

УДК 534.32:531.43.001.5

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ДИССИПАТИВНЫХ СВОЙСТВ СИНТЕТИЧЕСКИХ МИНЕРАЛЬНЫХ СПЛАВОВ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ ПРОБИВАНИИ

¹Игнатова А.М., ²Артемов А.О., ³Игнатов М.Н., ⁴Соковиков М.А.

¹ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»,
Пермь, e-mail: ignatovaanna2007@rambler.ru;

²ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»,
Пермь, e-mail: artemoff87@mail.ru;

³ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»,
Пермь, e-mail: ignatovaanna2007@rambler.ru;

⁴Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, e-mail: mvp@icmm.ru

В статье приведены результаты исследования диссипативных свойств симиналов на баллистической установке и установке динамических испытаний при сжатии с помощью новой методики, данные исследования позволили установить, что при соударении симиналов с ударником, имитирующим снаряд на скорости 650 м/с, характерный размер фрагментов разрушенного образца составил ~0,5–1,0 мм. Представленные результаты проведенных экспериментов демонстрируют возможности предложенных методов исследования диссипативных свойств. Данные методы позволяют установить диссипативные способности материалов по нескольким критериям, а именно позволяют определить взаимосвязь между характеристиками воздействия и уровнем диссипации, ориентируясь на параметры скорости воздействия и температуру нагрева, ее распределение в материале в момент диссипации, размер фрагментов при разрушении, а также деформационные показатели. Данные критерии и описанные методы их экспериментального установления могут являться основой для исследований диссипативных свойств различных материалов.

Ключевые слова: диссипация, динамические испытания, синтетические минеральные сплавы

METHODS OF STUDY OF SYNTHETIC MINERAL PROPERTIES OF DISSIPATION IN HIGH ALLOY PENETRATION

¹Ignatova A.M., ²Artemov A.O., ³Ignatov M.N., ⁴Sokovikov M.A.

¹Permskij nacional'nyj issledovatel'skij politehnicheskij universitet,
Perm, e-mail: ignatovaanna2007@rambler.ru;

²Permskij nacional'nyj issledovatel'skij politehnicheskij universitet,
Perm, e-mail: artemoff87@mail.ru;

³Permskij nacional'nyj issledovatel'skij politehnicheskij universitet,
Perm, e-mail: ignatovaanna2007@rambler.ru;

⁴Institut mehaniki sploshnyh sred UrO RAN, Perm, e-mail: mvp@icmm.ru

The results of studies on the dissipative properties siminalov ballistic setup and installation of dynamic compression tests at using the new methodology, these studies revealed that during the collision with drummer siminalov simulating projectile at a speed of 650 m/s the characteristic size of the sample was destroyed by a fragment of ~ 0,5–1,0 mm. Rearranged the results of these experiments demonstrate the capabilities of the proposed methods for dissipative properties. These methods allow you to set the power dissipation of materials on several criteria, namely, allow us to determine the relationship between characteristics of exposure and the level of dissipation, focusing on the impact parameter of the velocity and temperature of heating, its distribution in the material at the time of dissipation, the size of the fracture fragments, as well as the deformation parameters. These criteria and methods described their experimental setting can be the basis for studies of dissipative properties of various materials.

Keywords: dissipation, dynamic testing, synthetic mineral alloys

Диссипация – это способность материалов преобразовывать механическую энергию в иные ее формы, конечной цепочкой превращений, как правило, является тепловая энергия. Данное свойство используется на практике в основном для бронепреград, в этом случае механическая энергия снаряда при соударении материалом бронепреграды поглощается материалом и расходуется на его нагрев и разрушение. Чем полнее механическая энергия будет дисси-

пирована материалом, тем полнее будет выполнена функция бронепреграды.

Попытки рассчитать диссипативные характеристики материала, ориентируясь на показатели механических свойств, не дают точных результатов, поэтому установить их экспериментальным путем представляется актуальной задачей.

Цель исследования – единой методики проведения испытаний для установления диссипативных свойств в настоящее время

не разработано, в данной статье мы предлагаем наиболее, на наш взгляд, достоверную методику исследования диссипативных свойств материалов.

Методика, предлагаемая нами, заключается в пробивании образца материала ударником на большой скорости. Для проведения таких испытаний могут использоваться баллистическая установка и установка для динамических испытаний на сжатие. Данная методика позволяет изучать различные материалы, в том числе и композиционные и с неоднородной структурой, таковыми являются синтетические минеральные сплавы.

Синтетическими минеральными сплавами (симиналами) называют неорганические неметаллические материалы, состоящие

из оксидов ультраосновного или основного характера, на основе диоксида кремния. От керамики симинылы отличаются тем, что их получают в результате высокотемпературного синтеза (переплавления), а не в результате спекания. С точки зрения строения симинылы обладают многофазной структурой, они содержат две и более кристаллические фазы и, как минимум, одну аморфную, однако, при этом симинылы *не относятся* к стеклокристаллическим материалам, поскольку обладают склонностью к кристаллизации без дополнительного модифицирования.

Результаты, представленные в статье, были установлены при испытании симиныла на основе горнблендита базальтового типа, его обобщенный состав указан в табл. 1.

Таблица 1

Оксидный состав силикат-хромитового симиныла

Содержание оксидов, мас.%, %									
SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	FeO	MgO	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	K ₂ O + Na ₂ O	Cr ₂ O ₃	п.п.п
47,3	12,5	9,5	10,9	8,3	3,4	2,3	2,1	0,5	3,2

Наиболее современная конструкция баллистической установки предложена в модели РСГ-25, схема ее устройства представлена на рис. 1.

Основные узлы баллистической установки смонтированы на раме (7), она состоит из камеры высокого давления (1), ствола (2), системы измерения скорости ударника (3), устройства для крепления (8) образца (9) с отсекателем (6), приемной камеры (10) и улавливателя (11).

Для разгона ударника в стволе используется эбонитовый поддон, внешний диаметр которого соответствует калибру ствола. Для создания воздушной прослойки с целью уменьшения трения поддона при движении в стволе были сделаны специальные канавки. В качестве ударника использовался стержень из высокоуглеродистой стали диаметром 5 мм, длиной 50 мм и массой 7,4 г. Так же могут использоваться укороченные ударники и ударник в виде шарика.

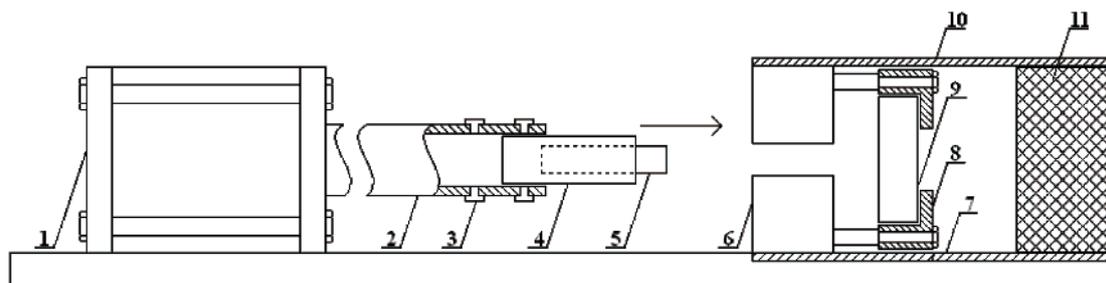


Рис. 1. Схема баллистической установки:

1 – камера высокого давления; 2 – ствол; 3 – фотодатчики; 4 – поддон;
5 – ударник; 6 – отсекающий механизм; 7 – рама; 8 – устройство для крепления мишени;
9 – мишень; 10 – приемная камера; 11 – улавливатель

Скорость ударника задается давлением воздуха в камере и длиной разгона. Характерная скорость для проведения испытаний – 400 м/с. Выстрел происходит путем открытия в воздушной камере специального клапана. Скорость поддона с ударником определяется измерением времени пролёта между двумя фотодатчиками. Перед образцом уста-

новлен отсекающий механизм, внутренний диаметр которого меньше внешнего диаметра поддона, но больше диаметра ударника. При соударении с отсекающим механизмом поддон тормозится и разрушается, а ударник продолжает движение до соударения с образцом. При высокоскоростном взаимодействии ударника с образцом реализуется его разрушение. Продолжа-

ющие движение после пробивания преграды, ударник и фрагменты разрушенного образца улавливаются приемной камерой с помощью мягкого наполнителя.

Принцип действия установки на проведение динамических испытаний при сжатии близок к описанному выше, схема на рис. 2. Принцип действия установки для динамических прочностных испытаний на сжатие основан на реализации метода Кольского с использованием разрезного стержня Гопкинсона. Установка включает в себя пневматическое нагружающее устройство (газовая пушка (2) со стволом (3) калибром 19 мм и ударник (5)), компрессор (1), комплекс измерительно-регистрающей ап-

паратуры, комплекты разрезных стержней Гопкинсона диаметром 25 мм. Разрезной стержень Гопкинсона для испытаний на сжатие состоит из двух стержней диаметром 25 мм нагружающего и опорного. При этом опорный стержень имеет свободный задний торец. Стержни, изготовленные из мартенситно-старееющей стали 03Н18К9М5ТЮ–ВИ с высоким пределом текучести, закрепляются на жесткой раме (9) и центрируются во фторопластовых подшипниках скольжения, позволяющих с помощью регулировочных элементов производить юстировку положения стержней для обеспечения соосности стержней между собой и налетающим ударником.

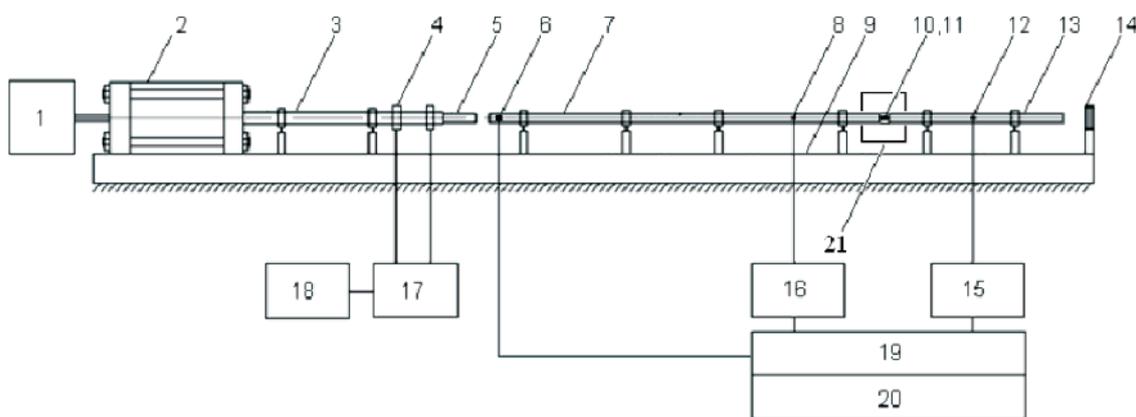


Рис. 2. Схема экспериментальной установки для динамических испытаний на сжатие: 1 – компрессор; 2 – газовая пушка; 3 – ствол; 4 – фотодиодный измеритель скорости; 5 – ударник; 6 – пьезокристалл; 7 – нагружающий стержень; 8, 12 – тензорезисторы; 9 – рама; 10, 11 – образец, зеркало; 13 – опорный стержень; 14 – демпфер; 15, 16 – блоки усиления сигнала с тензорезисторов; 17 – блок усиления измерителя скорости ударника; 18 – частотомер; 19 – плата сбора данных; 20 – персональный компьютер, 21 – устройство крепления зеркала

Комплекс измерительно-регистрающей аппаратуры включает приборы для измерения параметров нагружения, аппаратуру регистрации параметров деформирования и систему синхронизации запуска регистрирующих устройств. Из параметров нагружения измеряется только скорость ударника. Для этого используется световой измеритель скорости (4), размещенный на дульном срезе ствола и включающий два точечных источника света, два фотоприемника, триггерные ячейки (17) и цифровой частотомер (18), включенный в режим измерения интервала времени. Летящий в стволе ударник поочередно пересекает световые пучки, вызывая срабатывание триггеров. Зная расстояние между световыми пучками (базу измерения) и время пролета этой базы, легко вычислить скорость ударника. Измерение деформаций производится с помощью наклеенных на боковую по-

верхность стержней на значительном расстоянии от образца малогазных тензорезисторов (8, 12). Причем для компенсации изгибных колебаний в стержнях и увеличения амплитуды полезного сигнала в рабочих сечениях наклеено по 4 соединенных последовательно тензорезистора. Сигналы с датчиков подаются на блоки усиления (15, 16), а затем на плату сбора данных ЛА – н20 – 12РСІ (19), установленную в компьютере (20). В процессе испытания регистрируется только динамическая составляющая деформации, для питания тензорезисторов была выбрана потенциометрическая схема ввиду её простоты и возможности питания нескольких измерительных каналов от одного источника. Обе группы тензорезисторов питались постоянным током от стандартного стабилизированного блока питания через оригинальные схемы питания и калибровки. Далее импульсы деформаций в мерных

стержня с блока усиления поступают на плату сбора данных в компьютере для обработки. Для запуска регистрирующей аппаратуры используется пьезокристалл (6), закреплённый на боковой поверхности передающего стержня, вблизи от торца, воспринимающего удар. Сигнал с пьезодатчика напрямую подаётся на вход внешней синхронизации платы сбора данных.

Для исследования диссипации в процессе разрушения образца для обеих установок использовалась инфракрасная камера CEDIP Silver 450M. Камера фиксирует инфракрасное изображение тыльной поверхности образца в процессе его пробития и поля температур в этой области. Схема эксперимента приведена на рис. 3.

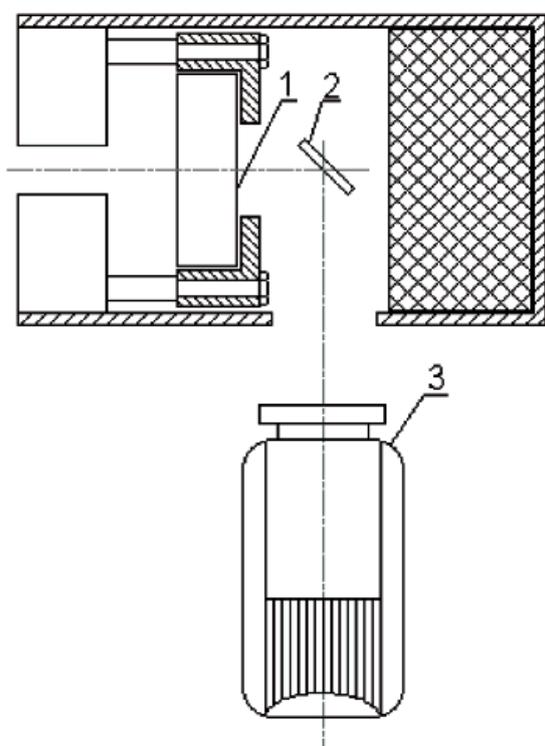


Рис. 3. Схема исследования диссипации в процессе разрушения образца:
1 – образец, 2 – зеркало,
3 – инфракрасная камера

В качестве образца для проведения испытаний на обеих установках используются диски диаметром 30 мм и толщиной 5 мм. Результаты испытаний представляются в виде изображения с инфракрасной камеры и цветовой шкалой соответствия температур, при обработке результатов можно получать графики, характеризующие максимальный показатель температуры от времени, а при работе с установки для динамических испытаний на сжатие при обработке результатов можно получить графики

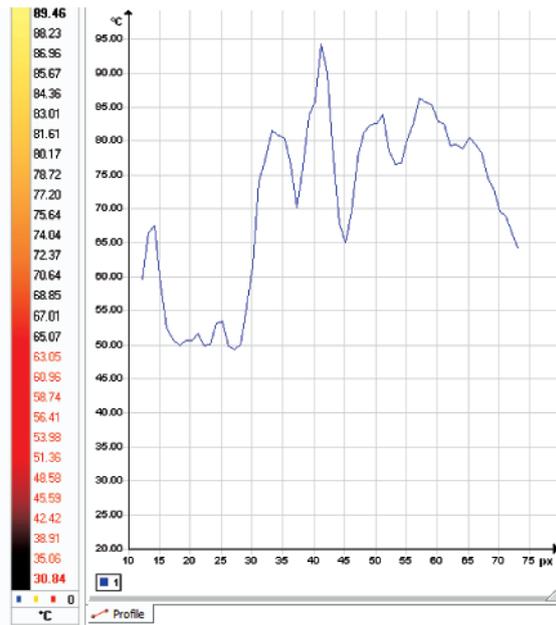
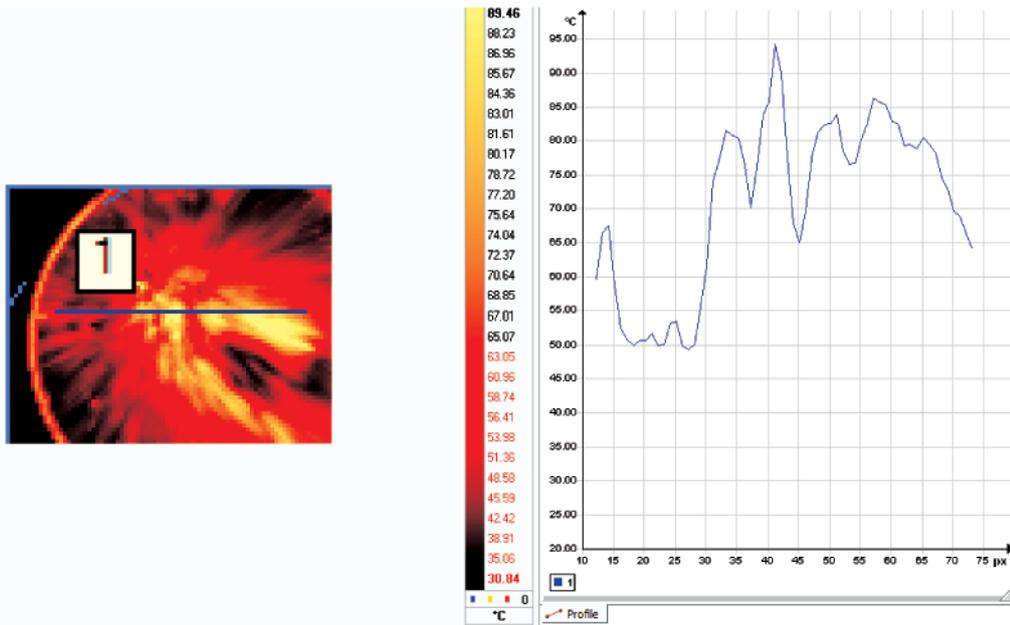
зависимости напряжения сжатия от деформации и скорости деформации от величины деформации. Пример полученных результатов представлен на рис. 4. По данным экспериментов, температура в локальных областях составляла 120°C . Так же в ходе экспериментов была выявлена закономерность, что при увеличении скорости ударника увеличивается количество осколков с уменьшением их размера, что свидетельствует о значительной диссипации энергии.

Образец симинала практически полностью диссипировал энергию, он разрушился на множество частей, значительная часть осколков перешла в мелкодисперсную фазу с размером части $0,5\text{--}1\text{ мм}$, фото образца симиналов до и после испытания представлено на рис. 5.

Выводы

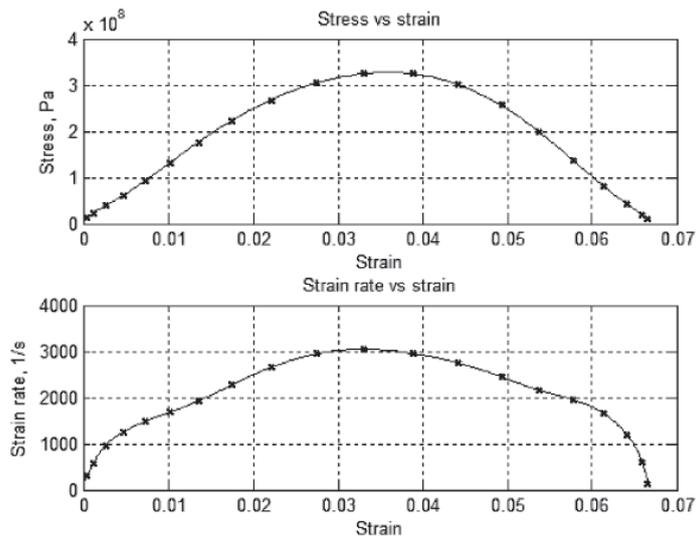
Таким образом, проведенные испытания диссипативных свойств симиналов на баллистической установке и установке динамических испытаний при сжатии позволили установить, что при соударении симиналов с ударником, имитирующим снаряд на скорости 650 м/с характерный размер фрагментов разрушенного образца составил $\sim 0,5\text{--}1,0\text{ мм}$. При скорости 65 м/с и соударении с шариком характерный размер фрагментов $\sim 5\text{--}10\text{ мм}$. При более высоких скоростях соударения нагрев образца происходит во множестве областей, при более низких скоростях диссипация энергии интенсивно происходит в небольшом количестве очагов. Наблюдение за ходом экспериментов позволило установить, что при скоростях деформаций $\sim 2,5 \cdot 10^3\text{ с}^{-1}$ образцы разрушаются на мелкие фрагменты с характерным размером менее 1 мм , а температура при разрушении на поверхности образца находится в диапазоне $100\text{--}200^{\circ}\text{C}$. Таким образом, в результате проведенных испытаний установлено, что симиналы обладают высокой способностью к диссипации механической энергии, возникающей при соударении с поражающим элементом. Следовательно, симиналы могут служить пассивной броневой защитой.

Представленные результаты проведенных экспериментов демонстрируют возможности предложенных методов исследования диссипативных свойств. Данные методы позволяют установить диссипативные способности материалов по нескольким критериям, а именно позволяют определить взаимосвязь между характеристиками воздействия и уровнем диссипации, ориентируясь на параметры скорости воздействия и температуру нагрева, ее распределение в материале в момент диссипации, размер



а

б



в

Рис. 4. Результаты исследований диссипативных свойств симиналов:
 а – изображение с инфракрасной камеры и цветовая шкала соответствия температур;
 б – зависимость максимальной температуры от времени на поверхности первого образца;
 в – зависимость напряжения сжатия от деформации и скорости деформации от деформации



а

б

Рис. 5. Фото образца симинала на испытаниях диссипативной способности:
 а – до пробивания; б – после

фрагментов при разрушении, а также деформационные показатели. Данные критерии и описанные методы их экспериментального установления могут являться основой для исследований диссипативных свойств различных материалов.

Список литературы

1. Артемов А.О., Игнатова А.М., Чудинов В.В. Оценка стойкости симиналов на действие высокодинамических нагрузок // Молодые ученые Прикамья-2011: сб. мат-ов междунар. I науч. – практ. конференции. – Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2011. – Вып. 9. – С. 180–183.
2. Боровиков В.А., Ванягин И.Ф., Моделирование действия взрыва при разрушении горных пород. – Л.: ЛГИ 1980. – 355 с.
3. Бровин В.Е. Влияние детонационных характеристик ВВ на параметры разрушения горных пород / В.Е. Бровин, М.Г. Менжулин // Сборник «Взрывное дело». – М.: Машиностроение, 2007. – Вып. №98/55. – С. 55–62.
4. Бровин В.Е. Энергетическая эффективность разрушения горных пород при взрыве ВВ с различными детонационными характеристиками // В.Е. Бровин, М.Г. Менжулин / Записки Горного института. – 2007. – №171. – С. 121–125.
5. Дорофеев А.Н. Авиационные боеприпасы. – М.: Изд-во ВВИА им. Жуковского. – 1968. – 456 с.
6. Исследование диссипативной способности синтетических минеральных сплавов / А.М. Игнатова, А.О. Артемов, В.В. Чудинов, М.Н. Игнатов, М.А. Соковников // Деформация и разрушение материалов и наноматериалов: Сб. трудов IV междунар. конференции. – М.: ИМЕТ РАН, 2011. – С. 662–664.
7. Расчет параметров фазовых и структурных составляющих каменного литья / А.М. Игнатова, С.С. Потопов, В.В. Гайдуков, А.М. Ханов // АНТЭ-09: материалы V-й Всерос. науч.-техн. конференции. – Казань: КГАУ, 2009. – С. 237–241.
8. Игнатова А.М., Ханов А.М., Чернов В.П. Исследование и разработка основных правил управления структурным миром силикатов применительно к каменному литью // От наноструктур, наноматериалов и нанотехнологий к наноиндустрии: Сб. тезисов II Всероссийской конференции. – Ижевск: ИжГТУ, 2009. – С. 45.
9. Прохоров Б.А. Боеприпасы артиллерии. – М.: Машиностроение, 1973. – 512 с.
10. Родионов В.Н. Основы геомеханики. – М.: Недра, 1986. – 238 с.

References

1. Artemov A.O., Ignatova A.M., Chudinov V.V. Ocenka stojkosti siminalov na dejstvie vysokodinamicheskikh nagruzok // Molodye uchenye Prikam'ja-2011: sb. mat-ov mezhdunar. I nauch. – prakt. konferencii. Perm': Izd-vo PNIPIU, 2011. Vyp. 9. p. 180–183.
2. Borovikov V.A., Vanjagin I.F., Modelirovanie dejstvija vzryva pri razrushenii gornyh porod. L.: LGI 1980. 355 p.
3. Brovin V.E. Vlijanie detonacionnykh harakteristik VV na parametry razrusheniya gornyh porod // Brovin V.E., Menzhulin M.G./ Sbornik «Vzryvnoe delo». M.: Mashinostroenie, 2007. Vyp. no. 98/55. pp. 55–62.
4. Brovin V.E. Jenergeticheskaja jeffektivnost' razrusheniya gornyh porod pri vzryve VV s razlichnymi detonacionnymi harakteristikami // Brovin V.E., Menzhulin M.G./ Zapiski Gornogo instituta. 2007. no. 171. pp. 121–125.
5. Dorofeev A.N. Aviacionnye boepripasy. M.: Izd-vo VVIA im. Zhukovskogo. 1968. 456 p.
6. Ignatova A.M., Artemov A.O., Chudinov V.V., Ignatov M.N., Sokovnikov M.A. Issledovanie dissipativnoj sposobnosti sinteticheskikh mineral'nyh splavov // Deformacija i razrushenie materialov i nanomaterialov: Sbjru trudov IV mezhdunar. konferencii. M: IMET RAN, 2011. pp. 662–664.
7. Ignatova A.M., Potopov S.S., Gajdukov V.V., Hanov A.M. Raschet parametrov fazovykh i strukturnykh sostavljajuwih kamennogo lit'ja // ANTJe-09: Materialy V-ij Vseros. nauch. – tehn. konferencii. Kazan': KGAU, 2009. pp. 237–241.
8. Ignatova A.M., Hanov A.M., Chernov V.P. Issledovanie i razrabotka osnovnykh pravil upravleniya strukturnym mirom silikatov primenitel'no k kamennomu lit'ju // Ot nanostruktur, nanomaterialov i nanotehnologij k nanoindustrii: Sb. tezisov II Vserossijskoj konferencii. Izhevsk: IzhGTU, 2009. pp. 45.
9. Prohorov B.A. Boepripasy artillerii. M.: Mashinostroenie, 1973. 512 p.
10. Rodionov V.N. Osnovy geomehaniki. M., «Nedra», 1986. 238 p.

Рецензенты:

Беленький В.Я., д.т.н., профессор, зам. директора, Западно-Уральского аттестационного центра, г. Пермь;

Кривоносова Е.А., д.т.н., профессор, ведущий специалист, Западно-Уральского аттестационного центра, г. Пермь.

Работа поступила в редакцию 09.04.2012.