

Материаловедение

УДК 623.438.3

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИССИПАТИВНЫХ СВОЙСТВ СИНТЕТИЧЕСКИХ МИНЕРАЛЬНЫХ СПЛАВОВ ДЛЯ СОЗДАНИЯ НА ИХ ОСНОВЕ БРОНЕВОЙ ЗАЩИТЫ

*А.М. Игнатова¹, А.О. Артемов¹, В.В. Чудинов², М.Н. Игнатов¹,
М.А. Соковиков²*

¹ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»
614000, г. Пермь, Комсомольский пр-т, 29

²Институт механики сплошных сред УрО РАН
614013, г. Пермь, ул. Акад. Королева, 1

E-mail: anutapages@gmail.com

Рассматриваются результаты, полученные при исследовании диссипативных свойств синтетических минеральных сплавов. Установлено, что симиналы обладают высокой способностью к диссипации механической энергии, возникающей при соударении с поражающим элементом. Механическая энергия преобразуется в них в волновую, а затем значительная ее часть уходит на обеспечение структурных преобразований в материале, которые заканчиваются саморазрушением, оставшаяся часть энергии переходит в тепловую. Следовательно, симиналы могут служить пассивной броневой защитой.

Ключевые слова: *бронепреграда, диссипация, синтетические минеральные сплавы, деформация.*

Введение. Важным элементом конструкции современной авиационной и военной техники является броневая защита. Пассивная защита работает как «поглотитель – диссипатор» энергии снаряда или внешнего энергетического воздействия. В авиационной технике пассивная защита применяется для бронирования турбинных двигателей, причем в этом случае она защищает не только от внешнего, но и от внутреннего возможного воздействия, например в тех случаях, когда лопатка турбины в экстремальных ситуациях отрывается во время вращения.

По ряду причин применять металлы для создания пассивной защиты неэффективно, прежде всего потому, что металлы плохо диссипируют энергию, поражающий элемент легко пробивает металлический лист в месте удара и проходит его насквозь, при этом снаряд продолжает движение, но с более низкой скоростью [1].

Анна Михайловна Игнатова (к.т.н.), ассистент кафедры «Сварочное производство и технология конструкционных материалов».

Арсений Олегович Артемов, ассистент кафедры «Сварочное производство и технология конструкционных материалов».

Василий Валерьевич Чудинов, инженер лаборатории физических основ прочности.

Михаил Николаевич Игнатов (д.т.н., профессор), преподаватель кафедры «Сварочное производство и технология конструкционных материалов».

Михаил Альбертович Соковиков, заведующий лабораторией физических основ прочности.

Наиболее широко в качестве материала для создания пассивной броневой защиты применяется керамика. Керамические и комбинированные слоистые вкладыши на основе керамики (в основном корунда) используются для индивидуальной защиты в бронезилетах, керамическими комбинированными панелями защищают фюзеляж вертолетов и другие части летательных аппаратов [2].

С развитием науки о материалах номенклатура неметаллических их разновидностей, перспективных для создания брони, пополнилась нанокерамикой, волокнистыми и углеродными материалами, *синтетическими минеральными сплавами* [3].

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

Цель настоящей работы – исследовать диссипативные свойства и оценить возможность использования симиналов в качестве материала для пассивной брони.

Объект и методы исследования. В качестве объекта исследования рассматривается симинал на основе горнблендита базальтового типа, его обобщенный состав указан в таблице. Из данного симинала были изготовлены образцы в форме дисков диаметром 30 мм и толщиной 5 мм. Оценить диссипативную способность материалов представляется возможным экспериментальным путем с использованием специализированных испытательных установок.

Экспериментальные исследования проходили на установке высокоскоростного пробивания (рис. 1).

Оксидный состав силикат-хромитового симинала, 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

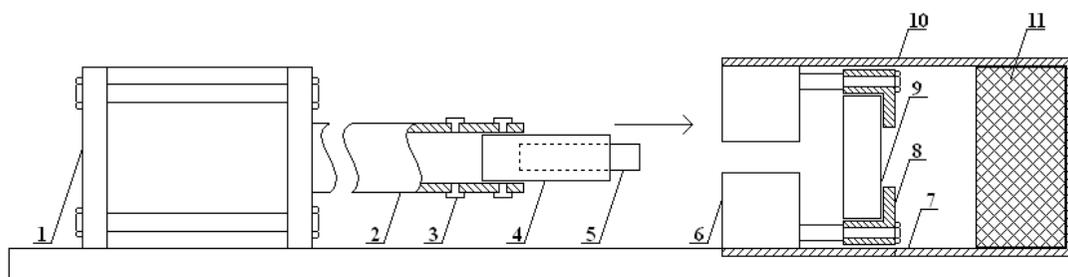


Рис. 1. Схема установки для испытания образцов на пробивание:

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

Принцип действия установок основан на том, что они имитируют ситуации, возникающие при эксплуатации брони в реальных условиях, при этом они оснащены

приборами для фиксации тепловых изменений на поверхности образцов. Установка для динамических прочностных испытаний на сжатие основана на реализации метода Кольского с использованием разрезного стержня Гопкинсона.

При проведении испытаний фиксация диссипации энергии в режиме реального времени осуществлялась с помощью инфракрасной камеры CEDIP Silver 450M.

Изображения, полученные съемкой с применением инфракрасной камеры, были проанализированы с помощью программного обеспечения, в результате по интенсивности окрашенных участков на изображении была установлена величина температуры нагрева отдельных участков на образцах в момент их разрушения.

Испытания на установке высокоскоростного пробивания проводились с применением стандартного цилиндрического ударника, укороченного ударника и стального шарика.

Результаты и их обсуждение. В результате было установлено, что при налетании стандартного ударника на верхнюю часть образца со скоростью 650 м/с максимальная температура на тыльной поверхности мишени в момент разрушения составила 94 °С (рис. 2).

При налетании ударника в виде шарика из высокоуглеродистой стали диаметром 6 мм, массой 1 г со скоростью 65 м/с в нижнюю часть образца максимальная температура на тыльной поверхности мишени составила 100 °С.

При попадании укороченного ударника диаметром 5 мм, длиной 45 мм, массой 6,8 г со скоростью 49,5 м/с в середину образца максимальная температура на тыльной поверхности мишени составила ~60 °С. При скорости 125 м/с температура составила ~40 °С, при налетании того же ударника, но в низ образца и со скоростью 80,6 м/с, максимальная температура составила ~92 °С.

При скорости 650 м/с характерный размер фрагментов разрушенного образца составил ~0,5 – 1,0 мм. При скорости 65 м/с и ударе стальным шариком характерный размер фрагментов составил ~5 – 10 мм.

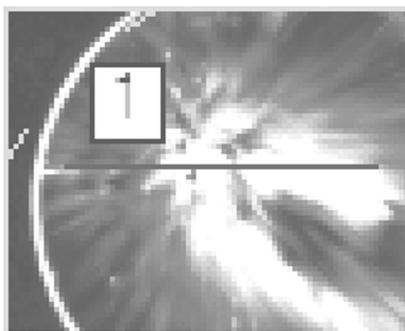


Рис. 2. Температура тыльной стороны мишени в момент разрушения стандартным ударником со скоростью 650 м/с (чем светлее цвет, тем выше температура)

При более высоких скоростях соударения нагрев образца происходит во множестве областей, при более низких скоростях диссипация энергии интенсивно происходит в небольшом количестве очагов.

Эксперименты, проведенные на установке для динамических прочностных испытаний, позволили конкретизировать результаты, представленные ранее.

Для первого эксперимента использовался образец диаметром 11,5 мм и толщиной 5,0 мм, зоной приложения нагрузки был верх образца, скорость налетания ударника на нагружающий стержень 22,7 м/с. На рис. 3 представлена графическая форма получаемых результатов. Для второго эксперимента использовался образец диаметром 12,2 мм и толщиной 4,9 мм, зоной приложения нагрузки была середина, скорость налетания ударника на нагружающий стержень 25 м/с. Для третьего эксперимента использовался образец диаметром 12,0 мм и толщиной 5,2 мм, зоной приложения нагрузки была нижняя часть образца, скорость налетания ударника на нагружающий стержень 23,1 м/с. Для четвертого эксперимента использовался образец диаметром 12,0 мм и толщиной 5 мм, зоной приложения нагрузки была середина образца, скорость налетания ударника на нагружающий стержень 24 м/с.

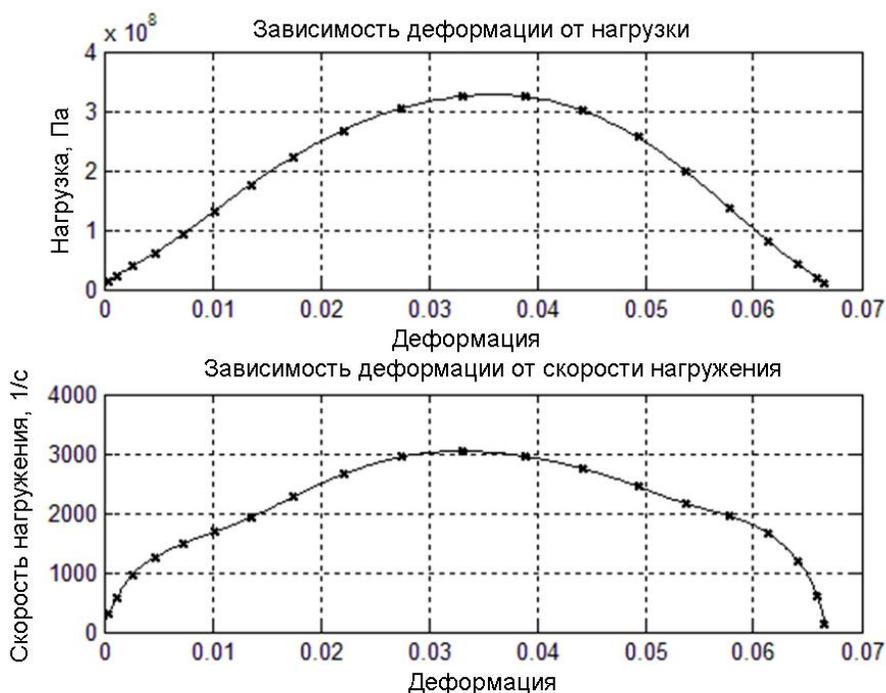


Рис. 3. Графическая форма представления результатов – зависимость напряжения сжатия от деформации и скорости деформации от деформации

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 – 200 °С.

Обобщая результаты, полученные в ходе экспериментов с привлечением двух испытательных установок, следует отметить:

- величина осколков образца при разрушении сопоставима с размерами макроскопических кристаллических агрегатов в его структуре, то есть составляет 0,5 – 1,0 мм;

- нагрев тыльной стороны образцов в момент столкновения неравномерный, максимальная температура концентрируется в отдельных участках, которые обозначены на снимке более светлыми пятнами;

– зависимость величины деформации и температуры нагрева от скорости налета ударника имеет нелинейный характер, зависимость имеет преимущественно параболический вид;

– образец разрушается практически полностью вне зависимости от точки приложения удара.

Симиналы представляют собой поликомпонентные конгломераты, состоящие из разнотипных минеральных зерен различных размеров и формы, они скреплены аморфными прослойками различных составов [7]. Все это создает большую неоднородность среды, способствующей возникновению различных значений локальных напряжений и скоростей распространения возмущений, их взаимодействию с неоднородностями и друг с другом [4-5]. Это частично объясняет наличие локальных нагретых областей на тыльной поверхности образца, однако не объясняет, почему образец практически равномерно рассыпается на частицы мельчайшего размера.

Опыт изучения симиналов [8] позволяет нам говорить о том, что деформационные преобразования, в частности релаксация, могут приводить к изменениям в структуре. Многие из минеральных составляющих симиналов склонны к полиморфизму [9], под действием сжимающих сил в них происходят процессы двойникования, сдвиговые деформации и даже переход от одной полиморфной модификации к другой.

Температура нагрева на поверхности образца, разумеется, слишком низка для того, чтобы произошли полиморфные превращения, однако из опыта механосинтеза [10], который также занимается вопросами диссипации, нам известно, что многие структурные превращения могут происходить и без высоких температур.

Структурные преобразования в материале возможны, когда величина механической нагрузки приближается к величине критического напряжения сдвига. Согласно проведенным нами механическим испытаниям деформация сдвига у симиналов может возникнуть при воздействии нагрузки, равной 11 кН, следовательно, структурные преобразования в них могут происходить и при относительно низких показателях нагрузки. Поскольку в процессе удара симиналы явно испытывают большую нагрузку, макроскопическая пластическая деформация осуществляется главным образом путем размножения подвижных дислокаций различного типа. В зависимости от скорости движения дислокаций и температуры преобладают различные механизмы торможения дислокаций и обусловленной ими диссипации энергии.

Периодическое изменение конфигурации ядра дислокации и неравномерность ее движения по рельефу структуры приводят к излучению дислокацией упругих волн, т. е. к радиационному трению.

Таким образом, при пластической деформации преобразование подведенной механической энергии проходит следующие этапы:

механическое воздействие → волны деформации → движущиеся дислокации, при большой скорости генерирующие впереди себя упругие волны → взаимодействие движущихся дислокаций с кристаллической решеткой, ее дефектами и между собой → диссипация энергии в виде тепла → аккумуляция энергии в решетке твердого тела в виде структурных дефектов.

При подведении удельной механической энергии, превышающей предел прочности твердого тела, происходит его разрушение, что и наблюдается при испытании симиналов.

Поскольку волны деформации взаимодействуют с внутренними колебаниями решетки, которые могут быть значительными в особенности в аморфных прослойках, могут возникать резонансные явления.

В результате резонансных явлений при прохождении волн через твердое тело в зоне границы разнородных фаз могут образовываться блоки, размер которых зависит от подведенной энергии.

Из-за того, что материал неоднородный, механические нагрузки от удара концентрируются на очень малых площадках и создают высокие механические напряжения. При ударе пробойника в структуре симиналов возникают собственные волновые колебания, которые провоцируют структурные преобразования, приводящие к «саморазрушению».

Симиналы в результате внутренней реакции, спровоцированной энергетическим воздействием, скачкообразным образом переходят к состоянию «саморазрушающегося» материала, наподобие саморазрушающихся металлургических шлаков.

Фазовые преобразования приводят к неоднородному изменению плотности вещества в разных участках материала: там, где присутствуют минеральные фазы, плотность, вероятно, повышается; в аморфных участках она может и увеличиваться, и уменьшаться.

Возникает ситуация, при которой одни структурные составляющие лавинообразно увеличиваются в объеме, а другие уменьшаются, что и приводит к разрушению.

Применительно к симиналам, рассматривая процесс разрушения или парный процесс «разрушение → саморазрушение», можно сказать, что структурные и фазовые превращения при диссипации энергии симиналами возможны вследствие следующих процессов. Преобразование структуры, которое мы определили как вызванное деформацией и разгрузкой, может происходить путем сдвиговых деформаций, кручения решетки, изменения объема твердого тела непосредственно в волне сжатия и сопровождаться изменением координации ионов, разрывом и перегруппировкой межатомных связей, переносом электронов и другими физическими и химическими преобразованиями.

При динамических механических воздействиях энергия, подведенная к системе, распространяется в виде сильной пластической или условно «ударной» волны, возбуждая коллективное колебание «элементов» твердого тела (решетки, ионов, атомов и пр.), соответствующих уровню ее энергии. Самоорганизация структуры, фазовые переходы и химические превращения происходят непосредственно в области взаимодействия сильных пластических («ударных») волн сжатия и разгрузки между собой и с волнами, генерируемыми твердым телом при механических нагрузках и напряжениях выше динамического предела текучести или теоретической прочности твердого тела.

Фазовые и структурные превращения, а также «локальная потеря устойчивости структуры», т. е. нарушение только некоторых химических связей, могут происходить за счет резонансного возбуждения определенных мод колебаний вследствие обратной связи между макро- и микродвижением вещества.

Возвращаясь к практике применения симиналов, можно сказать следующее: при воздействии на них ударных нагрузок, аналогичных воздействию движущихся снарядов или поражающих элементов, в материале запускается термодинамическая реакция, приводящая к структурному переходу в состояние саморазрушения. Однако величина блоков, на которые разделяется материал, и размер зоны преобразований зависят от интенсивности воздействия. Поскольку механическая энергия переходит в волновую, которая провоцирует реакцию с поглощением теплоты, величина нагрева образца незначительна. Согласно анализу инфракрасных изображений и градиен-

ту размеров осколков можно выделить несколько зон разрушения в образце на протяжении его толщины (рис. 4).

В зоне очага разрушения, непосредственно примыкающего к месту контакта с ударником, происходит наиболее интенсивное разрушение симинала с образованием значительного количества мелких фракций.

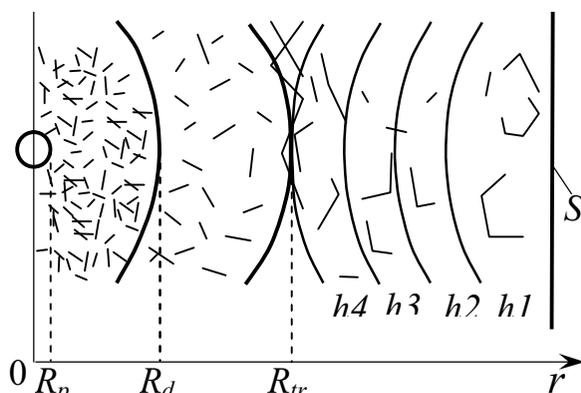


Рис. 4. Образование зон разрушения в образце симиналов:

r – расстояние от зоны до передней стенки образца; R_p – радиус зоны основного измельчения;
 R_d – радиус зоны дробления; R_{tr} – радиус зоны трещинообразования;
 h_i – толщина откольных зон

В зоне радиального трещинообразования тангенциальные растягивающие напряжения превышают динамический предел прочности и образуются радиальные трещины. Очевидно, что резкой границы зоны трещинообразования благодаря неоднородности среды и ее естественной блочности не может быть. Поэтому вблизи границы области трещинообразования и вне ее существует зона нерегулируемого дробления.

Заключение. Таким образом, в результате проведенных испытаний установлено, что симиналы обладают высокой способностью к диссипации механической энергии, возникающей при соударении с поражающим элементом. Механическая энергия преобразуется в них в волновую, а затем значительная ее часть уходит на обеспечение структурных преобразований в материале, которые заканчиваются саморазрушением; оставшаяся часть энергии переходит в тепловую. Следовательно, симиналы могут служить пассивной бронево́й защитой.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Прохоров Б.А. Боеприпасы артиллерии. – М.: Машиностроение, 1973. – 512 с.
2. Дорофеев А.Н., Кузнецов В.А., Саркисян Р.С. Авиационные боеприпасы. – М.: Изд-во ВВИА им. Жуковского, 1968.
3. Артемов А.О., Игнатова А.М., Чудинов В.В. Оценка стойкости симиналов на действие высокودинамических нагрузок // Мат-лы I Междунар. НПК «Молодые ученые Прикамья – 2011». – Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2011. – С. 180-183.
4. Бровин В.Е. Влияние детонационных характеристик ВВ на параметры разрушения горных пород // В.Е. Бровин, М.Г. Менжулин / Взрывное дело. – 2007. – № 98/55. – С. 55-62.
5. Бровин В.Е. Энергетическая эффективность разрушения горных пород при взрыве ВВ с различными детонационными характеристиками // В.Е. Бровин, М.Г. Менжулин / Записки горного института. – Т. 171. – 2007. – С. 121-125.

6. Боровиков В.А., Ванягин И.Ф. Моделирование действия взрыва при разрушении горных пород. – Ленинград: ЛГИ, 1980.
7. Игнатова А.М., Ханов А.М., Чернов В.П. Исследование и разработка основных правил управления структурным миром силикатов применительно к каменному литью // Сб. тезисов II Всеросс. конф. «От наноструктур, наноматериалов и нанотехнологий к наноиндустрии». – Ижевск: ИЖГТУ, 2009. – С. 45.
8. Игнатова А.М., Потопов С.С., Гайдюков В.В., Ханов А.М. Расчет параметров фазовых и структурных составляющих каменного литья // Мат-лы V Всеросс. НТК «АНТЭ-09». – Казань: КГАУ, 2009. – С. 237-241.
9. Игнатова А.М., Артемов А.О., Чудинов В.В., Игнатов М.Н., Соковников М.А. Исследование диссипативной способности синтетических минеральных сплавов // Мат-лы IV Междунар. конф. «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов». – М., 25-28 окт. 2011. – М.: ИМЕТ РАН, 2011. – С. 662-664.
10. Родионов В.Н., Сизов И.А., Цветков В.М. Основы геомеханики. – М.: Недра, 1986.

Статья поступила в редакцию 10 февраля 2011 г.

A STUDY OF DISSIPATIVE PROPERTIES OF SYNTHETIC MINERAL ALLOYS FOR DEVELOPING OF ARMOR PROTECTION ON THEIR BASIS

A.M. Ignatova¹, A.O. Artemov¹, V.V. Chudinov², M.N. Ignatov¹, M.A. Sokovnikov²

National Research Perm Polytechnic University
29, Komsomolsky pr., Perm, 614000

Institute of Continuum Mechanics, Ural Branch of Russian Academy of Sciences
1, Akad. Koroleva st., Perm, 614013

The article discusses the results obtained in the study of dissipative properties of synthetic mineral alloys. It has been found that synthetic mineral alloys have a high potential for dissipation of mechanical energy generated during collision with projectiles. Mechanical energy is converted into wave energy, and then much of it is used to make structural changes in the material which end in its self-destruction, the rest of the energy being transformed into heat. Therefore synthetic mineral alloys can serve as passive armor protection.

Keywords: *armor-plating, dissipation, synthetic mineral alloys, deformation.*

Anna M. Ignatova (Ph.D. (Techn.)), Assistant.

Arseny O. Artemov, Assistant.

Vasily V. Chudinov, Engineer.

Mihail N. Ignatov (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.

Mihail A. Sokovnikov, Head of Lab.