

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ФРАГМЕНТАЦИИ И РАЗРУШЕНИЯ ПЛАСТИН ИЗ СИНТЕТИЧЕСКИХ МИНЕРАЛЬНЫХ СПЛАВОВ ПРИ СКОРОСТНОМ УДАРЕ

ANALYSIS OF FRAGMENTATION OF PLATES OF SYNTHETIC MINERAL ALLOYS UNDER IMPACT OF BALL HIGH VELOCITY BY VISUALIZATION TECHNIQUE

А. М. Игнатова, В. И. Верещагин
A. M. Ignatova¹, V. I. Vershagin

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет

¹ Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

В качестве объекта исследования рассматриваются синтетические минеральные сплавы. Их структура содержит 95% кристаллических и 5% аморфных фазовых составляющих, данные материалы обладают выраженными диссипативными свойствами и являются перспективными для использования в качестве элементов бронезащиты. Для реализации потенциала диссипативных свойств этих материалов необходимо подробное изучение их деформационного поведения при высокоскоростных ударных нагрузках. Цель работы заключается в исследовании разрушения и фрагментации синтетических минеральных сплавов при высокоскоростном ударе методом визуализации. Для осуществления удара использовалась пневматическая установки длиной 3950 мм и стальной шар диаметром 23,8 мм, скорость шара-ударника составила 233–234 м/с. Для визуализации использовался комплекс видеорегистрации, состоящий из высокоскоростной камеры Photron Fastcam SA5 и осветительного оборудования. Скорость съемки составила 50000 кадров/сек.

Проведены эксперименты, различающиеся материалом образцов, использовались синтетические минеральные сплавы на основе горнблендита и базальта. Выявлены последовательные этапы разрешения и фрагментации, результаты представлены в виде кадровых изображений. Приведен количественный анализ данных скоростной регистрации процесса соударения и кинетики развития трещин (толщины, раскрытия) в процессе фрагментации. Эти данные позволили установить качественные признаки развития фрагментации синтетических минеральных сплавов. Эта информация представляет интерес для разработки новых разновидностей синтетических минеральных сплавов и защитных конструкций из них. Методика визуализации может быть использована для отработки последующих материаловедческих разработок и экспериментального изучения закономерностей баллистического повреждения и разрушения ответственных элементов конструкций из синтетических минеральных сплавов.

The object of research are synthetic mineral alloys. Their structure comprises a 95% crystalline and 5% amorphous phase components, these materials have strong dissipative properties and strong perspectives for use as body armor components. To realize the potential of the dissipative properties of these materials must be a detailed study of the deformation behavior at high shock loads.

The goal of work is to study the destruction and fragmentation of synthetic mineral alloys at high velocity impact by imaging technique. For experiments was used pneumatic gun length 3950 mm and a steel ball diameter of 23.8 mm, the speed of the ball was 233-234 m/s. For visualization was used a complex of video recording, consisting of a high-speed camera Photron Fastcam SA5 and lighting equipment. Shooting speed was 50,000 frames / sec. Experiments was made with differing material samples: synthetic mineral based alloys gabbro and basalt. In results was found stages of damage and fragmentation as per-frame images, quantitative analysis of the data registration process speed collision and kinetics of cracks (thickness, disclosure) during the fragmentation. These data allowed to establish qualitative characteristics of fragmentation of synthetic mineral alloys of the type quasi-brittle materials. This information is of interest to develop improved varieties of synthetic mineral alloys and protective structures of them. Visualization techniques can be used to practice the following materials science research and experimental study of the laws of ballistic damage and destruction of critical structural elements of synthetic mineral alloys.

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

Key words: fragmentation, impact, ceramic body armor, stone molding, synthetic mineral alloys, high-speed photography, crack, destruction

Изучение поведения синтетических минеральных сплавов в условиях динамических нагрузок показало, что они обладают способностью рассеивать кинетическую энергию ударного разрушения [1-3]. Это обстоятельство позволяет рассматривать их в качестве материала бронезащиты, как альтернативу керамическим материалам. Однако, поскольку данное свойство синтетических минеральных сплавов было выявлено не так давно, развитие этого направления применения осложняется недостаточностью экспериментальных данных об их деформации, разрушении и фрагментации.

В работах [4-6], посвященных материалам аналогичным синтетическим минеральным сплавам показано, что показателями, позволяющими оценить качественные и количественные параметры ударного разрушения являются величины скорости роста и раскрытия трещин, перемещения фрагментов разрушения, а также последовательность возникновения и развития повреждений в материале. Актуальным является изучение параметров ударного разрушения синтетических минеральных сплавов.

Настоящая статья посвящена анализу разрушения и фрагментации синтетических минеральных сплавов при высокоскоростном ударе методом визуализации.

Достоверными способами визуализации являются видео и фотофиксации.

При выборе параметров видео и фотофиксации следует руководствоваться тем, какие именно процессы предположительно могут происходить. Из работ [7-10] известно, что процесс сопротивления удару, сопряжен с одной стороны, с деструкцией материала мишени, а с другой, с процессами деформации и эрозии повреждающего тела. Следовательно, при визуализации необходимо различать материал мишени и материал повреждающего тела. В других работах [11] указывается, что основными стадиями процесса разрушения хрупких материалов в условиях высокоскоростного удара являются: зарождение трещин, их рост и слияние. Исходя из этого, при визуализации следует предусмотреть возможность различать трещины на поверхности образца в момент удара. Работы [12-13] указывают на то, что при фрагментации

хрупких материалов важными оценочными показателями являются скорости и траектории трещин и фрагментов разрушения. Следовательно, при визуализации необходима возможность наблюдать события до и после фрагментации, а также количественно оценивать параметры перемещения фрагментов и развития трещин.

Обозначенным требованиям к видео и фотофиксации соответствует экспериментальный комплекс, представленный на рис. 1. Для проведения экспериментов, результаты которых описаны в настоящей работе, установка использовалась в комплектации с разгонной трубой с внутренним диаметром 25_{-0,2} мм и длиной 3950 мм и устройством закладки телескопического типа. Разгон пробойника осуществлялся с помощью пневмооборудования, использовался ресивер высокого давления объемом 5,2 л. Заполнение ресивера воздухом осуществлялось от компрессора высокого давления. Параметры работы оборудования контролировались при помощи датчиков, включенных в автоматизированную систему проведения эксперимента.

Модуль крепления и позиционирования испытуемого образца представлял собой механическое устройство с зажимом тисочного типа и возможностью плавного перемещения испытуемого образца в трех взаимно перпендикулярных направлениях и поворота вокруг вертикальной оси. Устройство обеспечивает позиционирование образца в направлениях линейных перемещений с точностью 0,05 мм, по угловому перемещению – 1'.

Для гарантированного попадания в нужную часть образца ударником было использовано съемное устройство визирования оси разгонной трубы, предназначенное для визирования на экспериментальном образце оси разгонной трубы, которая совпадает с вектором скорости повреждающего предмета. Устройство представляет собой оптическую систему, состоящую из зрительной трубы с перекрестием, имеющей переменное фокусное расстояние и 20-кратное увеличение, зеркала с одной отражающей поверхностью и двух втулок с перекрестиями, устанавливаемых на входе и выходе разгонной трубы. Зрительная труба и зеркало смонтированы на общем основании и устанавливаются вместо съем-

ной части устройства закладки. Устройство обеспечивает точность визирования оси разгонной трубы $\pm 0,15$ мм.

мер составляет 775000 к/с при разрешении 128×24 pixels. Камера регистрирует процесс соударения под углом около 45° к трем ортогональным плоскостям. Для получения качественной



а



б

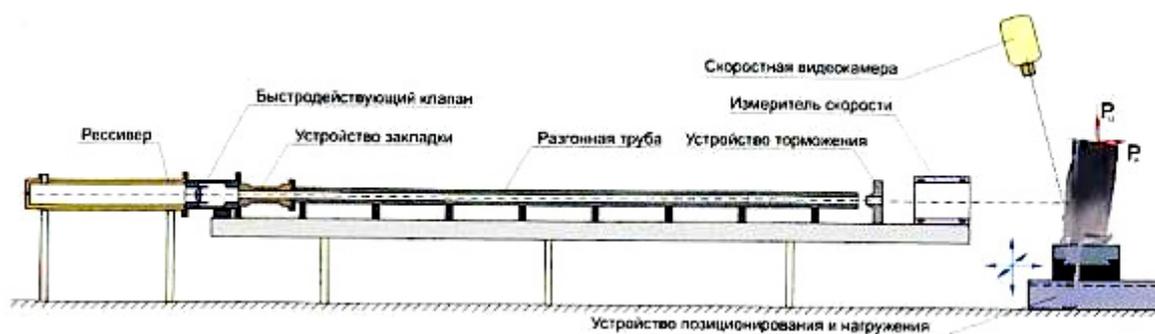


Рис. 1. Схема установки: а – вид со стороны разгонной трубы; б – камера с образцом и оборудованием для видеофиксации; в – схема установки

Контроль скорости ударника определяли по величине времени прохождения ударником контрольного участка. Система контроля скорости представляла собой электронное устройство, оборудованное лазерными излучателями и соответствующими приемниками в начале и в конце контрольного участка, которые генерируют электрические импульсы при прохождении повреждающего предмета. Скорость повреждающего предмета определялась в автоматизированной системе проведения эксперимента по интервалу времени между импульсами и длине контрольного участка.

Система скоростной видеорегистрации процесса соударения состояла из скоростной видеокамеры Photron Fastcam SA5 и осветительного комплекса. Максимальная скорость съемки ка-

видеосъемки при малом времени экспозиции система скоростной видеорегистрации была оборудована осветительным комплексом, состоящим из семи источников света мощностью 1000 Вт каждый. Запуск процесса видеорегистрации осуществляется по триггер-сигналу, генерируемому автоматизированной системой проведения эксперимента.

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

Установка оборудована улавливающими и защитными экранами, предотвращающими вылет фрагментов разрушения повреждающего предмета и исследуемого образца за пределы зоны испыта-

ний и системой видеонаблюдения и блокировки начала испытаний при нахождении человека в испытательном помещении.

Объектом исследования являлись синтетические минеральные сплавы, характеристики которых представлены в табл. 1. Характеристики образцов и параметры экспериментов представлены в табл. 2.

Для наглядности результатов видеофиксации, образцы были покрыты вододисперсионным составом белого цвета, на поверхность образцов была нанесена разметочная сетка с размером ячейки 5×5 (рис. 2).

В результате видео и фотофиксации были составлены фреймовые карты – набор кадровых изображений, визуализирующий этапы соударения и фрагментацию (рис. 3 и 4).

Таблица 1

Характеристика синтетических минеральных сплавов

Материал	Плотность, г/см ³	Твердость (крист. части), ГПа	Модуль Юнга, ГПа	Ударная вязкость, кДж/м ²	Предел прочности при сжатии, МПа	Фазовый состав, %
Синтетический минеральный сплав на основе горнблендита	2,9–3,0	3–10	70–100	1,25	250–290	Шпинельная фаза (40–60 мкм) – 2–3 Пироксеновая фаза (120–180 мкм) – 90–95 Аморфная фаза – 6–7
Синтетический минеральный сплав на основе базальта	2,8–2,9	3–7	110	1,07	210–230	Оливиновая фаза (90–100 мкм) – 2–3 Пироксеновая фаза (120–180 мкм) – 89–93 Аморфная фаза – 7–9

Таблица 2

Характеристика образцов и параметров эксперимента

Материал	Поражающее тело (ударник)	Размер образца, мм	Скорость ударника, м/с	Скорость съемки, кадров/сек	Время экспозиции, с	Разрешение кадров, пиксель
Синтетический минеральный сплав на основе горнблендита	шар диаметром 23,8 мм (Сталь 20)	115×180×15	233	50000	1/100000	320×384
Синтетический минеральный сплав на основе базальта		200×100×15	234		1/103000	384×328



а

б

Рис. 2. Образцы синтетических минеральных сплавов, подготовленные к испытаниям: а – на основе горнблендита, б – на основе базальта

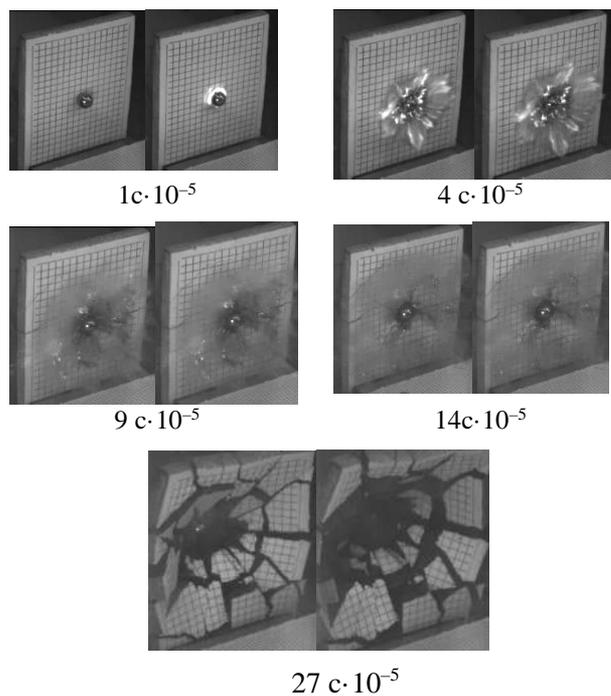
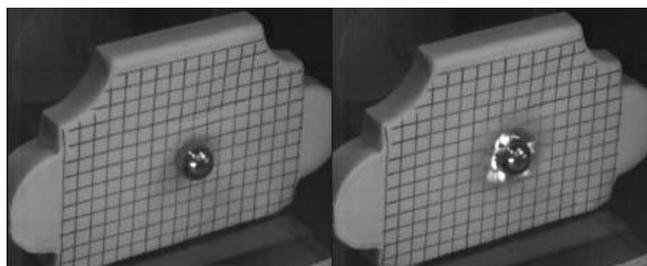
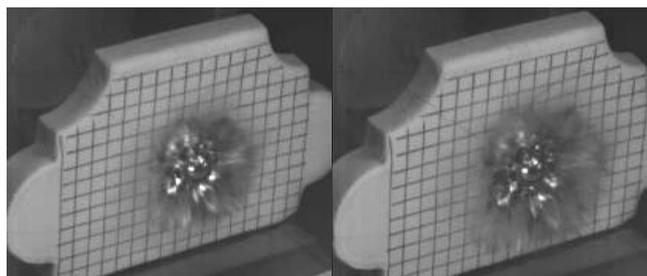


Рис. 3. Фреймовая карта высокоскоростной съемки разрушения образца синтетического минерального сплава на основе горнблендита при скорости 233 м/с

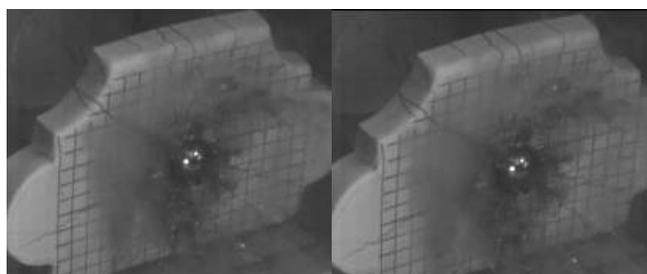
При анализе результатов видеофиксации эксперимента с образцом из синтетического минерального сплава на основе горнблендита обнаружено, что при столкновении ударника и мишени практически мгновенно произошло образование светящегося ореола. Затем ореол начал распространяться в виде облака искр со средней скоростью 5000 м/с. Объяснить это явление можно как результат эрозии поверхности ударника. Через $4 \cdot 10^{-5}$ после удара, сразу после начала разлета облака искр, образовалось пылевое облако, состо-



$1 \cdot 10^{-5}$



$3 \cdot 10^{-5}$



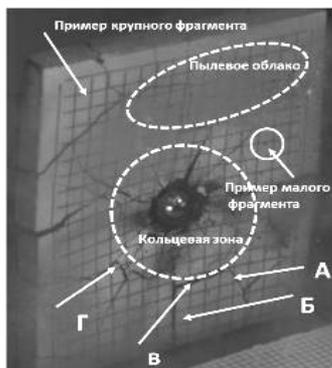
$7 \cdot 10^{-5}$



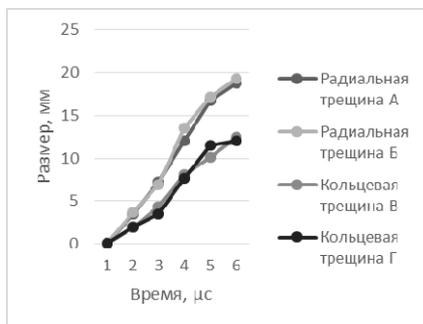
$14 \cdot 10^{-5}$

Рис. 4. Фреймовая карта высокоскоростной съемки разрушения образца синтетического минерального сплава на основе базальта при скорости 234 м/с

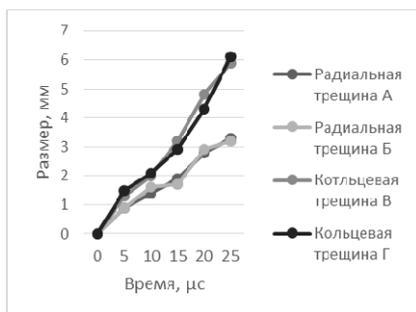
ящие из мелкодисперсных частиц мишени. Подобное «пыление» образца является закономерным явлением для неметаллических хрупких материалов [14]. Скорость движения пылевого фронта составила 2430 м/с. На $9 \cdot 10^{-5}$ после соударения на поверхности образца были обнаружены первые радиальные трещины. Рост радиальных трещин составил в среднем 3898 м/с (рис. 5, б). Кольцевые трещины появились на $14 \cdot 10^{-5}$ после удара. Скорость роста кольцевых трещин была значительно ниже – в среднем 2476 м/с (рис. 5, б).



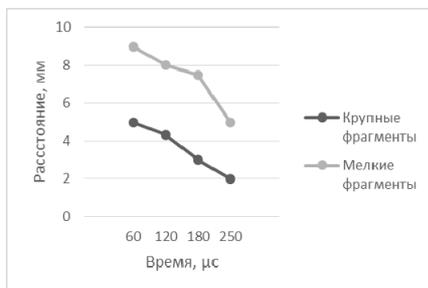
а



б



в



г

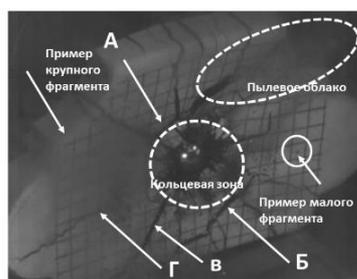
Рис. 5. Визуализация процессов фрагментации мишени из синтетического минерального сплава на основе горнблендита и результаты расчета ее параметров: а – наблюдаемые явления и объекты, характеризующие фрагментацию, б – скорость роста радиальных и кольцевых трещин, в – скорость увеличения толщины трещин, г – динамика скорости фрагментов мишени разного размера

По мнению авторов, рост трещин сам по себе еще не свидетельствует о начале фрагментации, началом разрушение и фрагментации является увеличение толщины трещин (рис. 5, в). Начало роста толщины трещин зафиксировано на $27 \cdot 10^{-5}$ с момента удара. С помощью фрейм анализа было зафиксировано, что кольцевые трещины расширяются со скоростью около 200 м/с, что чуть выше скорости утолщения радиальных трещин, которая составляет в среднем 160 м/с. Ориентировочный радиус кольцевой зоны перед началом фрагментации составил 15–20 мм (рис. 5, а). С помощью фреймовых карт отслеживалось движение крупных и мелких фрагментов, установлена величина скорости их перемещения (рис. 5, г), в среднем она составила 80–50 м/с.

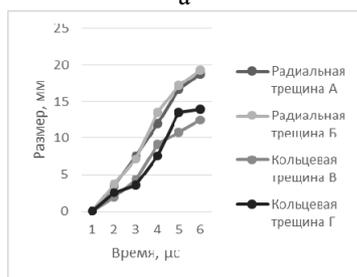
При столкновении ударника с мишенью из синтетического минерального сплава на основе базальта, также наблюдалось образование светящегося ореола в месте контакта повреждающего тела и поверхности образца. Облако искр из светящегося ореола разлеталось со средней скоростью 2600 м/с. На $3 \cdot 10^{-5}$ после удара одновременно с образованием пылевого облака появились первые радиальные трещины. Скорость движения пылевого фронта составила 5500 м/с. Скорость роста радиальных трещин составил в среднем 4760 м/с (рис. 6, б). Увеличение толщины некоторых радиальных трещин наблюдалось еще до появления кольцевых трещин. Кольцевые трещины появляются на $7 \cdot 10^{-5}$ после удара. Скорость роста кольцевых трещин составила в среднем 3280 м/с (рис. 6, б). Начало увеличения толщины радиальных трещин, не идентифицировалось как отдельное событие, оно практически совпало с процессом роста трещин в длину, что указывает на то что для этого образца процесс фрагментации начался одновременно с появлением трещин через на $14 \cdot 10^{-5}$ (рис. 6, в). Ориентировочный радиус кольцевой зоны перед началом разлета фрагментов составил 8–12 мм (рис. 6, а). С помощью фреймовых карт, был установлен характер перемещения крупных и мелких фрагментов и средняя скорость их перемещения, которая составила 70–75 м/с (рис. 6, г).

Разница в количественных показателях роста радиальных и кольцевых трещин, а также разница в последовательности появления повреждений в материале в момент удара рассматривалась в работах [4,15-17]. Причинами этого являются анизотропность структуры материала, наличие масштабной иерархии между структурными составляющими и разница в характере напряжений в месте контакта с ударником и на периферии от

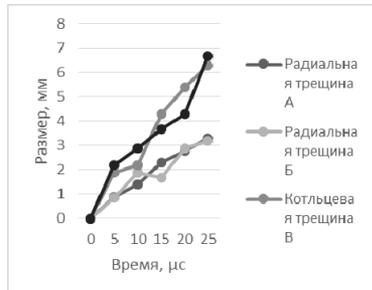
него. Радиальные трещины образуются под действием растягивающих напряжений, а кольцевые трещины под действием сжимающих нагрузок. У синтетических минеральных сплавов предел прочности при сжатии выше предела прочности при растяжении, следовательно, под действием растягивающих нагрузок в материале скорее возникнут признаки разрушения – радиальные трещины.



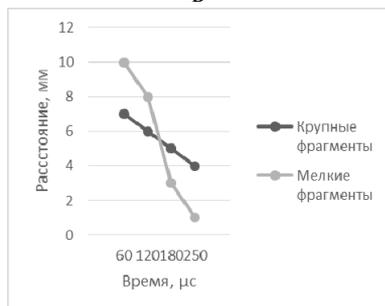
а



б



в



г

Рис. 6. Визуализация процессов фрагментации мишени из синтетического минерального сплава на основе базальта и результаты, и результаты расчета ее параметров: а – наблюдаемые явления и объекты, характеризующие фрагментацию, б – скорость роста радиальных и кольцевых трещин, в – скорость увеличения толщины трещин, г – динамика скорости фрагментов мишени разного размера

В экспериментах с синтетическим минеральным сплавом на основе горнблендита и на основе базальта обнаружена различная последовательность образования повреждений. Для синтетического минерального сплава на основе горнблендита период времени между развитием повреждений и началом фрагментации оказался длиннее на $8-10 \cdot 10^{-5}$, чем у синтетического минерального сплава на основе базальта, причиной чему может служить разница в величинах предела прочности этих материалов (табл. 1).

Сопоставляя данные полученные в результате экспериментов с известными данными об известных неметаллических квазихрупких материалах, подвергнутых аналогичному воздействию [18-19] выявлено, что средняя скорость роста трещин характерных для синтетических минеральных сплавов в незначительной мере отличается от аналогичных показателей и в наибольшей степени соответствует величинам характерным для шпинельной керамики (табл. 3). Характер повреждений синтетических минеральных сплавов, предшествующих фрагментации, соответствует характеру повреждений спечённой керамики на основе бимодальной порошковой смеси при аналогичном ударном воздействии [20].

Таблица 3

Величины скоростей роста трещин в результате ударного разрушения различных материалов

Материал	Средняя скорость роста трещин, м/с
Прозрачный многослойный материал на основе бронестекла	3100–3500 м/с
Шпинельная керамика на основе мелкодисперсного порошкового сырья	2800–3000 м/с
Шпинельная керамика на основе крупнодисперсного порошкового сырья	2600–2900 м/с
Шпинельная керамика на основе бимодального порошкового сырья	3200–3700 м/с
Синтетический минеральный сплав на основе горнблендита	3800–4000 м/с
Синтетический минеральный сплав на основе базальта	3600–3900 м/с

Таким образом, представлен анализ фрагментации пластин из синтетических минеральных сплавов на основе базальта и горнблендита при

высокоскоростном ударе шаром методом визуализации. Установлены, качественные признаки и количественные величины, характеризующие развитие разрушений и последующей фрагментации синтетических минеральных сплавов. Экспериментальные данные сопоставимы с известными величинами, характерными для различных видов спечённых керамических материалов для бронезащиты, что указывает на целесообразность дальнейших исследований в сфере применения синтетических минеральных сплавов в качестве их аналогов. Эта информация представляет интерес для дальнейшей разработки улучшенных разновидностей скитнических минеральных сплавов и защитных конструкций из них. Методика визуализации может быть использована для отработки последующих материаловедческих разработок и экспериментального изучения закономерностей баллистического повреждения и разрушения ответственных элементов конструкций из синтетических минеральных сплавов.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ МК4399.2014.10

Список литературы

1. Игнатова А. М., Артемов А. О., Чудинов В. В., Игнатов М. Н., Соколов М. А. Исследование диссипативных свойств синтетических минеральных сплавов для создания на их основе броневой защиты// Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2012. – № 3. – С. 105–112.
2. Игнатов М. Н., Игнатова А. М., Артемов А. О., Асанов В. А. Исследование взаимосвязи акустической эмиссии и разрушения камнелитых материалов в условиях одноосного сжатия// Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2011. – № 2. – С. 126–132.
3. Игнатова А. М., Артемов А. О., Игнатов М. Н. Противокумулятивная защита техники с применением синтетических минеральных сплавов// Двойные технологии. – 2014. – № 2 (67). – с. 13–17.
4. Strassburger E, Hunzinger M, Patel P, McCauley JW. Analysis of the Fragmentation of AION and Spinel Under Ballistic Impact// ASME. J. Appl. Mech. 2013, issue 3, p. 031807-031807 (11). doi:10.1115/1.4023573.
5. Zinszner J. L., Forquin P., Rossiquet G. Experimental and numerical analysis of the dynamic fragmentation in a SiC ceramic under im-

pact//International Journal of Impact Engineering, Volume 76, February 2015, p. 9–19.

6. Compton B. G., Gamble E. A., Zok F. W. Failure initiation during impact of metal spheres on to ceramic targets// International Journal of Impact Engineering, Vol. 55, issue 5, 2013, p. 11–23.

7. Schuster B. E., Aydelotte B. B., Leavy R. B., Satapathy S., Zellner M. B. Concurrent Velocimetry and Flash X-ray Characterization of Impact and Penetration in an Armor Ceramic//Procedia «The 13th Hypervelocity Impact Symposium» Engineering, Volume 103, 2015, p. 553–560.

8. Толкачев В. Ф., Жейков В. В. Разрушение конструкционных материалов и композитов при высокоскоростном соударении// Вестник ТГУ, т.18, вып.4, 2013, с. 1741–1742.

9. Абросимова А. С., Колпаков В. И. К обоснованию использования механохимических активных материалов в качестве защитных экранов космических аппаратов // Инженерный вестник. МГТУ им. Н. Э. Баумана, Электронный журнал. 2014. № 3. Режим доступа <http://engbul.bmstu.ru/doc/706129.html> (дата обращения 01.04.2015)

10. Сысоев А. А., Колпаков В. И. Анализ физических аспектов взаимодействия высокоскоростных микрочастиц с элементами противометеоритной защиты с использованием механохимически активных веществ// Инженерный вестник. МГТУ им. Н. Э. Баумана, Электронный журнал. 2014. № 11. Режим доступа <http://engbul.bmstu.ru/doc/745041.html> (дата обращения 01.04.2015).

11. Leavy R. B., Brannon R. M. Strack O. E. The use of sphere indentation experiments to characterize ceramic damage models// International Journal of Applied Ceramic Technology, 2010. Issue 7, p. 606–615.

12. Nikhamkin M., Voronov L., Bolotov B. Experimental finding of dynamic deformation fields in metal and composite plates under impact // PNRPU Mechanics Bulletin 2 (2015) – p. 103–115.

13. Rosenberg Z., Dekel E. Terminal Ballistics. – Springer Science & Business Media, 2012 г. – 323 p.

14. Denzel J. R. Determination of shock properties of ceramic corbit 98: 98% alumina, Master's thesis, Naval Postgraduate School, Monterey, CA, June 2010, Available at <http://hdl.handle.net/10945/5312>.

15. Compton B.G, Gamble E. A., Deshpande V. S., Zok F. W. Damage development in an armor alumina impacted with ductile metal spheres //Journal of mechanics of materials and structures vol. 7, no. 6, 2012 dx.doi.org/10.2140/jomms.2012.7.575 575–591

16. Kaufmann C., Cronina D., Worswick M., Pageaub G., Bethc A. Influence of material properties on the ballistic performance of ceramics for personal

body armor// Shock and Vibration. Vol. 10. Issue 51. (2003), p. 51–58.

17. Герасимов А. В., Пашков С. В., Христенко Ю. Ф. Защита космических аппаратов от техногенных и естественных осколков эксперимент и численное моделирование//Вестник Томского Государственного Университета. Математика и механика, 2011, № 4 (16), с. 70–78.

18. LaSalvia J. C., Normandia M. J., Miller H. T., Mackenzie D. E. Sphere impact damage in ceramics//In: Advances in ceramic armor: 29th international conference on advanced ceramics and com-

posites, vol. 26. 2005., <http://dx.doi.org/10.1002/9780470291276.ch20>.

19. Clayton J. D. Penetration resistance of armor ceramics: Dimensional analysis and property correlations// International Journal of Impact Engineering, Volume 85, November 2015, P. 124–131.

20. Yavari, A., Khezzadeh, H. Estimating Terminal Velocity of Rough Cracks in the Framework of Discrete Fractal Fracture Mechanics//Eng. Fract. Mech., 2010, issue 77, p. 1516–1526. of the Fragmentation of AlON and Spinel Under Ballistic Impact//ASME. J. Appl. Mech. 2013, issue 3, p. 031807-031807 (11). doi:10.1115/1.4023573.