}$ , значение откольной прочности принимает нулевое значение. Для керамики AD-995, исследовавшейся в работе [12], нулевые значения откольной прочности регистрируются при максимальных напряжениях сжатия, превышающих  $\sigma_{HEL}$  более чем в 1.5–1.7 раза. Значения откольной прочности керамик при максимальном ударном сжатии выше  $\sigma_{HEL}$ , измеренные в работах [11,12], лежат в диапазоне от 0.3 до 0.6 GPa. Вероятно, с началом пластической деформации вблизи предела упругости происходит растрескивание по границам зерен, в то время как уплотнение пористой керамики при высоких давлениях ударного сжатия сопровождается усилением межзеренных связей. В связи с этим,

можно отметить, что установление прочных связей между частицами пористого материала непосредственно в процессе его уплотнения в ударной волне ранее наблюдалось в экспериментах с порошкообразным алюминием [13].

Регистрация профилей скорости свободной поверхности образцов керамик  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , полученных с применением аддитивных технологий, в процессе ударного сжатия позволила определить динамический предел упругости ( $\sigma_{\text{HEL}}$ ) и откольную прочность материала ( $\sigma_{sp}$ ). Значение  $\sigma_{\text{HEL}}$  для исследованной керамики коррелирует с данными для керамик близкой плотности и составляет от 3.5 до 4 ГПа. Измерение величины  $\sigma_{sp}$  проводилось в диапазоне максимальных напряжений сжатия, превышающих  $\sigma_{\text{HEL}}$  в 3.8 и в 1.8 раза. Полученные значения откольной прочности равны 0.38 и 0.44 ГПа соответственно и слабо зависят от максимального напряжения сжатия.

Часть исследований по разработке научно-технических подходов 3D-печати керамики выполнена при поддержке Программы повышения конкурентоспособности ТГУ, исследования по получению образцов и их ударно-волновому нагружению выполнены в рамках гранта РФФИ № 17-38-50126 мол\_нр с использованием оборудования Московского регионального взрывного центра коллективного пользования РАН.

## Список литературы

- [1] Reinhardt R. // ESA Bull. 1982. N 29. P. 68–83.
- [2] Агурейкин В.А., Анисимов С.И., Бушман А.В., Канель Г.И., Карягин В.П., Константинов А.Б., Крюков Б.П., Минин В.Ф., Разоренов С.В., Сагдеев Р.З., Сугак С.Г., Фортвов В.Е. // ТВТ. 1984. Т. 22. № 5. С. 964–983.
- [3] Промахов В.В., Жуков И.А., Ворожцов С.А., Шевченко М.В., Платов В.А., Архипов В.А., Муравлев Е.В. // Ползуновский вестник. 2016. Т. 1. № 4. С. 59–63.
- [4] Канель Г.И., Разоренов С.В., Уткин А.В., Фортвов В.Е. Ударно-волновые явления в конденсированных средах. М.: Янус-К, 1996. 408 с.
- [5] Asay J.R., Barker L.M. // J. Appl. Phys. 1974. V. 45. N 6. P. 2540–2546.
- [6] Longy F., Cagnoux J. // J. Am. Ceram. Soc. 1989. V. 72. N 6. P. 971–979.
- [7] Gust W.H., Royce E.B. // J. Appl. Phys. 1971. V. 42. N 1. P. 276–295.
- [8] Savinykh A.S., Kanel G.I., Razorenov S.V., Rajendran A. // AIP Conf. Proc. 2006. V. 845. N 1. P. 888–891.



- [9] *Grady D.E.* // High-pressure science and technology. N.Y.: American Institute of Physics, 1994. P. 741–744.
- [10] *Kanel G.I., Nellis W.J., Savinykh A.S., Razorenov S.V., Rajendran A.M.* // J. Appl. Phys. 2009. V. 106. N 4. P. 043524.
- [11] *Murray N.H., Bourne N.K., Rosenberg Z.* // Shock compression of condensed matter. N.Y.: American Institute of Physics, 1996. P. 491–494.
- [12] *Dandekar D.P., Bartkowski P.* // High-pressure science and technology. N.Y.: American Institute of Physics, 1994. P. 733–736.
- [13] *Дремин А.Н., Канель Г.И., Молодец А.М.* // Физика горения и взрыва. 1972. Т. 8. № 2. С. 283–290.