

## МИКРОФРАГМЕНТАЦИЯ ЛИТОГО СЛЮДОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ СЖАТИИ

А.М. Игнатова, М.В. Юдин, М.А. Соковиков, В.В. Чудинов, М.Н. Игнатов

Анна Михайловна Игнатова \*, Максим Владимирович Юдин, Михаил Николаевич Игнатов  
Кафедра Сварочного производства, метрологии и технологии материалов, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, п-т Комсомольский, 29а, Пермь, Российская Федерация, 614990

E-mail: iampstu@gmail.com \*, yudinmax1313@yandex.ru, imnpstu@gmail.com

Михаил Альбертович Соковиков

Лаборатория физических основ прочности, Институт механики сплошных сред УрО РАН, ул. Академика Королёва, 1, Пермь, Российская Федерация, 614013

E-mail: sokovikov@icmm.ru

Василий Валерьевич Чудинов

Лаборатория механобиологии живых систем, Пермский федеральный исследовательский центр УрО РАН, ул. Ленина, 13а, Пермь, Российская Федерация, 614000

E-mail: chudinov@icmm.ru

*Исследование преследовало цель оценить перспективность использования слюдокристаллического материала фторфлогопитового типа (основная фаза соответствует соединению  $KMg_3(Si_3AlO_{10})F_2$ ) для использования в изготовлении бронезащитных изделий. Для проведения такой оценки в исследовании были установлены особенности деформации литого слюдокристаллического материала фторфлогопитового типа при динамическом сжатии по методу разрезного стержня Гопкинсона-Кольского. Выявлено, что разрушение литого слюдокристаллического материала при средней скорости деформации  $250-1500\text{ с}^{-1}$  происходит с образованием мелкодисперсных фрагментов. Скорость воздействия была выбрана по аналогии с известными испытаниями материалов схожего назначения, обладающих стеклокристаллической структурой. Для количественной оценки интенсивности разрушения был проведен анализ фракционного состава фрагментов разрушения методом анализа изображений, полученных при исследовании методом растровой электронной сканирующей микроскопии. В ходе анализа данных эксперимента было установлено, что характеристическим показателем при анализе фракционного состава фрагментов разрушения является доля тех, чей размер составляет от 1 до 100 мкм в общей массе фрагментов до 1000 мкм (фрагменты большего размера не рассматриваются, так как образуются вторично, как фрагменты разрушения, возникающие после образования магистральных трещин), для исследованного материала этот показатель в указанных условиях воздействия составил от 83 до 87%, что опираясь на сравнение с аналогичными материалами, используемыми в изготовлении элементов бронезащитных изделий, позволяет оценить его как материал перспективный в данной сфере применения, так как помимо оптимальных показателей фракционного разрушения при ударе данный материал обладает меньшей плотностью в сравнении с аналогами, и изделия из него могут обладать меньшей массой, что является конкурентным преимуществом.*

**Ключевые слова:** слюдокристаллический материал, фторфлогопит, синтетическая слюда, фрагментация, удар, разрушение, динамическое сжатие, анализ изображений

## MICROFRAGMENTATION OF CAST MICA-CRYSTALLINE MATERIAL UNDER DYNAMIC COMPRESSION

A.M. Ignatova, M.V. Yudin, M.A. Sokovikov, V.V. Chudinov, M.N. Ignatov

Anna M. Ignatova \*, Maxim V. Yudin, Mikhail N. Ignatov

Department of Welding Production, Metrology and Technology of Materials, Perm National Research Polytechnic University, Komsomolsky ave., 29a, Perm, 614990, Russia

E-mail: iamptu@gmail.com \*, yudinmax1313@yandex.ru, imnpstu@gmail.com

Mikhail A. Sokovikov

Laboratory of Physical Bases of Strength, Institute of Continuous Media Mechanics, Ural Branch of the RAS, Academician Korolev st., 1, Perm, 614013, Russia

E-mail: sokovikov@icmm.ru

Vasiliy V. Chudinov

Laboratory Mechanobiology of Living Systems, Perm Federal Research Center of the Ural Branch of the RAS, Lenina st., 13a, Perm, 614000, Russia

E-mail: chudinov@icmm.ru

*The study aimed at assessing the prospects of using mica-crystalline material of the fluorophlogopite type (the main phase corresponds to the compound  $\text{KMg}_3(\text{Si}_3\text{AlO}_{10})\text{F}_2$ ) for use in the manufacture of armored products. To carry out such an assessment, the study established the features of the deformation of cast mica-crystalline material of the fluorophlogopite type under dynamic compression by the method of the split Hopkinson-Kola rod. It was revealed that the destruction of cast mica crystalline material at an average strain rate of  $250\text{--}1500\text{ s}^{-1}$  occurs with the formation of finely divided fragments. The exposure rate was chosen by analogy with the well-known tests of materials of a similar purpose with a glass crystal structure. For a quantitative assessment of the fracture intensity, the fractional composition of the fracture fragments was analyzed by analyzing the images obtained by scanning electron microscopy. In the course of the analysis of the experimental data, it was found that a characteristic indicator in the analysis of the fractional composition of fracture fragments is the proportion of those whose size is from 1 to  $100\text{ }\mu\text{m}$  in the total mass of fragments up to  $1000\text{ }\mu\text{m}$  (larger fragments are not considered, since they are formed again as fragments destruction arising after the formation of main cracks), for the material studied, this indicator under the specified exposure conditions ranged from 83 to 87%, which, based on a comparison with similar materials used in the manufacture of elements of armored products, allows us to evaluate it as a material promising in this field of application, since in addition to the optimal indicators of fractional fracture upon impact, this material has a lower density in comparison with analogues and products from it may have a lower mass, which is a competitive advantage.*

**Key words:** mica-crystalline material, fluorophlogopite, synthetic mica, fragmentation, shock, fracture, dynamic compression, image analysis

### Для цитирования:

Игнатова А.М., Юдин М.В., Соковиков М.А., Чудинов В.В., Игнатов М.Н. Микрофрагментация литого слюдокристаллического материала при динамическом сжатии. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2021. Т. 64. Вып. 2. С. 56–61

### For citation:

Ignatova A.M., Yudin M.V., Sokovikov M.A., Chudinov V.V., Ignatov M.N. Microfragmentation of cast mica-crystalline material under dynamic compression. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* [ChemChemTech]. 2021. V. 64. N 2. P. 56–61

### ВВЕДЕНИЕ

Стеклокристаллические материалы успешно применяются при изготовлении бронезащитных изделий [1–2] благодаря тому, что сочетание их структурных составляющих с разной степенью

упорядоченности обеспечивает при ударно-волновых нагрузках практически полную диссипацию кинетической энергии поражающего объекта на деформацию и разрушение с образованием множества микродисперсных фрагментов [3]. Однако бронезащитные элементы из стеклокристаллического материала выполняют свою защитную функцию в том

случае, если объем изделия соответствует величине энергии воздействия [4], на практике это достигается при толщине изделий более 3-5 мм, кроме того, более тонкие изделия проблематично изготовить в рамках существующих технологий спекания [5]. Поскольку стеклокристаллические материалы обладают плотностью в диапазоне 2,9-3,1 г/см<sup>3</sup>, масса изделий при таких технических условиях достигает значений, влияющих на маневренность транспорта или усложняющих условия работы людей, возникает необходимость в поиске альтернативных решений.

Слюдокристаллические материалы фторфлогопитового типа обладают схожим сочетанием физических и эксплуатационных характеристик, при этом их плотность составляет в среднем 2,6±0,2 г/см<sup>3</sup>, поэтому исследование возможности их использования в качестве материала, используемого для защиты от ударно-волнового воздействия, является актуальным. Данная возможность оценивается по фрагментации материала при высокоскоростном воздействии [6].

Данная работа проведена с целью получения информации о микроразмерных фрагментах разрушения образцов из фторфлогопита при динамическом сжатии по методу разрезного стержня Гопкинсона-Кольского с использованием анализа изображений.

#### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В качестве объекта исследования выступает литой слюдокристаллический материал фторфлогопитового типа, основное структурное составляющее имеет следующую кристаллохимическую формулу:  $KMg_3[Si_3AlO_{10}]F_2$  и состав, мас. %:  $SiO_2$  – 39-43,  $Al_2O_3$  – 9-12,  $MgO$  – 27-30,  $K_2O$  – 7-9, F – 9-12. Его структура содержит кристаллические составляющие, представленные трехмерными слоистыми комплексами, в количестве более 90%, и стеклофазу. Материал был получен по технологии литья в графитовые кокилы. Расплав был получен в электродуговой плавильной установке [7]. Сырьевые композиции для получения слюдокристаллического материала могут состоять из чистых оксидов и солей, а также из компонентов техногенного и природного происхождения [8-10]. В работе использованы материалы, полученные на основе оксидно-солевой сырьевой композиции [11].

Для динамического воздействия, приводящего к фрагментации образцов, использовался разрезной стержень Гопкинсона-Кольского [12-13]. Динамическому воздействию подвергались образцы из фторфлогопита цилиндрической формы с параметрами: диаметр 8 мм, высота 16 мм.

В установке образец подвергался динамическому сжатию, система нагружения состояла из двух стержней (нагружающего и опорного) с высоким пределом текучести, в процессе испытания образец помещался между ними. В процессе эксперимента были зафиксированы показатели давления в камере, скорость налетания ударника на нагружающий стержень и определялась средняя скорость деформации.

После разрушения образцов фрагменты были собраны и изучены методами растровой электронной сканирующей микроскопии (микроскоп марки S-3400N (Hitachi, Япония)) при увеличении ×30, ×70 и ×500, в качестве подложки при проведении съемки частиц использовался углеродный скотч.

Полученные изображения были проанализированы для установления размера и морфологических особенностей фрагментов разрушения программным обеспечением ImageJ-FiJi (модуль Analyze particles). Морфологические особенности фрагментов разрушения описывались показателем коэффициента сферичности.

Достоверность различий была установлена методом Фишера.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В табл. 1 приведены данные по испытаниям образцов. Для каждого образца было проанализировано разное количество отдельных фрагментов разрушения, в зависимости от того, сколько попало в поля зрения при оценке результатов методом анализа изображений [14-16]. Совокупность геометрических параметров (форма и размер) фрагментов разрушения были сопоставлены между собой с помощью статистического анализа по методу Фишера. Было установлено, что все три совокупности фрагментов достоверно отличаются друг от друга по фракционному составу и не отличаются по морфологическому, несмотря на различную степень отклонения от нормальности полученных данных (табл. 2).

При оценке фракционного состава образцов, разрушенных при разных величинах средней скорости деформации, отличается показатель количества фрагментов размером до 100 мкм, учитывая доказанную разницу при сопоставлении выборок, можно утверждать, что показатель процентного содержания наиболее мелкодисперсных фрагментов является таким, по которому следует судить о диссипативной энергопоглощающей способности материала [17-18].

**Таблица 1**  
**Параметры испытаний образцов**  
**Table 1. Sample Test Parameters**

| № | Давление в камере, МПа | Скорость ударника, м/с | Средняя скорость деформации ( $V_d$ ), $c^{-1}$ |
|---|------------------------|------------------------|---|
| 1 | 0,5                    | 8,3                    | ~250  |
| 2 | 1,0                    | 17,4                   | ~700  |
| 3 | 2,0                    | 78,0                   | ~1500   |

По результатам экспериментов построена линейная зависимость (рисунок), характеризующая процентное содержание микродисперсной

фракции фрагментов разрушения, размером менее 100 мкм, от средней скорости деформации. Данная зависимость не является полной, так как экспериментально не установлено, при каких скоростях начинают образовываться наноразмерные фрагменты, однако, она может использоваться для прогнозирования фрагментации данного материала в аналогичных условиях нагружения, но при других скоростях.

**Таблица 2**  
**Характеристика фрагментов разрушения образцов при испытаниях**  
**Table 2. Characterization of fragments of destruction of samples during testing**

| № | Кол-во фрагментов разрушения, ед. | Средний показатель размера, мкм | Результат анализа размера фрагментов разрушения ( $F_{крит} = 1,103$ ) | Средний показатель коэф. сферичности | Результат анализа коэф. сферичности фрагментов разрушения ( $F_{крит} = 1,106$ ) |
|---|-----------------------------------|---------------------------------|--|--------------------------------------|--|
| 1 | 1825                              | 51,718                          | $F_{1-2} = 2,014^*$  | 0,72                                 | $F_{1-2} = 1,013$  |
| 2 | 1743                              | 52,613                          | $F_{2-3} = 2,007^*$  | 0,70                                 | $F_{2-3} = 1,091$  |
| 3 | 1689                              | 55,807                          | $F_{1-3} = 1,919^*$  | 0,76                                 | $F_{1-3} = 1,100$  |

Примечания: \* достоверные различия

1-2 – сравнение между первой и второй группой фрагментов;

2-3 – сравнение между второй и третьей группой фрагментов;

3-1 – сравнение между первой и третьей группой фрагментов.

Notes: \* significant differences

1-2 - comparison between the first and second group of fragments;

2-3 - comparison between the second and third group of fragments;

3-1 is a comparison between the first and third group of fragments.

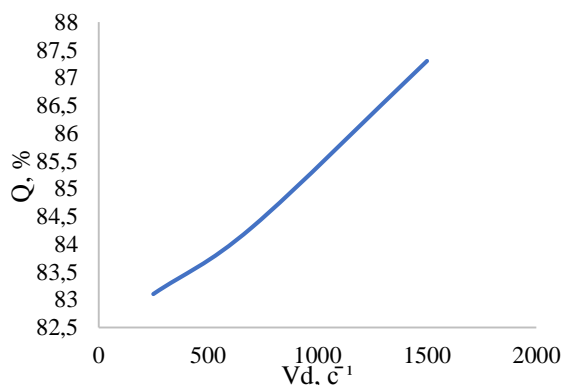


Рис. Зависимость доли фрагментов разрушения размером до 100 мкм ( $Q$ , %) в общей массе микроразмерных фрагментов разрушения от средней скорости деформации при динамическом сжатии по методу разрезного стержня Гопкинсона-Кольского

Fig. Dependence of the fraction of fracture fragments up to 100  $\mu m$  ( $Q$ , %) in the total mass of micro-sized fracture fragments on the average strain rate during dynamic compression by the method of the split Hopkinson-Kola rod

В свою очередь доказанное отсутствие разницы формы фрагментов разрушения позволяет утверждать, что фрагментация материала при большей скорости деформации вероятно будет

продолжаться с тенденцией к увлечению доли фрагментов разрушения размером до 100 мкм, а при достижении порогового значения скорости следующий этап фрагментации будет сопровождаться изменением формы фрагментов разрушения.

Опираясь на известный опыт [19-20], исследуемый литой слюдокристаллический материал можно охарактеризовать как материал, способный к диссипации кинетической энергии ударно-волнового воздействия.

## ВЫВОДЫ

Таким образом, установлено, что литой слюдокристаллический материал фторфлогопитового типа при динамических сжимающих нагрузках, воздействующих со средней скоростью деформации 250-1500  $c^{-1}$ , разрушается с образованием мелкодисперсных фрагментов. При этом доля фрагментов разрушения размером до 100 мкм в общей массе фрагментов до 1000 мкм составила от 83 до 87%, что позволяет оценить литой слюдокристаллический материал, как перспективный для изготовления бронезащитных изделий.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Grishchenko, D.N., Medkov, M.A., Papynov, E.K.** Fabrication of B-Containing Glass and Glass-Ceramic Materials via Liquid Organic Phase Pyrolysis. *Russ. J. Inorg. Chem.* 2020. 65. P. 431–439. DOI: 10.1134/S0036023620030055.
2. **Хасанов О.Л., Двиллис Э.С., Полисадова В.В., Хасанов А.О., Бикбаева З.Г.** Бронекерамика из карбида бора. *Нанотехнологии. Экология. Производство.* 2013. № 3 (22). С. 33.
3. **Кульницкий Б.А., Гордеева Т.А., Овсянников Д.А., Попов М.Ю., Бланк В.Д.** Фазовые превращения элементов IV группы: углерод, кремний, германий при воздействии циклических напряжений до 6 ГПа. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2020. Т. 63. Вып. 12. С. 10-15. DOI: 10.6060/ivkkt.20206312.8y.
4. **Муляр С.Г., Галиновский А.Л., Колпаков В.И., Сайфутдинов Р.Р.** Методика расчёта пулестойкости средств индивидуальной бронезащиты. *Инновации в науке.* 2012. № 14-1. С. 94-106.
5. **Davydova M., Uvarov S., Naimark O.** The effect of porosity on fragmentation statistics of dynamically loaded ZrO<sub>2</sub> ceramics. *Frattura ed Integrità Strutturale.* 2018. V. 12. N 43. P. 106-112. DOI: 10.3221/IGF-ESIS.43.08.
6. **Макаров П.В., Евтушенко Е.П., Смолин И.Ю., Трубицын А.А., Трубицына Н.В., Ворошилов С.П., Ботвенко Д.В., Голоскоков С.И.** Моделирование разрушения образцов углей при динамическом нагружении. *Вестн. Научного центра.* 2008. № 2. С. 31-38.
7. **Юдин М.В., Николаев М.М., Игнатова А.М., Игнатов М.Н.** Функциональная и технологическая схема производства фторфлогопитовых изделий. *Вестн. Перм. нац. иссл. политех. ун-та. Машиностр., материаловед.* 2017. Т. 19. № 2. С. 118–132. DOI: 10.15593/2227-9877/2017.2.09.
8. **Лорян В.Э., Качин А.Р., Уваров В.И.** Синтез в режиме горения слюдокристаллических материалов на основе фторфлогопита с использованием минерального сырья и отходов алюминиевого производства. *Перспектив. матер.* 2017. № 2. С. 72-78.
9. **Лайзерзон М.С.** Синтетическая слюда. М.: Госэнергоиздат. 1962. 86 с.
10. **Ильина В.П.** Стеклокристаллические материалы на основе минерального и техногенного сырья Карелии. *Стекло и керамика.* 2007. № 9. С. 20-23.
11. **Суворова О.В., Макаров Д.В., Мелконян Р.Г., Макарова И.В.** Возможности и перспективы использования отходов горно-промышленного комплекса для получения стекла и стеклокристаллических материалов. *Экология промышл. пр-ва.* 2011. № 1. С. 54-60.
12. **Grujčić M., Arakere G., He T., Bell W.C., Glomski P.S., Cheeseman B.A.** Multi-scale ballistic material modeling of cross-plyed compliant composites. *Composit. Pt. B: Eng.* 2009. N 40. P. 468-482. DOI: 10.1016/j.compositesb.2009.02.002.
13. **Макаров П.В.** Математическая теория эволюции нагружаемых твердых тел и сред. *Физ. мезомеханика.* 2008. Т. 11. № 3. С. 19-35.
14. **Ignatova A.M., Ignatov M.N., Nikhamkin M.A., Voronov Lv.** Evaluation of the fragmentation of an oxide-silicate material by image analysis. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering International Workshop "Advanced Technologies in Material Science, Mechanical and Automation Engineering – MIP: Engineering – 2019". Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. 2019. P. 48-51. DOI: 10.1088/1757-899X/537/2/022051.

## REFERENCES

1. **Grishchenko, D.N., Medkov, M.A., Papynov, E.K.** Fabrication of B-Containing Glass and Glass-Ceramic Materials via Liquid Organic Phase Pyrolysis. *Russ. J. Inorg. Chem.* 2020. 65. P. 431–439. DOI: 10.1134/S0036023620030055.
2. **Khasanov O.L., Dvilis E.S., Polissadova V.V., Khasanov A.O., Bikbaeva Z.G.** Armored ceramics from boron carbide. *Nanotekhnol. Ecologiya. Proizvodstvo.* 2013. N 3 (22). P. 33 (in Russian).
3. **Kulnitskiy B.A., Gordeeva T.A., Ovsyannikov D.A., Popov M.Y., Blank V.D.** Phase transformations of group IV elements: carbon, silicon, germanium under cyclic stresses up to 6 GPa. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol. [ChemChemTech].* 2020. V. 63. N 12. P. 10-15 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20206312.8y.
4. **Mulyar S.G., Galinovsky A.L., Kolpakov V.I., Sayfutdinov R.R.** Methodology for calculating the bullet resistance of individual armor protection equipment. *Innovatsii v Nauke.* 2012. N 14-1. P. 94-106 (in Russian).
5. **Davydova M., Uvarov S., Naimark O.** The effect of porosity on fragmentation statistics of dynamically loaded ZrO<sub>2</sub> ceramics. *Frattura ed Integrità Strutturale.* 2018. V. 12. N 43. P. 106-112. DOI: 10.3221/IGF-ESIS.43.08.
6. **Makarov P.V., Evtushenko E.P., Smolin I.Yu., Trubitsyn A.A., Trubitsina N.V., Voroshilov S.P., Botvenko D.V., Goloskokov S.I.** Modeling the destruction of coal samples under dynamic loading. *Vestn. Nauchnogo Tsentra.* 2008. N 2. P. 31-38 (in Russian).
7. **Yudin M.V., Nikolaev M.M., Ignatova A.M., Ignatov M.N.** Functional and technological scheme for the production of fluorophlogopite products. *Vestn. Perm. Nats. Issled. Politekh. Un-ta. Mashinostr., Materialoved.* 2017. V. 19. N 2. P. 118–132 (in Russian). DOI: 10.15593/2227-9877/2017.2.09.
8. **Loryan V.E., Kachin A.R., Uvarov V.I.** Synthesis in the combustion mode of mica-crystalline materials based on fluorophlogopite using mineral raw materials and waste from aluminum production. *Perspektiv. Mater.* 2017. N 2. P. 72-78 (in Russian).
9. **Laizerzon M.S.** Synthetic mica. M.: Gosenergoizdat. 1962. 86 p. (in Russian).
10. **Ilyina V.P.** Glass-crystalline materials based on the mineral and technogenic raw materials of Karelia. *Steklo Keramika.* 2007. N 9. P. 20-23 (in Russian).
11. **Suvorova O.V., Makarov D.V., Melkonyan R.G., Makarova I.V.** Opportunities and prospects for the use of waste from the mining and industrial complex to produce glass and glass-crystalline materials. *Ecologiya Promyshl. Pr-va.* 2011. N 1. P. 54-60 (in Russian).
12. **Grujčić M., Arakere G., He T., Bell W.C., Glomski P.S., Cheeseman B.A.** Multi-scale ballistic material modeling of cross-plyed compliant composites. *Composit. Pt. B: Eng.* 2009. N 40. P. 468-482. DOI: 10.1016/j.compositesb.2009.02.002.
13. **Makarov P.V.** The mathematical theory of the evolution of loaded solids and media. *Fiz. Mezomekhan.* 2008. V. 11. N 3. P. 19-35 (in Russian).
14. **Ignatova A.M., Ignatov M.N., Nikhamkin M.A., Voronov Lv.** Evaluation of the fragmentation of an oxide-silicate material by image analysis. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering International Workshop "Advanced Technologies in Material Science, Mechanical and Automation Engineering – MIP: Engineering – 2019". Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. 2019. P. 48-51. DOI: 10.1088/1757-899X/537/2/022051.

15. **Горбушин Н.А., Петров Ю.В.** Динамическая фрагментация твердых частиц при взаимодействии с жесткой преградой. *Журн. техн. физики*. 2014. № 2. С. 39-44. DOI: 10.1134/S1063784214020091.
16. **Албагачиев А.Ю., Головешкин В.А., Холин Н.Н.** Динамика и разрушение магматических снарядов при подводном извержении вулканов. *Вестн. Томск. гос. ун-та. Математика и механика*. 2019. № 59. С. 29-36. DOI: 10.17223/19988621/59/4.
17. **Савенков Г.Г., Кузнецов А.В., Брагов А.М., Константинов А.Ю., Ломунов А.К.** Структурно-геометрические переходы при динамическом нагружении материалов. *Вестн. ПНИПУ. Механика*. 2016. № 3. С. 164-173. DOI: 10.15593/perm.mech/2016.3.11.
18. **Naimark O.B.** Some regularities of scaling in plasticity, fracture and turbulence. *Phys. Mesomech.* 2015. V. 18. P. 71-83.
19. **Пусев В.И., Овчинников А.Ф., Марков В.А., Киселев В.М., Андрияшин А.А.** Вопросы бронирования и противостояния надводных средств поражения и брони броненосцев. *Оборонная техника*. 2007. № 3-4. С. 104-118.
20. **Овсиенко А.И., Румянцев В.И., Беспалов И.А., Сильников Н.М.** Перспективы применения реакционноспеченного карбида бора в качестве броневой керамики. *Вопр. оборонной техники. Сер. 16: Техн. ср-ва противод. терроризму*. 2015. № 7-8. С. 95-101.
15. **Gorbushin N.A., Petrov Yu.V.** Dynamic fragmentation of solid particles when interacting with a rigid barrier. *Zhurn. Tekhn. Fiziki*. 2014. N 2. P. 39-44 (in Russian). DOI: 10.1134/S1063784214020091.
16. **Albagachiev A.Yu., Goloveshkin V.A., Kholin N.N.** Dynamics and destruction of magma shells during underwater volcanic eruptions. *Vestn. Tomsk. Gos. Un-ta. Matem. Mekhanika*. 2019. N 59. P. 29-36 (in Russian). DOI: 10.17223/19988621/59/4.
17. **Savenkov G.G., Kuznetsov A.V., Bragov A.M., Konstantinov A.Yu., Lomunov A.K.** Structural-geometric transitions under dynamic loading of materials. *Vestn. PNIPU. Mekhanika*. 2016. N 3. P. 164-173 (in Russian). DOI: 10.15593/perm.mech/2016.3.11.
18. **Naimark O.B.** Some regularities of scaling in plasticity, fracture and turbulence. *Phys. Mesomech.* 2015. V. 18. P. 71-83.
19. **Pusev V.I., Ovchinnikov A.F., Markov V.A., Kiselev V.M., Andryushin A.A.** Issues of booking and opposition to surface weapons and armor of armadillos. *Oboronnaya Tekhnika*. 2007. N 3-4. P. 104-118 (in Russian).
20. **Ovsienko A.I., Rumyantsev V.I., Bepalov I.A., Silnikov N.M.** Prospects for the use of reactive sintered boron carbide as an armored ceramic. *Vopr. Oboronnoi Tekhniki. Ser. 16: Tekhn. Sr-va Protivod. Terrorizmu*. 2015. N 7-8. P. 95-101 (in Russian).

*Поступила в редакцию 16.06.2020  
Принята к опубликованию 29.12.2020*

*Received 16.06.2020  
Accepted 29.12.2020*