

Научная статья

УДК 539.3

doi: 10.17223/19988621/80/8

Анализ эффективности противоударной стойкости двух групп керамических и композитных материалов

Сергей Алексеевич Зелепугин¹, Владимир Фомич Толкачев²,
Илья Михайлович Тырышкин³

^{1, 2, 3} Томский государственный университет, Томск, Россия

¹ Томский научный центр Сибирского отделения РАН, Томск, Россия

¹ szel@yandex.ru

² tolk@niipmm.tsu.ru

³ tyryshkin@niipmm.tsu.ru

Аннотация. Представлены результаты экспериментальных исследований эффективности противоударной стойкости керамических и композитных образцов в диапазоне скоростей удара 0.5–6.5 км/с. Рассмотрены следующие материалы: оксид алюминия Al_2O_3 , оксид алюминия марки КВП-98 (корунд), диоксид циркония ZrO_2 , карбид кремния SiC , композитные материалы $TiC-NiCr$ и TiB_2-B_4C . Выявлены две группы материалов по эффективности противоударной стойкости в качестве дополнительных элементов защиты основной конструкции.

Ключевые слова: керамика, композит, высокоскоростной удар, разрушение, параметр эффективности

Благодарности: Экспериментальные исследования выполнены при поддержке Программы развития ТГУ («Приоритет-2030»), анализ эффективности противоударной стойкости проведен в рамках государственного задания Томского научного центра Сибирского отделения РАН.

Для цитирования: Зелепугин С.А., Толкачев В.Ф., Тырышкин И.М. Анализ эффективности противоударной стойкости двух групп керамических и композитных материалов // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2022. № 80. С. 85–96. doi: 10.17223/19988621/80/8

Original article

Analysis of impact resistance for two groups of ceramic and composite materials

Sergey A. Zelepugin¹, Vladimir F. Tolkachev², Il'ya M. Tyryshkin³

^{1, 2, 3} Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation

¹ Tomsk Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russian Federation

¹ szel@yandex.ru² tolk@niipmm.tsu.ru³ tyryshkin@niipmm.tsu.ru

Abstract. Complex experimental and theoretical studies of shock-wave characteristics and penetration parameters are conducted to develop physical and mathematical models of deformation and fracture of ceramic and composite materials under high-velocity loading. The purpose of this work is to investigate the fracture of ceramic and composite targets and their efficiency in ceramic-containing structures. The experiments are performed using a ballistic test stand (Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics, National Research Tomsk State University). The deformation and fracture of ceramic (aluminum oxide Al_2O_3 , aluminum oxide (KVP-98, corundum), zirconium dioxide ZrO_2 , silicon carbide SiC) and composite (TiC-NiCr and $\text{TiB}_2\text{-B}_4\text{C}$) materials are studied experimentally in the impact velocity range of 0.5 – 6.5 km/s. The dynamics of the fracture of ceramic plates (silicon carbide and aluminum oxide) is analyzed. The fragments of the plates and their size distribution are given. The study of the impact resistance of ceramic and composite samples reveals two groups of materials with essentially different levels of efficiency. For both groups, the dependence of the efficiency parameter on the impact velocity demonstrates a decrease in the velocity range from 0.5 to 3.0 – 4.5 km/s and a subsequent increase when the impact velocity tends to 6.5 km/s. The obtained experimental results may be used during the validation and verification of numerical and analytical models, approaches, and software packages.

Keywords: ceramics, composite, high-velocity impact, fracture, efficiency parameter

Acknowledgments: This study was supported by the TSU Federal Program (“Priority-2030”) and the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (state assignment for the Tomsk Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences).

For citation: Zelepugin, S.A., Tolkachev, V.F., Tyryshkin, I.M. (2022) Analysis of impact resistance for two groups of ceramic and composite materials. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 80. pp. 85–96. doi: 10.17223/19988621/80/8

Введение

Возможности модернизации высокоэффективных защитных конструкций из традиционных материалов (сталь, титан, алюминий и их сплавы) при функционировании в условиях высокоскоростного удара к настоящему времени практически исчерпаны. В качестве дополнительных элементов конструктивно-компоновочных схем конструкций используются различные виды керамических и композитных материалов комбинированного строения (керметы, наноструктурные материалы) [1–5], которые обладают высокими прочностными характеристиками и являются одним из перспективных средств индивидуальной (человека) и локальной (технических средств) защиты от проникающего и разрушительного действия различных видов высокоскоростных ударников.

К настоящему времени продолжают активные комплексные экспериментальные и теоретические исследования ударно-волновых характеристик и параметров проникания с целью разработки физико-математических моделей деформирования и разрушения керамических и композитных материалов в условиях высокоскоростного нагружения. Применяемыми методами оценки характеристик

высокоскоростного соударения являются экспериментальные исследования, аналитические расчеты, а также численное моделирование проникания ударников в преграды и конструкции, содержащие слои из металлов, керамик и композитов [3–7].

Следует отметить значительные успехи в численном моделировании поведения материалов при динамическом нагружении. Это обусловлено быстрым развитием вычислительных мощностей, созданием эффективных численных комплексов, разработкой новых методов и подходов. К эффективным программным комплексам следует отнести коммерческие пакеты ANSYS LS-DYNA/AUTODYN, ABAQUS и другие, уровень развития которых позволяет квалифицированному специалисту решать задачи повышенной сложности. Среди новых методов и подходов можно отметить методы подвижных клеточных автоматов [8], SPH [9], молекулярной динамики [10, 11]. Из подходов необходимо выделить многоуровневый подход с учетом структуры материала, в том числе на мезоуровне [12], а также вероятностный подход [13], который позволяет учитывать влияние структуры материала через варьирование прочностных характеристик на макроуровне.

Однако эксперимент был и остается наиболее важным методом исследования поведения материалов при динамическом нагружении. Экспериментальные данные являются основой для валидации и верификации численных и аналитических моделей, методик и программных комплексов. Так, экспериментальные исследования подтверждают необходимость использования вероятностного подхода при анализе прочностных характеристик материалов [14]. Также в эксперименте удастся зафиксировать уникальные особенности поведения материалов, которые не укладываются в общепринятые теоретические модели. К таким можно отнести асимметрию разрушения керамики при высокоскоростном ударе [15, 16], которая до сих пор не описана численно.

При отборе наиболее эффективных керамик в составе комбинированных конструкций из имеющихся и вновь разрабатываемых материалов возникает задача сравнения их противоударной стойкости при варьировании начальных условий высокоскоростного удара компактными и стержневыми ударниками. При выявлении противоударной стойкости керамических материалов наиболее эффективны тесты на глубину проникания [17–19] или определение остаточной скорости ударника за преградой [20].

Цель данной работы – исследование разрушения керамических и композитных преград и их эффективности в составе керамикосодержащих конструкций. Эксперименты проводились на баллистическом стенде НИИ прикладной математики и механики Национального исследовательского Томского государственного университета. Метание ударников осуществлялось из пороховой и легкогазовой установок калибром 8 и 23 мм [21]. Скорость метаемых тел измерялась электромагнитным датчиком перемещений с точностью порядка 0.5%. Эксперименты осуществлялись в диапазоне скоростей взаимодействия 0.5–6.5 км/с. В специально выполненных опытах проводилось рентгенографирование процесса взаимодействия для оценки характера разрушения преград (пластин).

Испытуемые образцы представляли собой плоскопараллельные керамические и композитные пластины толщиной 2–25 мм поперечным размером более 50 × 50 мм. В экспериментах исследованы следующие материалы: оксид алюминия Al_2O_3 , оксид алюминия марки КВП-98 (корунд), диоксид циркония ZrO_2 , карбид кремния SiC, композитные материалы TiC–NiCr и TiB_2 – B_4C . Некоторые физико-

механические характеристики испытуемых материалов приведены в таблице. Здесь ρ_0 – плотность материала, E – эффективный модуль Юнга, H_M – микротвердость, H_D – динамическая твердость, σ_e – предел упругости, σ_T – предел текучести, c_0 – объемная скорость звука.

Физико-механические характеристики исследованных материалов

Материал	ρ_0 , г/см ³	E , ГПа	H_M , ГПа	H_D , ГПа	σ_e , ГПа	σ_T , ГПа	c_0 , см/мкс
Al ₂ O ₃	3.8	407	18	20–25	6.5	59.3	0.88
Корунд КВП-98	3.7	–	–	20–24	8.3	–	0.95
ZrO ₂	6.0	–	–	–	13.1	–	–
SiC	3.0	330	27	25–30	6.5	55.9	0.69
TiC–NiCr	7.0	310	–	–	–	–	–
TiB ₂ –B ₄ C	3.5	167	–	90 HRA	6.7	–	0.71

Ударники из стали ШХ-15 имели форму шара диаметром 3.5 мм, 5.5 мм, также использовался компактный ударник диаметром и высотой по 8 мм и удлиненный ударник диаметром 6.2 мм и длиной 28.2 мм.

Анализ динамики разрушения керамических пластин

Для оценки скорости деформирования ударника и степени разрушения керамических пластин выполнена серия опытов, в которой проводилось рентгенографирование процесса высокоскоростного взаимодействия стержневых ударников с керамическими пластинами.

На рис. 1 представлена рентгенограмма процесса разрушения пластины из керамики SiC толщиной 20 мм в момент времени 30 мкс при ударе компактным стальным цилиндрическим элементом 8×8 мм со скоростью 1 270 м/с.

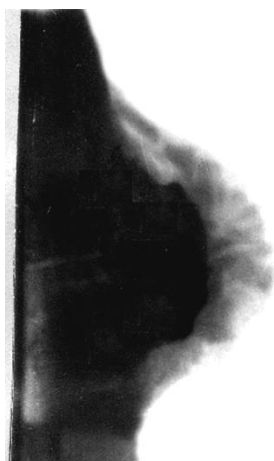


Рис. 1. Рентгенограмма разрушения керамической пластины SiC толщиной 20 мм в момент времени 30 мкс

Fig. 1. X-ray diffraction pattern for a 20 mm SiC ceramic plate at a time instant of 30 μ s

Динамика разрушения керамической пластины характеризуется следующим образом. На начальной стадии формируется ударная волна, которая распространяется вглубь пластины. Ударная волна выходит на тыльную поверхность преграды и отражается от нее вглубь преграды в виде волны разгрузки, после чего в преграде начинается процесс формирования областей микроразрушений. Поскольку структура материала крупнозернистая и тыльная поверхность пластины шероховатая (технология изготовления), на первом этапе микроразрушение проявляется в виде микрокумуляции [22], т.е. формирования и отделения микроструй мелких частиц с тыльной поверхности керамической пластины. На рентгенограмме это отражено в виде купола слабого затемнения впереди основного фрагмента тыльной поверхности пластины.

С течением времени, в зависимости от структуры материала, процесс микро-разрушения переходит в мезо- и макроразрушение [23], на тыльной поверхности преграды формируется откольный слой (аналог откольной «тарелочки», характерной для откольного разрушения металлических пластин при высокоскоростном ударе), диаметр которого больше диаметра ударника. На рентгенограмме отражен момент смещения откольного слоя относительно плоскости тыльной поверхности пластины. Основной каркас керамической пластины сохраняет целостность вне зоны контакта на данный момент времени. Под действием сдвиговых и растягивающих напряжений процесс разрушения преграды продолжается, и в конечном итоге преграда разрушается на осколки различных размеров.

На рис. 2, *a* приведена характерная рентгенограмма пробивания пластины из оксида алюминия Al_2O_3 стальным ударником диаметром 6.2 мм и длиной 28.2 мм при начальной скорости удара 760 ± 3 м/с в момент времени 30 мкс после начала взаимодействия. Толщина керамической пластины составила 9.2 мм. Можно отметить, что разрушение пластины наблюдается в центре, в месте контакта с ударником, а периферийные области сохраняют целостность. На рис. 2, *b* приведена рентгенограмма пробивания пластины из карбида кремния SiC толщиной 12 мм для тех же условий нагружения. Вследствие относительно низких прочностных характеристик данного материала наблюдается более интенсивное разрушение пластины по сравнению с предыдущим случаем. Можно отметить, что в обоих случаях ударник в головной части претерпел значительную пластическую деформацию вследствие взаимодействия с керамикой с высоким пределом упругости и представляет собой форму «гриба».

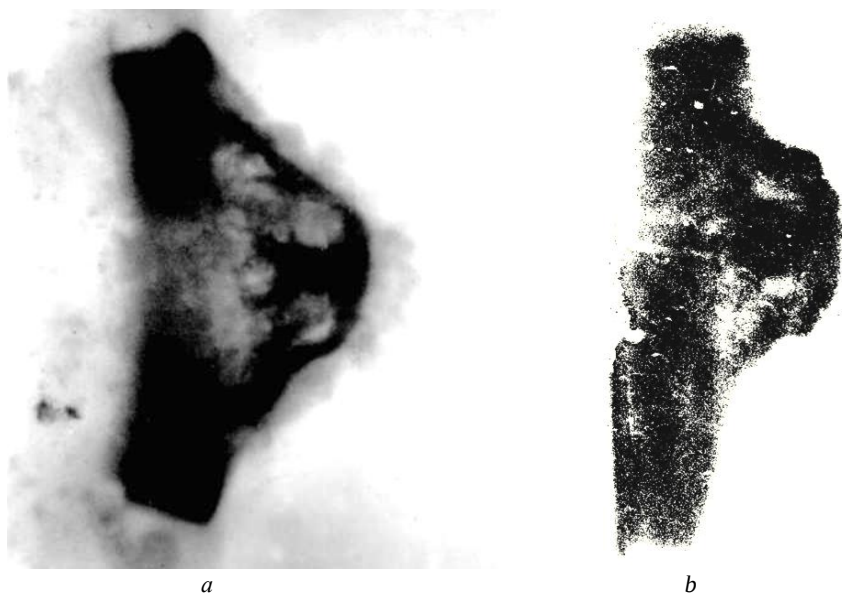


Рис. 2. Рентгенограмма разрушения керамических пластин Al_2O_3 (*a*) и SiC (*b*) в момент времени 30 мкс

Fig. 2. X-ray diffraction pattern of (*a*) Al_2O_3 and (*b*) SiC ceramic plates at a time instant of 30 μ s

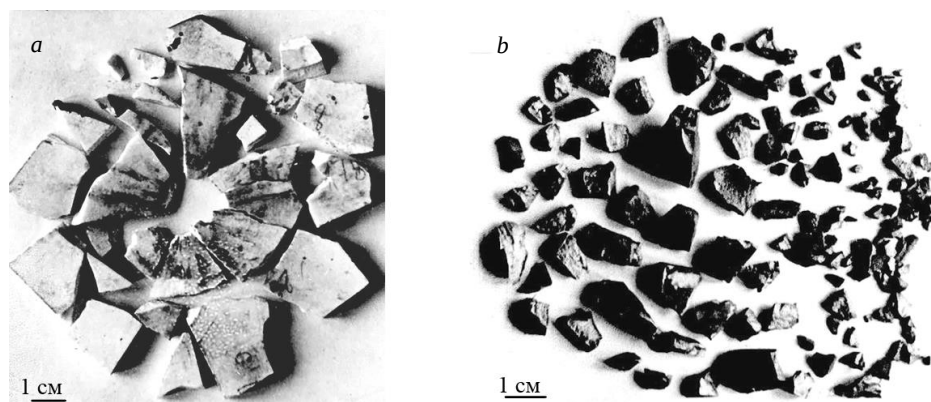


Рис. 3. Фотографии осколков керамической пластины из корунда Al_2O_3 марки КВП-98 (a) и карбида кремния SiC (b) после опыта

Fig. 3. Photo of ceramic plate fragments made of (a) Al_2O_3 corundum (KVP-98) and (b) silicon carbide SiC after the experiment

На рис. 3, a приведена фотография уловленных осколков разрушенной керамической пластины из оксида алюминия марки КВП-98 (корунд) толщиной 7 мм. Условия нагружения аналогичны предыдущему случаю. Наиболее разрушен материал в месте контакта (крупные частицы пыли), и от центра контакта к периферии размеры осколков увеличиваются. На фотографии уловленных осколков керамической пластины из карбида кремния SiC толщиной 12 мм (рис. 3, b) видно, что степень разрушения материала повышена в сравнении с предыдущим случаем. Это свидетельствует о влиянии физико-механических и динамических характеристик прочности материала керамик на процесс разрушения при высокоскоростном ударе.

Анализ эффективности противоударной стойкости

Проведенные ранее исследования свидетельствуют об эффективности расположения керамических пластин на лицевой поверхности основной конструкции [24]. При этом в процессе ударно-волнового нагружения керамические образцы, как показано выше, разрушаются на фрагменты и в большинстве случаев после опыта восстановлению не подлежат, поэтому определить глубину проникания ударников в керамические преграды оказывается невозможным. Эффективность образцов из керамических материалов принято определять косвенным методом, в частности по глубине проникания ударника в массивную металлическую плиту-свидетель с керамической пластиной на лицевой поверхности и без нее. В [25] предложена простая формула для оценки эффективности противоударной стойкости ε керамики:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_m r + \rho_k c}{\rho_m x},$$

где r – глубина проникания в металлическую плиту с керамической пластиной на лицевой поверхности, x – глубина проникания в плиту при отсутствии керамической пластины, c – толщина керамической пластины, ρ_m – плотность материала плиты, ρ_k – плотность керамики. В качестве массивной плиты обычно использу-

ется алюминиевый сплав Д16М. Параметр эффективности ε конструкции меньше или равен нулю, если пластина из керамики не дает выигрыша по массе на единицу площади преграды. Рост ε от нуля до 1 означает рост эффективности. Такой подход к оценке эффективности хрупко разрушающихся материалов активно используется в настоящее время [17–19], однако диапазон исследуемых скоростей соударения, как правило, ограничен сверху несколькими сотнями метров в секунду.

В данной работе проведен анализ серии экспериментов по высокоскоростному соударению стальных сферических ударников с керамическими и металлокерамическими пластинами в диапазоне скоростей соударения 0.5–6.5 км/с. Путем обработки статистическими методами ранее полученных экспериментальных данных и компьютерного моделирования [7, 20, 24], а также анализа результатов выполненных опытов выявлено наличие двух групп керамик по их эффективности в качестве дополнительных элементов защиты основной конструкции. На рис. 4 представлены зависимости параметра эффективности керамик и металлокерамики, выполненные по описанной выше методике с использованием приведенного соотношения. Ударник – шар диаметром 3.5 и 5.5 мм.

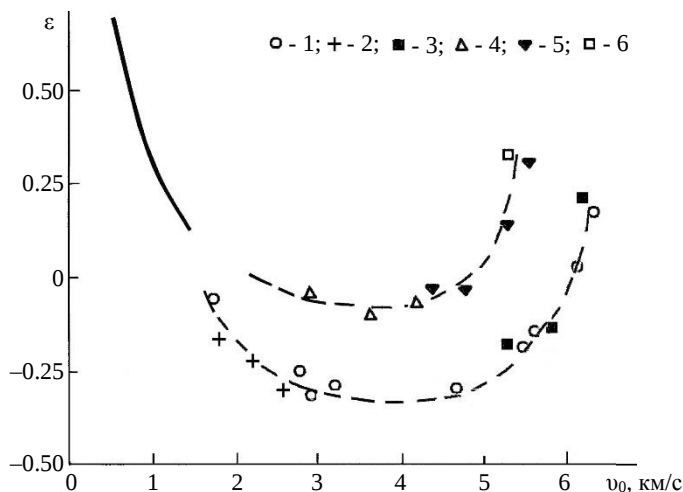


Рис. 4. Параметр эффективности керамических и композитных материалов при высокоскоростном ударе: 1 – ZrO_2 , 2 – SiC , 3 – $TiC-NiCr$, 4 – TiB_2-B_4C , 5 – Al_2O_3 , 6 – KBП-98

Fig. 4. Efficiency parameter for ceramic and composite materials under a high-velocity impact: (1) ZrO_2 , (2) SiC , (3) $TiC-NiCr$, (4) TiB_2-B_4C , (5) Al_2O_3 , and (6) KVP-98

В левом верхнем углу рисунка сплошной линией представлена экспериментальная усредненная зависимость параметра эффективности керамики Al_2O_3 при ударе стальным стержнем диаметром 6.2 мм и длиной 28.2 мм при скорости удара до 1.5 км/с [20]. При данных условиях взаимодействия максимальное значение параметра эффективности керамики соответствует низким скоростям удара и с увеличением скорости соударения до 1.5 км/с эффективность снижается.

Штриховые линии соответствуют результатам исследования эффективности керамических и композитных материалов при ударе сферическими элементами при высоких и сверхвысоких скоростях нагружения. Верхняя кривая соответ-

стствует группе керамических материалов с повышенным параметром эффективности противоударной стойкости к удару, нижняя кривая – с пониженным параметром эффективности. Можно выделить их общее объединяющее свойство – первоначальное понижение параметра эффективности с увеличением скорости удара, достижение им минимального значения в диапазоне скоростей удара 3.0–4.5 км/с и увеличение его значения с дальнейшим повышением скорости удара.

Спад кривых эффективности исследуемых материалов на первом этапе, по-видимому, связан с деформированием и разрушением материала преград во фронте ударной волны. Можно предположить, что при скоростях удара свыше 4.5 км/с наблюдаются ветвление микротрещин и интенсивное разрушение материала на микрофрагменты в ударной волне. На более поздней стадии взаимодействия осуществляется поджатие разрушенного материала деформированным ударником, как следствие, наблюдается процесс компактирования материала. Это способствует усилению сопротивления внедрению ударника в керамику, снижению начальной скорости внедрения в плиту-свидетель и повышению параметра эффективности.

Заключение

Экспериментально исследованы процессы деформирования и разрушения керамических (оксид алюминия Al_2O_3 , оксид алюминия марки КВП-98 (корунд), диоксид циркония ZrO_2 , карбид кремния SiC) и композитных материалов ($TiC-NiCr$ и TiB_2-V_4C) в диапазоне скоростей удара 0.5–6.5 км/с.

Проведен анализ динамики разрушения керамических пластин на примере карбида кремния и оксида алюминия. Показаны уловленные осколки разрушенных пластин и их распределение по размерам.

Результаты исследования эффективности противоударной стойкости рассмотренных керамических и композитных образцов выявили две группы материалов с существенно различным уровнем эффективности. Для обеих групп зависимость параметра эффективности от скорости удара демонстрирует падение для скоростей от 0.5 до 3.0–4.5 км/с и последующий рост при росте скорости удара до 6.5 км/с.

Список источников

1. Румянцев Б.В., Павлов С.И. Высокоскоростное взаимодействие металлической струны с керамикой // Письма в Журнал технической физики. 2020. Т. 46, вып. 17. С. 10–13. doi: 10.21883/PJTF.2020.17.49885.18363
2. Черепанов И.А., Савиных А.С., Разоренов С.В. Откол в сапфире при ударном сжатии в различных кристаллографических направлениях // Журнал технической физики. 2020. Т. 90, вып. 6. С. 961–964. doi: 10.21883/JTF.2020.06.49283.368-19
3. Дульнев А.И. О применении керамики в составе композитных конструкций защиты // Труды Крыловского государственного научного центра. 2021. Т. 2 (396). С. 52–66. doi: 10.24937/2542-2324-2021-2-396-52-66
4. Zelepugin S.A., Mali V.I., Zelepugin A.S., Ilna E.V. Failure of metallic-intermetallic laminate composites under dynamic loading // AIP Conference Proceedings. 2012. V. 1426. P. 1101–1104. doi: 10.1063/1.3686471
5. Промахов В.В., Коробенков М.В., Шульц Н.А. и др. Моделирование накопления повреждений и разрушения керамических композитов $Al_2O_3-ZrO_2$, полученных по аддитив-

- ным технологиям, при высокоскоростном нагружении // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2021. № 72. С. 140–157. doi: 10.17223/19988621/72/12
6. Zelepugin S.A., Zelepugin A.S., Khristenko Yu.F. Computational modelling of brittle fracture under dynamic loading // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2016. V. 11 (24). P. 14560–14565.
 7. Горельский В.А., Зелепугин С.А., Толкачев В.Ф. Экспериментальное и численное исследование разрушения керамики при высокоскоростном ударе // Химическая физика. 1999. Т. 18. С. 104–107.
 8. Smolin A.Yu., Eremina G.M. Refinement of the model for iron oxide friction based on movable cellular automata // AIP Conference Proceedings. 2020. V. 2310. Art. 020320. doi: 10.1063/5.0034150
 9. Ivanova O.V., Cherepanov R.O., Zelepugin S.A. Numerical simulation of solid-phase chemical transformations in thermite mixtures under shock-wave loading // Journal of Physics: Conference Series. 2022. V. 2154 (1). Art. 012005. doi: 10.1088/1742-6596/2154/1/012005
 10. Brancio P.S., Zhang J., Rino J.P. et al. Shock-induced microstructural response of mono- and nanocrystalline SiC ceramics // Journal of Applied Physics. 2018. V. 123 (14). Art. 145902. doi: 10.1063/1.5023915
 11. Ramesh K.T., Graham-Brady L., Goddard W.A. et al. Models for the behavior of boron carbide in extreme dynamic environments // Journal of the American Ceramic Society. 2021. V. 105 (1). doi: 10.1111/jace.18071
 12. Микушина В.А., Смолин И.Ю. Численное моделирование деформирования и разрушения пористой алюмооксидной керамики на мезоуровне // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2019. № 58. С. 99–108. doi: 10.17223/19988621/58/8
 13. Pashkov S.V., Zelepugin S.A. Probabilistic approach in modelling dynamic fracture problems // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. 2022. V. 236 (21). P. 10681–10689. doi: 10.1177/0954406220939116
 14. Зимина В.А. Экспериментальное исследование структуры, упругих и прочностных характеристик пористой корундовой керамики // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2020. № 67. С. 117–126. doi: 10.17223/19988621/67/11
 15. Хорев И.Е. Ударно-откольная асимметрия в проблеме высокоскоростного соударения твердых тел // Письма в Журнал технической физики. 2005. Т. 31, вып. 4. С. 71–75.
 16. Зелепугин С.А., Толкачев В.Ф., Зелепугин А.С. Асимметрия разрушения керамики при высокоскоростном ударе // Письма в Журнал технической физики. 2017. Т. 43, вып. 23. С. 48–54. doi: 10.21883/PJTF.2017.23.45275.16974
 17. Carton E.P., Johnsen B.B., Rahbek D.-B. et al. Round robin using the depth of penetration test method on an armour grade alumina // Defence Technology. 2019. V. 15. P. 829–836. doi: 10.1016/j.dt.2019.07.014
 18. Savio S.G., Madhu V. Ballistic performance evaluation of ceramic tiles with respect to projectile velocity against hard steel projectile using DOP test // International Journal of Impact Engineering. 2018. V. 113. P. 161–167. doi: 10.1016/j.ijimpeng.2017.11.020
 19. Savio S.G., Rao A.S., Reddy P.R.S., Madhu V. Microstructure and ballistic performance of hot pressed & reaction bonded boron carbides against an armour piercing projectile // Advances in Applied Ceramics. 2019. V. 118 (5). P. 264–273. doi: 10.1080/17436753.2018.1564416
 20. Tolkahev V.F., Konyaev A.A., Zheikov V.V. Experimental study of impact resistance of ceramics and composites // Composites: Mechanics, Computations, Applications: An International Journal. 2012. V. 3 (3). P. 253–262. doi: 10.1615/CompMechComputApplIntJ.v3.i3.40
 21. Khristenko Yu.F., Zelepugin S.A., Gerasimov A.V. New light-gas guns for the high-velocity throwing of mechanical particles // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2017. V. 12 (22). P. 6606–6610.
 22. Михайлов А.Л., Огородников В.А., Сасик В.С. и др. Экспериментально-расчетное моделирование процесса выброса частиц с ударно-нагруженной поверхности // Журнал

- экспериментальной и теоретической физики. 2014. Т. 145 (5). С. 892–905. doi: 10.7868/S0044451014050127
23. Григорьев М.В., Бурлаченко А.Г., Буякова С.П., Кульков С.Н. Деформация и разрушение корундовой керамики с многоуровневой поровой структурой // Журнал технической физики. 2019. Т. 666 (12). С. 1898–1902. doi: 10.21883/JTF.2019.12.48489.255-18
 24. Tolkachev V.F., Konyaev A.A., Pakhnutova N.V. The efficiency of ceramic-faced metal targets at high-velocity impact // Journal of Physics: Conference Series. 2017. V. 919. Art. 012007. doi: 10.1088/1742-6596/919/1/012007
 25. Bless S.J., Rosenberg Z., Yoon B. Hypervelocity penetration of ceramics // International Journal of Impact Engineering. 1987. V. 5 (1-4). P. 165–171. doi: 10.1016/0734-743X(87)90036-4

References

1. Rumyantsev B.V., Pavlov S.I. (2020) High-speed interaction of a metal jet with ceramics. *Technical Physics Letters*. 46. pp. 843–846. doi: 10.1134/S1063785020090102
2. Cherepanov I.A., Savinykh A.S., Razorenov S.V. (2020) Spalling in sapphire in different crystallographic directions under shock compression. *Technical Physics*. 65. pp. 921–924. doi: 10.1134/S1063784220060067
3. Dulnev A. (2021) Applications of ceramics in composite protective structures. *Transactions of the Krylov State Research Centre*. 2(396). pp. 52–66. doi: 10.24937/2542-2324-2021-2-396-52-66
4. Zelepugin S.A., Mali V.I., Zelepugin A.S., Ilina E.V. (2012) Failure of metallic-intermetallic laminate composites under dynamic loading. *AIP Conference Proceedings*. 1426. pp. 1101–1104. doi:10.1063/1.3686471
5. Promakhov V.V., Korobenkov M.V., Schultz N.A., Zhukov A.S., Olisov A.V., Bakhmat V.R., Dronov F.Yu., Myalkovskiy I.S. (2021) Modelirovanie nakopleniya povrezhdeniy i razrusheniya keramicheskikh kompozitov $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$, poluchennykh po additivnym tekhnologiyam, pri vysokoskorostnom nagruzhении [Modeling the accumulation of damages and the failure of ceramic composites $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$, obtained by additive technologies, under high-speed loading]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 72. pp. 140–157. doi: 10.17223/19988621/72/12
6. Zelepugin S.A., Zelepugin A.S., Khristenko Yu.F. (2016) Computational modelling of brittle fracture under dynamic loading. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*. 11(24). pp. 14560–14565.
7. Gorelskii V.A., Zelepugin S.A., Tolkachev V.F. (2000) Experimental and numerical study of ceramics destruction by high-velocity impact. *Chemical Physics Reports*. 18(10-11). pp. 2211–2217.
8. Smolin A.Yu., Eremina G.M. (2020) Refinement of the model for iron oxide friction based on movable cellular automata. *AIP Conference Proceedings*. 2310. Article 020320. doi: 10.1063/5.0034150
9. Ivanova O.V., Cherepanov R.O., Zelepugin S.A. (2022) Numerical simulation of solid-phase chemical transformations in thermite mixtures under shock-wave loading. *Journal of Physics: Conference Series*. 2154(1). Article 012005. doi: 10.1088/1742-6596/2154/1/012005
10. Brancio P.S., Zhang J., Rino J.P., Nakano A., Kalia R.K., Vashishta P. (2018) Shock-induced microstructural response of mono- and nanocrystalline SiC ceramics. *Journal of Applied Physics*. 123(14). Article 145902. doi: 10.1063/1.5023915
11. Ramesh K.T., Graham-Brady L., Goddard W.A., Hurley R.C., Robbins M., Tonge A.L., Bhattacharjee A., Clemmer J.T., Zeng Q., Li W., Shen Y., An Q., Mitra N. (2021) Models for the behavior of boron carbide in extreme dynamic environments. *Journal of the American Ceramic Society*. 105 (1). doi: 10.1111/jace.18071

12. Mikushina V.A., Smolin I.Yu. (2019) Chislennoe modelirovanie deformirovaniya i razrusheniya poristoy alyumooksidnoy keramiki na mezourovne [Numerical modeling of the deformation and fracture of a porous alumina ceramics at mesoscale]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 58. pp. 99–108. doi: 10.17223/19988621/58/8
13. Pashkov S.V., Zelepugin S.A. (2022) Probabilistic approach in modelling dynamic fracture problems. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 236(21). pp. 10681–10689. doi: 10.1177/0954406220939116
14. Zimina V.A. (2020) Eksperimental'noe issledovanie struktury, uprugikh i prochnostnykh kharakteristik poristoy korundovoy keramiki [Experimental investigation of the structure, elastic, and strength characteristics of porous corundum ceramics]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 67. pp. 117–126. doi: 10.17223/19988621/67/11
15. Khorev I.E. (2005) Shock-spall asymmetry in high-velocity impact of solids. *Technical Physics Letters*. 31(2). pp. 167–168. doi:10.1134/1.1877637
16. Zelepugin S.A., Tolkahev V.F., Zelepugin A.S. (2017) Asymmetry of ceramic destruction under a high-velocity impact. *Technical Physics Letters*. 43(12). pp. 1071–1073. doi: 10.1134/S1063785017120136
17. Carton E.P., Johnsen B.B., Rahbek D.-B., Broos H., Snippe A. (2019) Round robin using the depth of penetration test method on an armour grade alumina. *Defence Technology*. 15. pp. 829–836. doi: 10.1016/j.dt.2019.07.014
18. Savio S.G., Madhu V. (2018) Ballistic performance evaluation of ceramic tiles with respect to projectile velocity against hard steel projectile using DOP test. *International Journal of Impact Engineering*. 113. pp. 161–167. doi: 10.1016/j.ijimpeng.2017.11.020
19. Savio S.G., Rao A.S., Reddy P.R.S., Madhu V. (2019) Microstructure and ballistic performance of hot pressed & reaction bonded boron carbides against an armour piercing projectile. *Advances in Applied Ceramics*. 118(5). pp. 264–273. doi: 10.1080/17436753.2018.1564416
20. Tolkahev V.F., Konyaev A.A., Zheikov V.V. (2012) Experimental study of impact resistance of ceramics and composites. *Composites: Mechanics, Computations, Applications: An International Journal*. 3(3). pp. 253–262. doi: 10.1615/CompMechComputApplIntJ.v3.i3.40
21. Khristenko Yu.F., Zelepugin S.A., Gerasimov A.V. (2017) New light-gas guns for the high-velocity throwing of mechanical particles. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*. 12(22). pp. 6606–6610.
22. Mikhailov A.L., Ogorodnikov V.A., Sasik V.S. et al. (2014) Experimental-calculation simulation of the ejection of particles from a shock-loaded surface. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*. 118. pp. 785–797. doi: 10.1134/S1063776114040153
23. Grigor'ev M.V., Burlachenko A.G., Buyakova S.P., Kul'kov S.N. (2019) Deformation and fracture of corundum ceramics with a multilevel pore structure. *Technical Physics*. 64(12). pp. 1803–1807. doi: 10.1134/S1063784219120090
24. Tolkahev V.F., Konyaev A.A., Pakhnutova N.V. (2017) The efficiency of ceramic-faced metal targets at high-velocity impact. *Journal of Physics: Conference Series*. 919. Article 012007. doi: 10.1088/1742-6596/919/1/012007
25. Bless S.J., Rosenberg Z., Yoon B. (1987) Hypervelocity penetration of ceramics. *International Journal of Impact Engineering*. 5(1-4). pp. 165–171. doi: 10.1016/0734-743X(87)90036-4

Сведения об авторах:

Зелепугин Сергей Алексеевич – доктор физико-математических наук, профессор Томского государственного университета, ведущий научный сотрудник научно-исследовательского отдела структурной макрокинетики Томского научного центра СО РАН, Томск, Россия. E-mail: szel@yandex.ru

Толкачев Владимир Фомич – доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Томского государственного университета, Томск, Россия. E-mail: tolk@niipmm.tsu.ru

Тырышкин Илья Михайлович – научный сотрудник Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Томского государственного университета, Томск, Россия. E-mail: tyryshkin@niipmm.tsu.ru

Information about the authors:

Zelepugin Sergey A. (Doctor of Physics and Mathematics, Tomsk State University, Tomsk Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russian Federation), szel@yandex.ru.

Tolkachev Vladimir F. (Doctor of Physics and Mathematics, Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics, Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation), tolk@niipmm.tsu.ru

Tyryshkin Il'ya M. (Researcher, Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics, Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation), tyryshkin@niipmm.tsu.ru

Статья поступила в редакцию 18.05.2022; принята к публикации 01.12.2022

The article was submitted 18.05.2022; accepted for publication 01.12.2022