

05

## Затухание упругого предвестника и откол в беспористой керамике карбида вольфрама

© А.С. Савиных,<sup>1,2</sup> И.А. Черепанов,<sup>3</sup> С.В. Разоренов,<sup>1,2</sup> К. Mandel,<sup>4</sup> L. Krüger<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Институт проблем химической физики РАН,  
142432 Черноголовка, Россия

<sup>2</sup> Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
634050 Томск, Россия

<sup>3</sup> Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,  
119991 Москва, Россия

<sup>4</sup> Технический университет „Фрайбергская горная академия“,  
09599 Фрайберг, Германия  
e-mail: savas@icp.ac.ru

(Поступило в Редакцию 4 июля 2018 г.)

С целью определения возможного вклада релаксационных процессов в сопротивление высокоскоростному деформированию проведены измерения эволюции волн ударного сжатия в керамике карбида вольфрама (WC), изготовленной методом плазменного искрового спекания при максимальном напряжении сжатия 27 GPa. Выявлено сильное затухание упругого предвестника при изменении толщины образцов от 0.15 до 4 mm. При максимальных напряжениях ударного сжатия, в 2 раза превышающих динамический предел упругости, регистрируется уменьшение величины откольной прочности на ~ 30% от ее значения в упругой области.

DOI: 10.21883/JTF.2019.03.47174.263-18

### Введение

Высокотвердые керамики наряду с широким применением в различных отраслях промышленности часто используются в условиях, сопряженных с интенсивными ударными воздействиями. В силу дороговизны сложных керамических изделий актуальным становится прогнозирование результатов ударных воздействий методами компьютерного моделирования. Для построения адекватных моделей и определяющих соотношений, описывающих сопротивление высокоскоростному деформированию и разрушению в условиях высокоскоростного удара, важно, в частности, правильно оценить вклад релаксации напряжений в этом временном диапазоне.

В обзоре [1] суммированы данные о затухании динамического предела упругости высокотвердых хрупких материалов. Согласно этой работе, в плосковолновых экспериментах с керамикой карбида бора регистрируется затухание упругого предвестника с релаксацией напряжений за его фронтом, в доломите обнаружено незначительное затухание, плотный известняк демонстрирует незначительное или отсутствие затухания. Незначительное затухание упругого предвестника обнаружено и в экспериментах с кварцитом [2] и керамикой оксида алюминия [3]. В работе [4] показано отсутствие зависимости динамического предела упругости керамики оксида алюминия от толщины образца.

Эксперименты с горячепрессованным бериллием S-200F [5] показали монотонное затухание его динамического предела упругости с 0.14 до 0.08 GPa на образцах толщиной от 4 до 8 mm. В недавней работе [6]

зарегистрировано затухание упругого предвестника в керамике оксида алюминия и найдено, что уменьшение толщины от 3 до 0.25 mm привело к возрастанию величины динамического предела упругости с 6.5 до 13 GPa при комнатной температуре образцов. Формирование зуба текучести в керамике оксида алюминия начинается при начальных температурах, превышающих 800 K, в образцах толщиной менее 3 mm.

В работе [7] проведены эксперименты по ударно-волновому нагружению керамики оксида алюминия, полученной методом плазменного искрового спекания. Показано, что динамический предел упругости исследованной керамики, измеренный для образцов толщиной от 0.28 до 6 mm, уменьшается с 21 до 12 GPa соответственно. Откольная прочность образцов толщиной 3 mm монотонно падает с ~ 1.5 до ~ 0.3 GPa при увеличении максимального напряжения сжатия до 29 GPa, превышающего динамический предел упругости более чем в 2 раза. Эксперименты с реакционно спеченной керамикой карбида кремния толщиной от 0.5 до 8.3 mm, результаты которых представлены в работе [8], не обнаруживают затухания упругого предвестника и показывают, что эволюция волны сжатия соответствует простой волне. Нужно отметить, что образцы, исследованные в этой работе, вырезались электроэрозионным методом практически без какого-либо влияния на их внутреннюю структуру.

В настоящей работе исследована эволюция волны сжатия по мере ее распространения в беспористой керамике карбида вольфрама. Подобные измерения для металлов и сплавов обычно демонстрируют затухание упругих

**Таблица 1.** Механические свойства исследованной керамики WC

$\rho_0$ , g/cm <sup>3</sup>	$\rho_{rel}$ , %	$c_s$ , m/s	$c_l$ , m/s	$\nu$	$E$ , GPa	$G$ , GPa	$d_{WC}$ , nm	HV 10	$K_{Ic}$ , MPa · m <sup>1/2</sup>
15.66	99.9	4384	7164	0.201	723	301	330	2690	6.7

*Примечание:* здесь  $\rho_0$  — измеренная плотность образцов,  $\rho_{rel}$  — отношение измеренной плотности к теоретической,  $c_s$  — сдвиговая скорость звука,  $c_l$  — продольная скорость звука,  $\nu$  — коэффициент Пуассона,  $E$ ,  $G$  — модуль Юнга и модуль сдвига,  $d_{WC}$  — средний размер зерна. HV 10 — твердость по Виккерсу,  $K_{Ic}$  — критический коэффициент интенсивности напряжений.

предвестников ударных волн, анализ которого дает сведения о начальной скорости релаксации напряжений и соответствующей скорости пластической деформации.

## Материал и постановка экспериментов

Беспористые образцы керамики карбида вольфрама были изготовлены путем спекания чистого порошка карбида вольфрама марки DN-4 (H.C. Starck, Germany) плазменно-искровым методом (в англоязычной литературе обозначаемый как SPS — Spark Plasma Sintering [9]) при температуре 1800°C в течение 3 min. По сравнению с традиционными методами метод SPS позволяет получать высококачественные спеченные материалы при меньших температурах и за меньшее время. В табл. 1 представлены механические свойства исследованной керамики. Методы определения механических свойств исследованной керамики карбида вольфрама подробно описаны в [10].

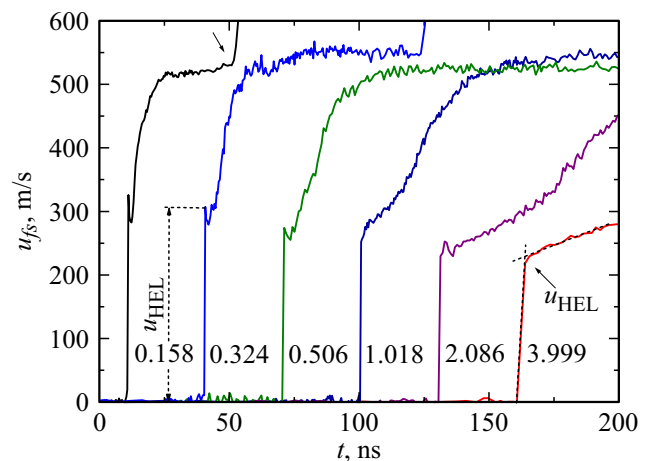
Исходные образцы карбида вольфрама представляли собой плоскопараллельные пластины толщиной 4 mm и диаметром 20 mm. Образцы для ударно-волновых экспериментов с номинальной толщиной 2, 1, 0.5, 0.3 и 0.15 mm вырезались из одной исходной пластины электроэрозионным методом и затем шлифовались. Экспериментальные данные для образцов толщиной 4 mm взяты из работы [10]. Образцы толщиной 4 mm, исследованные в работе [10], и образцы, из которых вырезались пластины меньшей толщины, были изготовлены одновременно и при одних и тех же условиях. Механические свойства изготовленных образцов толщиной 4 mm не изменялись от образца к образцу в пределах погрешности измерений. Поперечные размеры исследованных образцов были достаточными для обеспечения условия одномерной деформации в течение всего времени регистрации.

Нагружение образцов в экспериментах по определению динамического предела упругости проводилось ударом алюминиевой пластины толщиной 2 mm со скоростью  $1.8 \pm 0.05$  km/s через алюминиевый экран толщиной 2 mm, что соответствует максимальному напряжению ударного сжатия  $\sim 27$  GPa. Экран использовался для отсекающей воздушной волны, образующейся

перед летящим ударником. Метание ударников осуществлялось с применением взрывных устройств [11]. Для определения величины критических растягивающих напряжений, образцы нагружались ударом алюминиевой пластины толщиной 0.38 mm со скоростями  $0.62 \pm 0.03$ ,  $1.2 \pm 0.03$  km/s и толщиной 2 mm со скоростью  $1.8 \pm 0.05$  km/s. В процессе нагружения образцов с помощью лазерного доплеровского измерителя скорости VISAR [12], имеющего временное разрешение  $\sim 1$  ns, регистрировались профили скорости свободной поверхности  $u_{fs}(t)$ .

## Обсуждение результатов

На рис. 1 показаны измеренные профили скорости свободной поверхности образцов карбида вольфрама номинальной толщиной от 0.15 до 4 mm при ударе алюминиевой пластиной толщиной 2 mm со скоростью 1.8 km/s. На волновых профилях регистрируется выход на поверхность упругой ударной волны сжатия, который сопровождается формированием так называемого „зуба“ — ниспадающего профиля, связанного с интенсивным размножением дефектов дислокационного типа и выделением пластического фронта. Затем на поверхность выходит пластическая волна сжатия. На рисунке видно, что регистрируемое максимальное значение скорости свободной поверхности во фронте упругой волны  $u_{HEL}$  увеличивается с уменьшением толщины образца. Релаксация напряжений за фронтом упругого предвестника регистрируется не во всех экспериментах, наиболее отчетливо эффект релаксации наблюдается на образцах толщиной 0.5 mm и менее. Регистрируемые профили имеют хорошую воспроизводимость от опыта



**Рис. 1.** Профили скорости свободной поверхности образцов керамики карбида вольфрама толщиной от 0.15 до 4 mm при ударе алюминиевой пластиной толщиной 2 mm со скоростью 1.8 km/s. Цифрами указаны толщины образцов в миллиметрах, стрелкой на профиле скорости образца толщиной 0.158 mm показан выход на свободную поверхность переотраженной волны сжатия.

**Таблица 2.** Результаты экспериментов с образцами карбида вольфрама по измерению динамического предела упругости

$h, \text{mm}$	$u_{\text{HEL}}, \text{m/s}$	$\sigma_{\text{HEL}}, \text{GPa}$
0.158	325	18.18
0.164	314	17.57
0.315	311	17.41
0.324	304	17.01
0.506	274	15.34
0.505	275	15.39
1.018	264	14.77
2.086	240	13.46
3.995 [10]	232	13.01
3.999 [10]	227	12.68

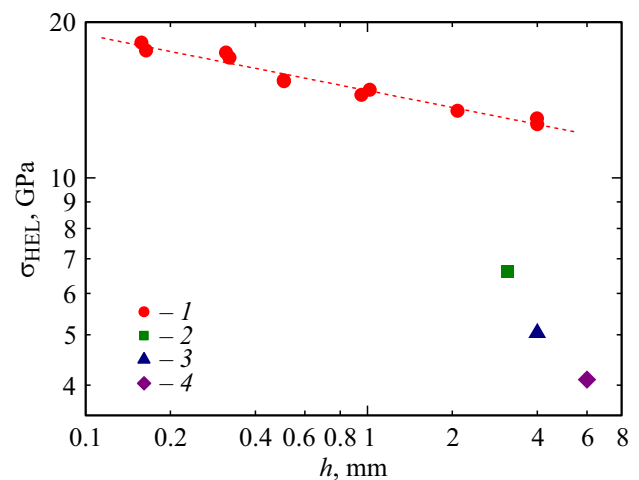
к опыту и отличаются отсутствием осцилляций, что свидетельствует о гомогенности деформирования в области пластического течения.

На волновых профилях для образцов толщиной меньше 2 mm регистрируется второй подъем скорости, вызванный переотражением волны разрежения от поверхности экран-образец. Так как динамический импеданс керамики WC выше, чем динамический импеданс алюминиевого экрана, отражение волны разрежения происходит с изменением ее знака, в результате чего переотраженная волна является волной сжатия. В лагранжевых координатах средние значения скорости фронтов волны разрежения, распространяющейся по сжатому материалу, и волны сжатия в разгруженном материале находятся в диапазоне  $7.56 \pm 0.1 \text{ km/s}$ , что несколько превышает продольную скорость звука при нулевом давлении. Данный факт косвенно свидетельствует о том, что материал не претерпевал разрушения в процессе одномерного сжатия и последующей разгрузки, поскольку наличие трещин и других деформационных дефектов оказывает значительное влияние на скорость распространения возмущений.

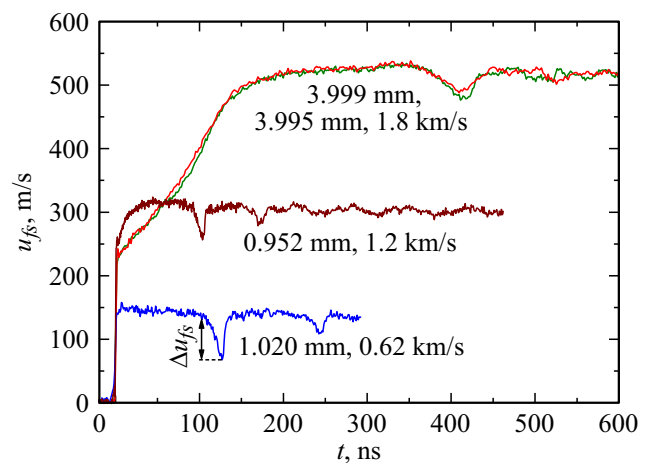
Значение динамического предела упругости  $\sigma_{\text{HEL}}$  вычислялось по измеренному профилю скорости свободной поверхности как  $\sigma_{\text{HEL}} = \rho_0 c_l u_{\text{HEL}}/2$  [11], где  $u_{\text{HEL}}$  — максимальное значение скорости свободной поверхности во фронте упругой волны сжатия (рис. 1). Полученные результаты представлены в табл. 2. На рис. 2 приведены результаты обработки волновых профилей, показанных на рис. 1, в виде зависимости динамического предела упругости от толщины образца в логарифмических координатах. Из рисунка видно, что значение динамического предела упругости керамики карбида вольфрама уменьшается экспоненциально с ростом пройденного упругой волной расстояния. При этом во всех случаях наблюдается небольшой разброс данных при одинаковых условиях экспериментов. Полученные данные по затуханию предвестников на рис. 2 могут быть с приемлемой точностью описаны степенным со-

отношением  $\sigma_{\text{HEL}} = S(h/h_0)^{-\alpha}$ , где  $h_0 = 1 \text{ mm}$ , а параметры  $S$  и  $\alpha$  составляют  $S = 14.72 \text{ GPa}$ ,  $\alpha = 0.107$ .

На рис. 2 полученные значения динамического предела упругости керамики WC также сопоставлены с литературными данными. В работе [13] исследовалось поведение керамики горячепрессованного карбида вольфрама при ударном сжатии. Измеренный динамический предел упругости для образцов толщиной от 3 до 6 mm оказался равен  $6.6 \pm 0.5 \text{ GPa}$ . Образцы толщиной 4 mm, полученные методом SPS, демонстрируют двукратное увеличение напряжения упругого сжатия по сравнению с горячепрессованными, что можно объяснить их меньшей пористостью. Введение добавок к керамике карбида вольфрама уменьшает ее  $\sigma_{\text{HEL}}$  более чем в 2 раза для



**Рис. 2.** Зависимость динамического предела упругости керамики WC от толщины образца: 1 — данные, полученные в настоящей работе; 2 — горячепрессованный WC, Cercom [13]; 3 — WC + Co (6%), SPS-метод [10]; 4 — WC + Co (5.7%) + Ta (1.9%) [14].



**Рис. 3.** Профили скорости свободной поверхности образцов керамики карбида вольфрама при ударе алюминиевой пластиной со скоростью 1.8 [10], 1.2 и 0.62 km/s. Цифрами указаны толщины образцов и скорость соударения алюминиевого ударника с образцом.

**Таблица 3.** Результаты экспериментов с образцами карбида вольфрама по измерению откольной прочности

$h$ , mm	$\Delta u_{fs}$ , m/s	$\sigma_{\max}$ , GPa	$\sigma_{sp}$ , GPa
1.020	73	8.15	4.09
0.952	56	17.33	3.13
3.995[10]	44.3	27.5	2.48
3.999[10]	52.5	27.3	2.93

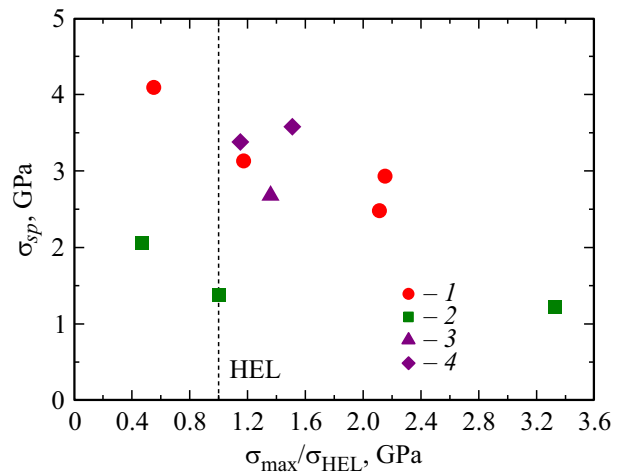
Примечание:  $\sigma_{\max}$  — максимальное напряжение при ударном сжатии.

керамики, полученной методом SPS [10], и почти в 3 раза для горячепрессованной керамики [14].

На рис. 3 показаны профили скорости свободной поверхности образцов карбида вольфрама номинальной толщиной 4 mm [10] при ударе алюминиевой пластиной толщиной 2 mm со скоростью 1.8 km/s и номинальной толщиной 1 mm при ударе алюминиевой пластиной толщиной 0.38 mm со скоростью 1.2 и 0.62 km/s. Соотношение толщин образца и ударника в этих экспериментах подобрано таким образом, чтобы получить условия откольного разрушения образца, и тем самым определить его откольную прочность. Волновые профили, представленные на рис. 3, демонстрируют все особенности разрушения упруго-пластического материала в условиях откола: выход на поверхность образца упруго-пластической волны сжатия, следующую за ней волну разрежения, момент откольного разрушения материала, совпадающий по времени с первым минимумом скорости на профиле волны, формирование импульса сжатия, так называемого „откольного импульса“, и последующие колебания скорости поверхности, связанные с его реверберацией в откольной пластине. В эксперименте при нагружении ударником, разогнанным до скорости 0.62 km/s, реализуемое максимальное давление сжатия ниже динамического предела упругости, т.е. откольное разрушение образца происходит в упругой области.

Откольная прочность рассчитывалась по измеренной величине спада скорости в волне разрежения перед фронтом откольного импульса  $\Delta u_{fs}$  (рис. 3) по формуле [11]:  $\sigma_{sp} = \rho_0 c_l \Delta u_{fs} / 2$ . Полученные значения откольной прочности при оцененной скорости деформирования в волне разрежения, равной  $\sim 3 \cdot 10^5 \text{ s}^{-1}$ , представлены в табл. 3.

На рис. 4 представлена зависимость откольной прочности от максимального напряжения керамики карбида вольфрама в сопоставлении с данными из литературы. Для расчета отношения максимального напряжения к динамическому пределу упругости использовалась измеренная соответствующая толщине образца величина  $\sigma_{HEL}$ . Отчетливо видно, что наибольшее значение величины откольной прочности реализуется в упругой области. При небольшом превышении динамического предела упругости ее величина уменьшается сразу на  $\sim 25\%$  и убывает с дальнейшим ростом давления.



**Рис. 4.** Зависимость откольной прочности керамики карбида вольфрама от максимального напряжения сжатия: 1 — данные, полученные в настоящей работе и работе [10] (при максимальной давлении); 2 — горячепрессованный WC,  $\sigma_{HEL} = 7.2 \text{ GPa}$  [15]; 3 — WC + 5.7% Co + 1.9% Ta [14]; 4 — WC + 3–4% Ni + 0.4–0.8% Fe [14].

Откольная прочность горячепрессованного карбида вольфрама исследовалась в работе [15]. Было показано, что рост напряжения сжатия в ударной волне с 3.4 до 7.2 GPa приводит к резкому уменьшению значения откольной прочности с 2.06 до 1.38 GPa, дальнейший рост максимального напряжения сжатия до 24 GPa снижает это значение незначительно до 1.22 GPa. Сопоставление полученных в настоящей работе результатов с данными [15] демонстрирует двукратное увеличение откольной прочности образцов керамики карбида вольфрама, изготовленных методом искрового плазменного спекания, в близком диапазоне напряжений сжатия. Полученные значения откольной прочности карбида вольфрама, имеющего  $\sigma_{HEL} = 4.1 \text{ GPa}$ , в работе [14] с добавками 5.7% Co + 1.9% Ta и 3–4% Ni + 0.4–0.8% Fe находятся на одном уровне значений с беспористым карбидом вольфрама (рис. 4) при напряжениях сжатия превышающих  $\sigma_{HEL}$ , что подтверждает упрочняющее влияние добавок.

## Заключение

Анализ измеренных профилей скорости свободной поверхности образцов керамики WC толщиной от 0.15 до 4 mm, изготовленных методом искрового плазменного спекания, показывает сильное затухание упругого предвестника по мере его распространения. В экспериментах с образцами толщиной 0.5 mm и менее отчетливо регистрируется релаксация напряжений за фронтом упругого предвестника. Измеренные значения динамического предела упругости и откольной прочности исследованной керамики более чем в 2 раза превышают таковые для горячепрессованных керамик [13,15]. При максималь-

ных напряжениях ударного сжатия, примерно в 2 раза превышающих динамический предел упругости этой керамики, наблюдается уменьшение величины откольной прочности на треть от ее значения в упругой области. Результаты экспериментов не обнаруживают признаков разрушения материала при ударном сжатии.

Работа выполнена по теме государственного задания, № гос. регистрации 0089-2014-0016, и в рамках Программы фундаментальных исследований Президиума РАН № 13 „Конденсированное вещество и плазма при высоких плотностях энергии“ по теме научного направления „Быстрые физико-химические превращения и разрушение твердых тел и жидкостей“.

## Список литературы

- [1] Grady D.E. // *Mechan. Material.* 1998. Vol. 29. N 3–4. P. 181–203. DOI: 10.1016/S0167-6636(98)00015-5
- [2] Ahrens T.J., Duvall G.E. // *J. Geophys. Res.* 1966. Vol. 71. P. 4349–4360.
- [3] Rosenberg Z., Brar N.S., Bless S.J. // *J. Phys. Colloq.* 1988. Vol. 49. N C3. P. 707–711. DOI: 10.1051/jphyscol:19883100
- [4] Cagnoux J., Longy F. In: *Shock Waves in Condensed Matter* — 1987. Amsterdam: Elsevier, 1988. P. 293–296.
- [5] Adams C.D., Anderson W.W., Blumenthal W.R., Gray G.T. III // *J. Phys. Conf. Ser.* 2014. Vol. 500. P. 112001. DOI: 10.1088/1742-6596/500/11/112001
- [6] Zaretsky E.B. // *J. Appl. Phys.* 2013. Vol. 114. P. 183518. DOI: 10.1063/1.4830014
- [7] Gurlitsky I., Zaretsky E., Kalabukhov S., Dariel M.P., Frage N. // *J. Appl. Phys.* 2014. Vol. 115. P. 243505. DOI: 10.1063/1.4885436
- [8] Савиных А.С., Канель Г.И., Разоренов С.В., Румянцев В.И. // *ЖТФ.* 2013. Т. 83. Вып. 7. С. 43–47. [Savinykh A.S., Kanel G.I., Razorenov S.V., Rumyantsev V.I. // *Tech. Phys.* 2013. Vol. 58. N 7. P. 973–977.] DOI: 10.1134/S1063784213070207
- [9] Guillon O., Gonzalez-Julian J., Dargatz B., Kessel T., Schierning G., Rathel J., Herrmann M. // *Advan. Engineer. Mater.* 2014. Vol. 16. N 7. P. 830–849. DOI: 10.1002/adem.201300409
- [10] Савиных А.С., Mandel K., Разоренов С.В., Krüger L. // *ЖТФ.* 2018. Т. 18. Вып. 3. С. 368–373. [Savinykh A.S., Mandel K., Razorenov S.V., Krueger L. // *Tech. Phys.* 2018. Vol. 63. N 3. P. 357–362.] DOI: 10.1134/S1063784218030210
- [11] Канель Г.И., Разоренов С.В., Уткин А.В., Фортков В.Е. *Ударно-волновые явления в конденсированных средах.* М.: Изд-во Янус-К, 1996. 407 с.
- [12] Barker L.M., Hollenbach R.E. // *J. Appl. Phys.* 1972. Vol. 43. N 11. P. 4669–4675. <https://doi.org/10.1063/1.1660986>
- [13] Dandekar D.P., Grady D.E. In: *Shock Compression of Condensed Matter* — 2001 / Ed. by M.D. Furnish, N.N. Thadhani, Y. Horie. AIP CP 620. 2002. P. 783–786.
- [14] Grady D.E. *Dynamic Properties of Ceramic Materials.* SAND94-3266. February 1995. 99 p.
- [15] Dandekar D.P. *Spall Strength of Tungsten Carbide.* ARL-TR-3335. September 2004. 22 p.