

DOI: 10.15593/2224-9877/2015.3.09

УДК 539.3, 539.4

А.М. Игнатова, М.А. Нихамкин, В.Л. Воронов, М.Н. ИгнатовПермский национальный исследовательский
политехнический университет, г. Пермь, Россия

ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ И МЕХАНИЗМ РАЗРУШЕНИЯ СИНТЕТИЧЕСКИХ МИНЕРАЛЬНЫХ БАЗАЛЬТОПОДОБНЫХ СПЛАВОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ МЕТАЛЛИЧЕСКИМ ПРОБОЙНИКОМ

В качестве объекта исследования рассматриваются синтетические минеральные базальтоподобные сплавы с добавлением Cr_2O_3 и без добавок. Структура этих материалов состоит из 95 % кристаллических и 5 % аморфных фазовых составляющих, изучаемые материалы обладают выраженными диссипативными свойствами. Для реализации потенциала диссипативных свойств этих материалов необходимо подробное изучение их деформационного поведения при высокоскоростных ударных нагрузках. Ранее авторами было установлено, что при скоростях 2700–3000 м/с в материалах происходят значительные фазовые и структурные изменения, вплоть до образования ударных модификаций оксида кремния, таких как стишовит. Однако предшествующие им изменения, которые должны были быть, зафиксированы не были, для установления механизма разрушения синтетических минеральных базальтоподобных сплавов при ударном воздействии необходимо идентифицировать начальные фазовые преобразования, сопутствующие этому процессу. Авторы исследования предлагают установить начальные фазовые превращения, сопровождающие разрушение синтетических минеральных базальтоподобных сплавов при контакте с металлическим пробойником. Для разгона пробойника используется пневматическая установка, для фиксации этапов процесса – высокоскоростная видеосъемка, а для исследования фрагментов разрушения – растровая электронная микроскопия и рентгено-спектральный микрозондовый анализ. В результате исследования получены данные, характеризующие деформационное поведение синтетических минеральных сплавов при ударе стальным шариком диаметром 23,8 мм со скоростью 233–234 м/с. Обнаружено, что начало процесса разрушения характеризуется частичным оплавлением синтетического минерального базальтоподобного сплава в зоне контакта с пробойником, полиморфные превращения не наблюдаются, но при этом происходит уплотнение кристаллических составляющих.

Ключевые слова: фрагментация, хрупкое разрушение, керамика, каменное литье, синтетические минеральные сплавы, высокоскоростная съемка, удар, трещины, разрушение, базальт.

A.M. Ignatova, M.A. Nikhamkin, L.V. Voronov, M.N. Ignatov

Perm National Research Polytechnical University, Perm, Russian Federation

**PHASE TRANSFORMATIONS
AND FRACTURE MECHANISM OF SYNTHETIC
MINERAL SUCH BASALT ALLOYS UNDER ACTION
OF METAL IMPACTOR**

As the object of study are considered synthetic mineral such basalt alloys with the addition of Cr_2O_3 and without additives. The structure of these materials is composed of 95% and 5% of crystalline amorphous phase components, materials studied have strong dissipative properties. To realize the potential of the dissipative properties of these materials must be a detailed study of the deformation behavior at high shock loads. Previous authors have found that at speeds of 2700-3000 m / s in the materials undergoing significant phase and structural changes, including the formation of shock modifications silica such as stishovite. However, prior to them the changes that had to be fixed were not, to establish the mechanism of destruction of synthetic mineral such basalt alloys when impact is necessary to identify the initial phase transformations that accompany this process. The study's authors suggest to establish the initial phase transformations that accompany the destruction of synthetic mineral such basalt alloys in contact with a metal punch. To disperse the punch used pneumatic installation, the process steps to fix the high-speed video photography, and for the study of fracture fragments of scanning electron microscopy and X-ray microprobe analysis. The study provided data characterizing the deformation behavior of the synthetic mineral alloys impact steel ball with a diameter of 23.8 mm at a speed of 233-234 m / s. It was found that the onset of process failure is characterized by partial melting of the synthetic mineral such basalt alloy in the contact zone with the punch, polymorphic transformations are not observed, but it is compacted crystalline components.

Keywords: fragmentation, fragile destruction, ceramic, stone casting, synthetic mineral alloys, high speed photography, impact, cracks, destruction, basalt.

Высокоскоростное ударное воздействие на материал, помимо деформации и разрушения, может привести к инициации в нем фазовых превращений, в особенности это свойственно материалам, склонным к диссипации (поглощению кинетической энергии воздействия). В результате фазовых превращений, вызванных ударным воздействием, материал способен приобретать новые свойства. В предшествующих исследованиях авторы настоящей статьи установили, что способностью поглощать кинетическую энергию (диссипировать) обладают синтетические минеральные сплавы [1–3]. Данные, полученные авторами при экспериментах с использованием рельсотрона при скорости воздействия пробойником 2700–3000 м/с [4, 5], указывают на то, что в результате ударно-волнового воздействия происходит частичная аморфизация материала и образование ударных модификаций в мик-

рообъемах. Однако при столь высоких скоростях воздействия невозможно зафиксировать фазовые превращения, предшествующие этим изменениям и установить полный механизм разрушения синтетических минеральных сплавов. Для выявления ранних этапов фазовых превращений синтетических минеральных сплавов необходимо установить фазовые превращения, происходящие с ними при меньших скоростях ударного воздействия.

Настоящая статья посвящена выявлению фазовых превращений в синтетических минеральных базальтоподобных сплавах с целью уточнения механизма их разрушения при воздействии металлическим пробойником.

Синтетические минеральные сплавы представляют собой материалы, полученный при плавлении природного или техногенного минералого-оксидного сырья основного и ультраосновного характера с содержанием SiO_2 более 40 %, доля кристаллических фаз составляет порядка 93–95 %, остальная часть структуры имеет аморфное строение. Кристаллические фазы состоят из шпинеле- и пироксеноподобных составляющих. Аморфная фаза распределяется в виде прослойки между кристаллическими образованиями относительно равномерно.

В качестве объектов исследования рассматриваются два вида базальтоподобных синтетических минеральных сплавов: один получен с добавлением 5 % Cr_2O_3 , а другой в результате плавления природного базальта без добавок. Макроструктура рассматриваемых в исследовании материалов, идентифицированная оптической микроскопией, представлена на рис. 1.

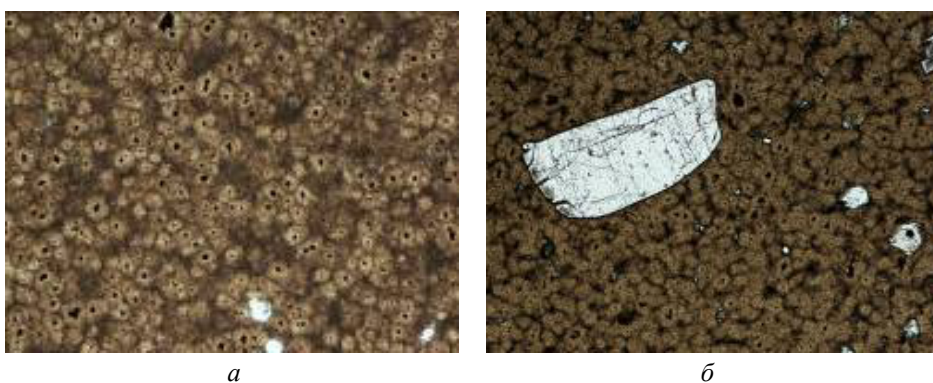


Рис. 1. Структура синтетических минеральных базальтоподобных сплавов: *а* – с добавлением Cr_2O_3 ($\times 100$); *б* – без добавок ($\times 50$)

Ударное воздействие оказывалось с помощью металлического пробойника-шарика диаметром 23,8 мм (сталь 20), для разгона которого использовалась пневматическая установка (рис. 2). Для проведения экспериментов, результаты которых описаны в настоящей работе, установка использовалась в комплектации с разгонной трубой с внутренним диаметром ($25 \pm 0,2$) мм и длиной 3950 мм, с устройством закладки телескопического типа.



Рис. 2. Схема установки по проведению испытаний

Управление процессом эксперимента осуществлялось автоматизированной системой на базе системы PXI с набором специальных модулей сопряжения разработки National Instruments и удаленного персонального компьютера.

Образец хромистого синтетического минерального сплава представлял собой прямоугольную плитку размером $115 \times 180 \times 15$, а образец базальтового типа был выполнен в форме фигурной плитки, вписывающейся в размеры прямоугольника $200 \times 100 \times 15$.

Параметры эксперимента: для образца синтетического минерального базальтоподобного сплава с добавлением Cr_2O_3 скорость ударника составила 233 м/с, для образца синтетического минерального базальтоподобного сплава без добавок скорость ударника составила 234 м/с.

Для улавливания фрагментов разрушения в испытательной камере был размещен углеродный скотч, осажденные на его поверхность фрагменты разрушения были исследованы методом электронной растровой микроскопии с применением микрозондового анализа (микроскоп высокого разрешения S3400N фирмы HITACHI). Исследование поверхности ударника после столкновения было проведено методом оптической микроскопии (бинокляр Olympus SZ61, поляризационный оптический микроскоп Olympus BX51).

Характерной особенностью для обоих образцов является то, что на ударнике после разрушения в зоне контакта с образцом обнаружен пористый припекшийся ореол (рис. 3). Этот ореол является следствием контакта пробойника и поверхности материала и выделения теплоты при фазовых превращениях в материале образца в момент соударения, эти процессы сопровождаются оплавлением синтетического минерального базальтоподобного сплава в момент соударения (рис. 4).



Рис. 3. Ударник – стальной шарик: *а* – до испытания; *б* – после испытания

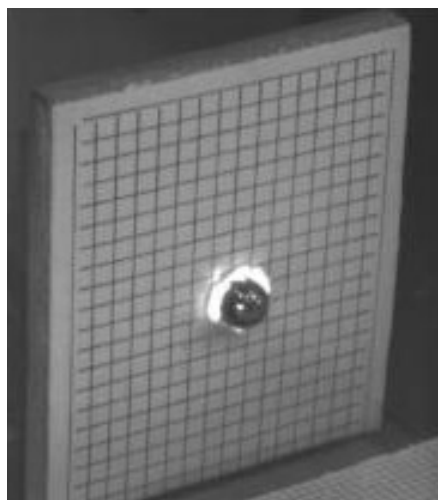


Рис. 4. Момент соударения пробойника и образца, высокоскоростная съемка, скорость съемки 50 000 кадр./с

При обследовании поверхности спеченного ореола из синтетического минерального базальтоподобного сплава на поверхности пробойника установлено, что он является высокопористым и зернистым и име-

ет большое количество трещин (рис. 5). Частицы синтетического минерального сплава легко удаляются с поверхности шарика. Исследование этих частиц показало, что они представляют собой осколочные спеченные образования с оплавлением по поверхности зерен (рис. 6).

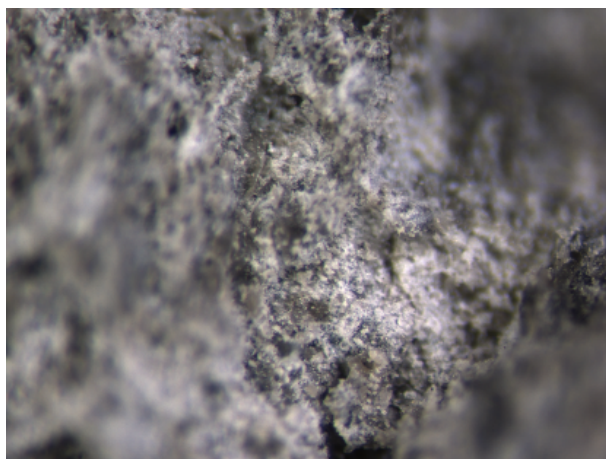


Рис. 5. Поверхность ореола на ударнике ($\times 20$)

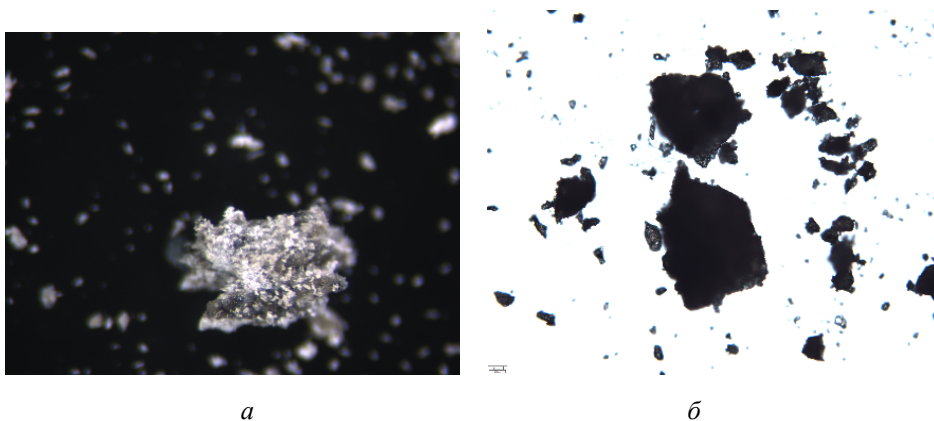


Рис. 6. Частицы из ореола на ударнике: *а* – бинокуляр ($\times 20$);
б – оптический поляризационный микроскоп ($\times 50$)

Исследование растровой электронной микроскопией и рентгеноспектральным микрозондовым анализом показало, что материалом частицы является алюмосиликат (рис. 7), по составу частицы близки к аморфной составляющей исследованных синтетических минеральных сплавов, которая является более легкоплавкой, чем остальные составляющие [6].

Состав частицы синтетического минерального
базальтоподобного сплава с поверхности пробойника, %

Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	TiO ₂	FeO
1,99	8,39	25,47	42,91	7,15	0,86	13,22

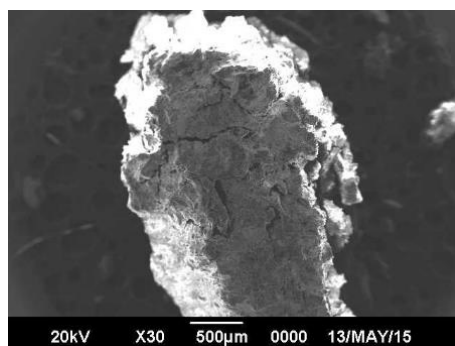
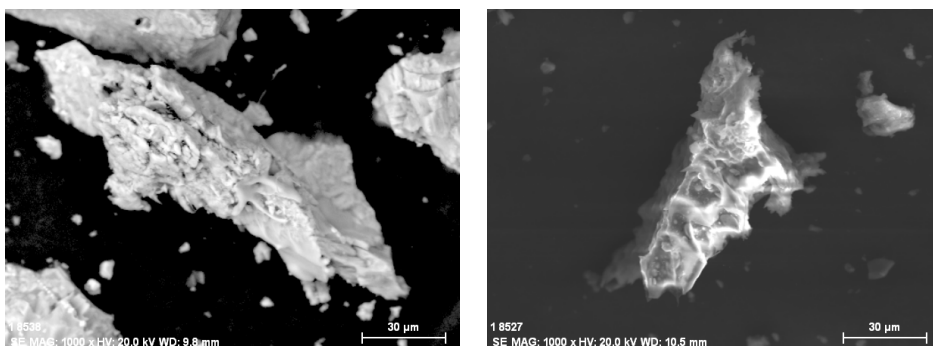


Рис. 7. Частица синтетического минерального базальтоподобного сплава с поверхности пробойника, РЭМ

Исследование фрагментов разрушения позволило выявить следующее. Для обоих экспериментов характерно образование обломочных аморфных частиц с признаками оплавления (рис. 8), в предшествующих экспериментах подобное не фиксировалось [1–5]. Встречаются также аморфные фрагменты без следов оплавления (рис. 9). Оплавленные частицы предположительно являются вторичными, т.е. их аморфизация произошла в результате ударного воздействия, а неоплавленные – первичными, они представляют собой осколки аморфной фазы, изначально присутствовавшей в структуре синтетического минерального сплава.

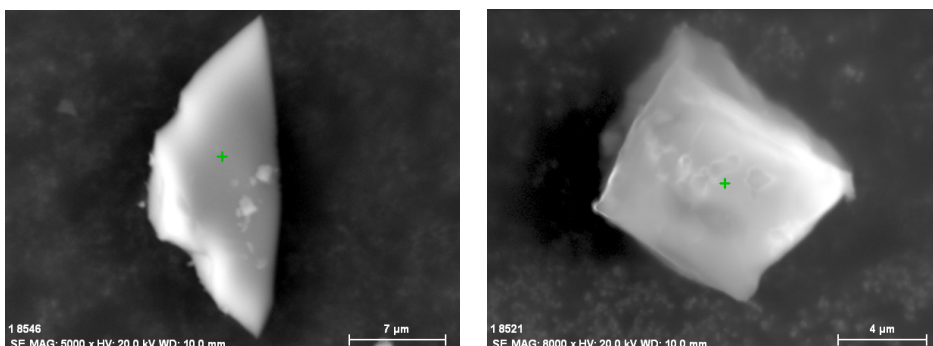
При исследовании фрагментов образца синтетического минерального базальтоподобного сплава с добавлением Cr_2O_3 обнаружено, что разрушение в зоне кристаллических фаз сопровождалось формированием столбчатого излома (рис. 10), что, если обратиться к геологическим данным [7], позволяет предположить, что в результате воздействия произошло уплотнение материала. Полиморфных превращений зафиксировано не было, поскольку величины давления в зоне удара на скоростях экспериментов не достигли значения, обеспечивающего изменения положения кремнекислородных тетраэдров в структуре кристаллических составляющих синтетического минерального сплава.



a

б

Рис. 8. Фрагменты разрушения с частичным оплавлением:
a – синтетический минеральный базальтоподобный сплав
с добавлением Cr_2O_3 ; *б* – без добавок



a

б

Рис. 9. Аморфный фрагмент разрушения без оплавления: *a* – синтетический
минеральный базальтоподобный сплав с добавлением Cr_2O_3 ; *б* – без добавок

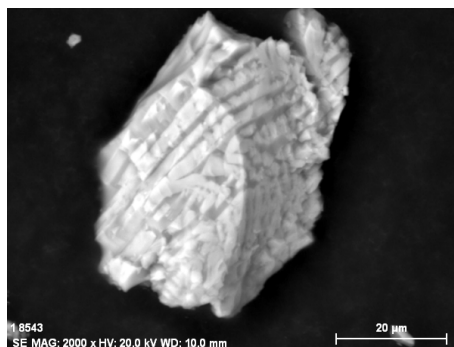


Рис. 10. Фрагмент разрушения синтетического
минерального базальтоподобного сплава с добавлением Cr_2O_3
со столбчатой поверхностью излома

В некоторых фрагментах между столбчатыми гранями обнаруживаются пустоты (рис. 11), которые предположительно образуются в результате разрушения более хрупких составляющих.

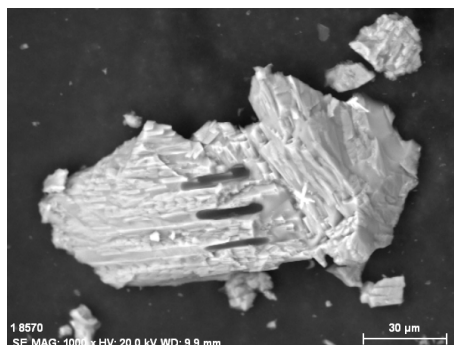


Рис. 11. Фрагмент разрушения синтетического минерального базальтоподобного сплава с добавлением Cr_2O_3 со столбчатой поверхностью излома и пустотами

Кристаллические агрегаты шпинелеподобных фаз, которые являются наиболее твердыми [8] из всех структурных составляющих синтетических минеральных базальтоподобных сплавов, также представлены на изломах некоторых фрагментов (рис. 12). В них имеются не свойственные стабильному состоянию изменения, а именно сростки и признаки деформации. Образование таких сростков можно объяснить как процесс двойникования, что свидетельствует о роли температуры в данном фазовом изменении, поскольку двойникование – это явление, обусловленное ростом кристаллов из расплавов.

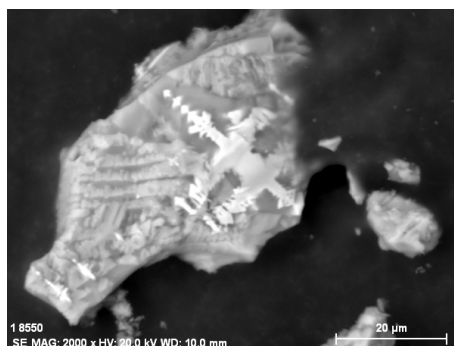


Рис. 12. Двойникованные шпинелеподобные кристаллиты в структуре фрагмента разрушения образца синтетического минерального базальтоподобного сплава с добавлением Cr_2O_3

Свидетельством того, что ударное воздействие металлическим пробойником на скоростях около 230 м/с сопровождается оплавлением синтетических минеральных базальтоподобных сплавов в микрообъемах, являются пористые фрагменты разрушения (рис. 13), предположительно образовавшиеся в зоне наиболее интенсивного разогрева образца, т.е. в зоне контакта с ударником. Размер и сферичная форма пор указывают на то, что такой фрагмент является продуктом температурного процесса.

При исследовании фрагментов образца синтетического минерального базальтоподобного сплава без добавок обнаружено, что, несмотря на то что процесс соударения также сопровождается оплавлением, при разрушении кристаллических составляющих не формируется столбчатого излома, а напротив, образуется рыхлый излом (рис. 14), отсутствие двойниковых кристаллов и пористых фрагментов также говорит о том, что интенсивность фазовых изменений при ударе значительно ниже, чем у предшествующего образца.

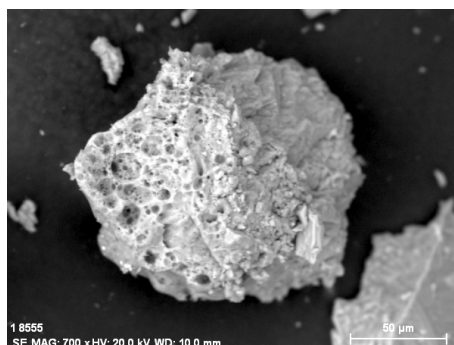


Рис. 13. Пористый фрагмент разрушения образца синтетического минерального базальтоподобного сплава с добавлением Cr_2O_3

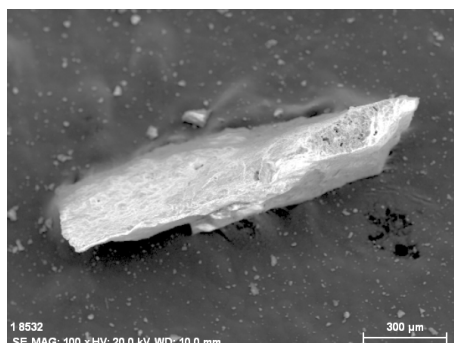


Рис. 14. Фрагмент разрушения синтетического минерального базальтоподобного сплава без добавок с рыхлым изломом

Таким образом, выявлены фазовые превращения в синтетических минеральных базальтоподобных сплавах при воздействии металлическим пробойником. Установлено, что с точки зрения механизма разрушения фазовые превращения сопровождаются выделением теплоты, достаточной для частичного оплавления материала в микрообъемах, это приводит к аморфизации некоторой его части. Структура кристаллических составляющих уплотняется, возникают условия для двойникового, однако полиморфных превращений на скоростях воздействия около 230 м/с не происходит.

Список литературы

1. Исследование диссипативных свойств синтетических минеральных сплавов для создания на их основе броневого защиты / А.М. Игнатова, А.О. Артемов, В.В. Чудинов, М.Н. Игнатов, М.А. Сокоиков // Вестник Самар. гос. техн. ун-та. Сер.: Технические науки. – 2012. – № 3 (35). – С. 105–112.
2. Методика исследования диссипативных свойств синтетических минеральных сплавов при высокоскоростном пробивании / А.М. Игнатова, А.О. Артемов, М.Н. Игнатов, М.А. Сокоиков // Фундаментальные исследования. – 2012. – № 9–1. – С. 145–150.
3. Игнатова А.М. Ударный метаморфизм петругических материалов на примере синтетических минеральных сплавов // Стекло и керамика. – 2013. – № 1. – С. 40–45.
4. Ignatova A.M. Shock Metamorphism of Petrurgical Materials: Synthetic Mineral Alloys // Glass and Ceramics. – May 2013. – Vol. 70, iss. 1–2. – P. 34–38.
5. Ignatova A.M., Ignatov M.N. Research of deformation and fracture of inorganic oxide materials with polymeric structure under shock-wave effect on the example of synthetic mineral alloys // XVIII International conference on mechanics of composite materials, Рига, 2–6 июня 2014. – Рига, 2014. – С. 36.
6. Swegle J.W., Grady D.E. Shock viscosity and the prediction of shock wave rise times // J. Appl. Phys. – 1985. – Vol. 58, № 2. – P. 692–701.
7. Asay J.R. The use of shock-structure methods for evaluating high-pressure material properties // Int. J. Impact Engng. – 1997. – Vol. 20. – P. 27–61.

8. A numerical investigation of the influence of friction on energy absorption by a high-strength fabric subjected to ballistic impact / Y. Duan, M. Keefe, T.A. Bogetti, B.A. Cheeseman, B. Powers // *International Journal of Impact Engineering*. – 2006. – Vol. 32. – P. 1299–1312.

References

1. Ignatova A.M., Artemov A.O., Chudinov V.V., Ignatov M.N., Sokovikov M.A. Issledovanie dissipativnykh svoystv sinteticheskikh mineral'nykh spлавov dlia sozdaniia na ikh osnove bronevoi zashchity [Study of dissipative properties of synthetic mineral alloys to create on their basis of armor protection]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, 2012, no. 3 (35), pp. 105-112.

2. Ignatova A.M., Artemov A.O., Ignatov M.N., Sokovikov M.A. Metodika issledovaniia dissipativnykh svoystv sinteticheskikh mineral'nykh spлавov pri vysokoskorostnom probivaniii [Method of research of dissipative properties of synthetic mineral alloys at high speed punching]. *Fundamental'nye issledovaniya*, 2012, no. 9-1, pp. 145-150.

3. Ignatova A.M. Udarnyi metamorfizm petrugicheskikh materialov na primere sinteticheskikh mineral'nykh spлавov [Shock metamorphism of petrugical materials on the example of synthetic mineral alloys]. *Steklo i keramika*, 2013, no. 1, pp. 40-45.

4. Ignatova A.M. Shock metamorphism of petrugical materials: synthetic mineral alloys. *Glass and Ceramics*, May 2013, vol. 70, iss. 1-2, pp. 34-38.

5. Ignatova A.M., Ignatov M.N. Research of deformation and fracture of inorganic oxide materials with polymeric structure under shock-wave effect on the example of synthetic mineral alloys. *XVIII International conference on mechanics of composite materials*. Riga, 2014, p. 36.

6. Swegle J.W., Grady D.E. Shock viscosity and the prediction of shock wave rise times. *Journal of Applied Physics*, 1985, vol. 58, no. 2, pp. 692-701.

7. Asay J.R. The use of shock-structure methods for evaluating high-pressure material properties. *International Journal of Impact Engineering*, 1997, vol. 20, pp. 27-61.

8. Duan Y., Keefe M., Bogetti T.A., Cheeseman B.A., Powers B. A Numerical investigation of the influence of friction on energy absorption by a high-strength fabric subjected to ballistic impact. *International Journal of Impact Engineering*, 2006, vol. 32, pp. 1299-1312.

Получено 29.06.2015

Об авторах

Игнатова Анна Михайловна (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института безопасности труда, производства и человека Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: iampstu@gmail.com.

Нихамкин Михаил Александрович (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры «Авиационные двигатели» Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: nikhamkin@mail.ru.

Воронов Владимир Леонидович (Пермь, Россия) – доцент кафедры «Авиационные двигатели» Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: kaf-ad@cpl.pstu.ac.ru.

Игнатов Михаил Николаевич (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры «Сварочное производство и технология конструкционных материалов» Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: iampstu@gmail.com.

About the authors

Anna M. Ignatova (Perm, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Senior Researcher, Institute of Labor, Human, Manufacturing Safety, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: iampstu@gmail.com.

Mikhail A. Nikhamkin (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department “Aircraft Engine”, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: nikhamkin@mail.ru.

Leonid V. Voronov (Perm, Russian Federation) – Associate Professor, Department “Aircraft Engine”, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: kaf-ad@cpl.pstu.ac.ru.

Mikhail M. Ignatov (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department “Welding and Construction Materials”, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: iampstu@gmail.com.