

стадиях проникания (особенно для малопрочной грунтовой преграды). Впоследствии, по мере снижения скорости, ускорения, соответствующие различным вариантам определения касательных напряжений, выравниваются, а на заключительной стадии проникания большим по абсолютному значению становится уже ускорение, соответствующее $\tau_n = \alpha C$. Это свидетельствует о том, что при снижении скорости ударника в процессе проникания до определенного значения должен наблюдаться переход от режима «прилипания» частиц грунтово-скальной преграды на контактной границе с $\tau_n = \alpha C$ к режиму «проскальзывания» с $\tau_n = \mu \sigma_n$.

Таким образом, наиболее обоснованным в физическом отношении вариантом определения касательных напряжений на границе контакта ударника с грунтово-скальной преградой при проникании является следующий – $\tau_n = \alpha C$ на начальной стадии проникания (пока скорость ударника достаточно велика и выполняется условие $\mu \sigma_n > \alpha C$) и $\tau_n = \mu \sigma_n$ на заключительной стадии.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 15-08-08319-а.

Список литературы

1. В.А.Велданов, С.В.Федоров. Особенности поведения грунта на границе контакта с недеформируемым ударником при проникании // Прикладная механика и техническая физика. 2005, Т. 46, № 6, с. 116–127.
2. A.I.Bunimovich, A.Dubinsky. Mathematical Models and Methods of Localized Interaction Theory. World Scientific, Singapore, 1995.
3. G.Ben-Dor, A.Dubinsky, T.Elperin. Applied High-Speed Plate Penetration Dynamics. Springer, Netherlands, 2006.
4. В.А.Велданов. Закон сопротивления прониканию ударников в грунт // Оборонная техника. 1995, № 4, с. 32–34.
5. G.Ben-Dor, A.Dubinsky, T.Elperin. Engineering models of high speed penetration into geological shields // Central European Journal of Engineering. 2014, No. 4(1), p. 1–19.
6. А.Я.Сагомоян. Проникание. М.: Изд-во МГУ, 1974.
7. М.М.Александров. Силы сопротивления при движении труб в скважине. М.: Недра, 1978.
8. G.Ben-Dor, A.Dubinsky, T.Elperin. Localized interaction models with non-constant friction for rigid penetrating impactors // International Journal of Solids and Structures. 2007, V.44, p. 2593–2607.
9. С.В.Федоров, Н.А.Федорова, В.А.Велданов. Использование импульса реактивной тяги для увеличения глубины проникания исследовательских модулей в малопрочные грунтовые преграды // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2014, Выпуск 4(84), с. 53–63.
10. С.В.Федоров, Н.А.Федорова. Влияние прочностных свойств грунтово-скальной преграды на глубину проникания ударников при дополнительном действии импульса реактивной тяги // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение. 2016, № 4, с. 40–56.

УДАРНО-ТЕРМИЧЕСКОЕ РАЗМИНИРОВАНИЕ МИННО-ВЗРЫВНЫХ ЗАГРАЖДЕНИЙ

И.Ф. Кобылкин, И.А. Павлова

МГТУ им. Н.Э. Баумана,
Москва, Россия

В настоящей статье анализируется возможность преодоления минно-взрывных заграждений (МВЗ) путем множественного воздействия потока поражающих элементов (ПЭ) на участок заминированной местности. Возбуждение детонации в снаряжении мин при ударно-проникающем воздействии компактных ПЭ требует достаточно высокого уровня скоростей ПЭ порядка 2000 м/с и

более, трудно достижимого при одновременном метании большого количества ПЭ. В то же время обеспечение скоростей ПЭ в диапазоне 500 – 700 м/с является вполне разрешимой задачей, однако этого уровня скоростей недостаточно для обеспечения возбуждения взрывных превращений в снаряжении мин за счет ударно-волнового инициирования. Решением проблемы может стать ударно-проникающее воздействие на мины сильно разогретых ПЭ. Попадание такого ПЭ в мину приведет к зажиганию и последующему горению снаряжения мины и, следовательно, к ее разминированию. Для надежного преодоления МВЗ необходима достаточно высокая плотность потока ПЭ, воздействующих на участок заминированной местности, поэтому конструкция предполагаемых инженерных боеприпасов для дистанционного разминирования может быть близка к классическим шрапнельным снарядам времен первой мировой войны [1], но в которых метание ПЭ может осуществляться не только пороховыми зарядами, но и зарядами ВВ. Доставка таких боеприпасов (БП), возможно обладающих системой коррекции траектории, на заминированный участок местности может осуществляться с помощью метательных устройств типа минометов или мортир.

Принципиальная возможность ударно-термического разминирования, кроме прочих факторов, обеспечивается также достаточной плотностью потока ПЭ n на участке МВЗ (рис. 1). Простой геометрический анализ позволяет оценить количества ПЭ N , которое возможно разместить в корпусе снаряда. В таблице 1 для шрапнельного снаряда калибром 76 мм приведены значения N в зависимости от диаметра ПЭ. Размеры ПЭ выбраны из ряда размеров шариков для подшипников качения, в связи с целесообразностью использования в качестве ПЭ отходов шарикоподшипникового производства.

Таблица 1. Количество ПЭ в штатном шрапнельном снаряде 53-Ш-354Т

Диаметр ПЭ, мм	Масса ПЭ, г	Количество ПЭ
8,5	2,51	1 108
10,3	4,50	618
12,7	8,37	332
15,1	14,02	198

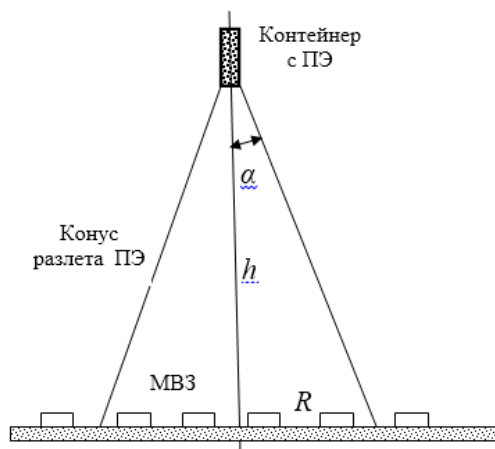


Рисунок 1. Оценка принципиальной возможности ударно-термического разминирования

Приближенные оценки показывают, что с учетом того, что $R = h \cdot \operatorname{tg} \alpha$ и $n = \frac{N}{\pi R^2}$, R – радиус разлета ПЭ, м, h – высота подрыва снаряда, м, α – угол разлета ПЭ, град., N – число ПЭ, n – плотность поля ПЭ, м⁻² (Рис. 1), не представляет труда обеспечить плотность 26–44 ПЭ на 1 м², что достаточно для разминирования МВЗ из противотанковых мин типа ТМ-62М. Результаты данной оценки для различного количества ПЭ представлены в таблице 2.

Таблица 2. Плотность поля ПЭ n (м^{-2}) на участке МВЗ

d, мм (N, шт)	α , град.			
	15°		20°	
	h, м			
	10	20	10	20
8,5 (1108)	49	12	26	6
10,3 (618)	27	6	14	3
12,7 (332)	14	3	7	1
15,1 (198)	8	2	4	1

На основании полученных результатов можно сделать вывод о том, что использование ПЭ диаметром 12,7 мм и более для снарядов калибра 76 мм нецелесообразно, в связи с невозможностью обеспечения высокой плотности поля ПЭ.

Для разогрева ПЭ следует использовать быстрогорящие малогазовые или безгазовые реакционно-способные материалы (РМ), в качестве которых можно использовать пиротехнические составы, составы самораспространяющегося высокотемпературного синтеза или специально разработанные составы. Возможны два варианта разогрева ПЭ. В первом варианте сплошные ПЭ располагаются в металлическом корпусе, а пространство между ними заполняется необходимым количеством РМ, обеспечивающим разогрев ПЭ до нужной температуры в пределах 800 – 1000 °С. Во втором варианте для разминирования могут быть использованы оболочечные ПЭ, снаряженные РМ, который поджигается в процессе взрывного метания и разогревает оболочку ПЭ до нужной температуры. В настоящей статье анализируется только первый вариант.

В качестве РМ для снаряжения для таких инженерных боеприпасов разминирования в первом приближении могут использоваться разбавленные быстрогорящие термитно-зажигательные составы с температурой горения до 1500 °С [2, 3]. Поджигание разогревающего наполнителя должно осуществляться в момент выстрела. Необходимо отметить, что рассматриваемые боеприпасы будут обладать достаточно высоким зажигательным действием.

Была проведена оценка наиболее важных физических параметров процесса разогрева ПЭ. Характерное время разогрева ПЭ может быть оценено путем расчета времени тепловой релаксации

τ_r сферического ПЭ: $\tau_r = \frac{r^2}{a_T}$, $a_T = \frac{\lambda}{\rho_{ПЭ} C_p}$, где r – характерный размер ПЭ (например, радиус); a_T – коэффициент температуропроводности материала ПЭ; λ – коэффициент теплопроводности; $\rho_{ПЭ}$ – плотность, C_p – теплоемкость материала ПЭ. Для стального ПЭ теплофизические характеристики при температуре $T = 600$ К были взяты из справочника [4]: $\lambda = 50$ Вт/(м·К), $\rho_{ПЭ} = 7,8 \cdot 10^3$ г/м³, $C_p = 0,5$ КДж/(кг·К). При этих теплофизических характеристиках коэффициент температуропроводности стали равен $a_T = 0,13 \cdot 10^{-4}$ м²/с, а характерное время разогрева стальных ПЭ различного диаметра приведено в таблице 3.

Таблица 3. Время разогрева стальных ПЭ

d, мм	τ_r , с
8	1,24
10	1,95
12	2,8
15	4,4

Оценку сверху температуры разогрева ПЭ произведем исходя из предположения, что вся тепловая энергия, выделяющаяся при горении РМ, расходуется на нагрев ПЭ. Тогда для расчета температуры разогрева T_H имеем следующее соотношение $T_H - T_0 = \frac{Q_{РМ} \rho_{РМ} (1-\gamma)}{\gamma C_p \rho_{ПЭ}}$, где T_0 – начальная температура ПЭ; $Q_{РМ}$ – тепловой эффект превращения РМ; γ – массовая доля ПЭ в смеси ПЭ с

разогревающим реакционно-способным материалом. Если в качестве такого материала использовать разбавленный железо-алюминиевый термит Al/Fe_2O_3 25/75 плотностью $\rho_{PM} = 3 \cdot 10^3$ г/см³, для которого $Q_{PM} \approx 2$ МДж/кг (у неразбавленного термита $Q_{PM} \approx 4$ МДж/кг), то при $\gamma = 0,6$ прирост температуры составит $T_n - T_0 \approx 1000$ °.

Нами были проведены предварительные эксперименты по пиротехническому разогреву ПЭ для ударно-термического разминирования. Цель экспериментов состояла в подборе подходящего пиротехнического состава, обеспечивающего быстрый разогрев в течение нескольких секунд стальных ПЭ без их расплавления. Была проведена серия экспериментов по разогреву ПЭ различными быстрогорящими термитно-зажигательными составами с температурой горения до 1500 С. В качестве ПЭ выступали стальные шарики диаметром 12 мм, которые помещались в тонкостенный металлический корпус, а пространство между ПЭ заполнялось пиротехническим составом. Поджигание пиротехнического состава осуществлялось «охотничьими» спичками.

Компоненты исследованных пиротехнических составов приведены в таблице 4. Добавка нитрата бария в термит повышает его тепловой эффект и облегчает его зажигание, а небольшое газообразование (2,5 % газообразных продуктов (по весу)) предотвращает спекание или сплавление разогретых ПЭ.

Таблица 4.

№ состава	Компоненты
1	железная окалина - 50%; Al - 24%; Ba(NO ₃) ₂ – 26%
2	железная окалина - 50%; Mg - 24%; Ba(NO ₃) ₂ – 26%
3	железная окалина - 50%; Al - 12%; Mg - 12%; Ba(NO ₃) ₂ – 26%

Состав № 1 представляет собой термитно-зажигательный состав, используемый для снаряжения зажигательных авиабомб [3]. Поскольку железоалюминиевый термит трудно воспламеняется и горит с невысокой скоростью, было решено часть алюминиевого порошка заменить магнием (составы № 2 и № 3), который облегчает воспламенение и увеличивает тепловой эффект и скорость горения.

Измерение температуры ПЭ осуществлялось после завершения горения контактным способом с помощью цифрового мультиметра Universal M838 ИЕК. Результаты измерения температуры, осредненные по 3–5 опытам, приведены в таблице 5. Время горения составов составляло 1 – 3 с.

Таблица 5.

№ состава	T, °C
1	360–400
2	750–800
3	600–650

Проведенные эксперименты показали, что при использовании пиротехнических составов стальные ПЭ могут быстро разогреваться до температур 750-800° С.

Оценка возможности пробивания стальных оболочек противотанковых мин толщиной до 1–5 мм, установленных на поверхности (минирование набросом) проведена при помощи известной формулы для скорости пробития $v_{пр}$ стальной преграды толщиной δ стальным ПЭ сферической формы массой $m_{пэ}$ [5] $v_{пр} = \frac{155h \Phi}{m_{пэ}^{1/3}}$.

Коэффициент формы Φ для сферических ПЭ равен $\Phi = 1,21$. Результаты расчета для ПЭ различных диаметров приведены на рис. 2. Видно, что для ПЭ диаметром 8÷15 мм $v_{пр} = 220\div340$ м/с. Такой диапазон скоростей легко достигим.

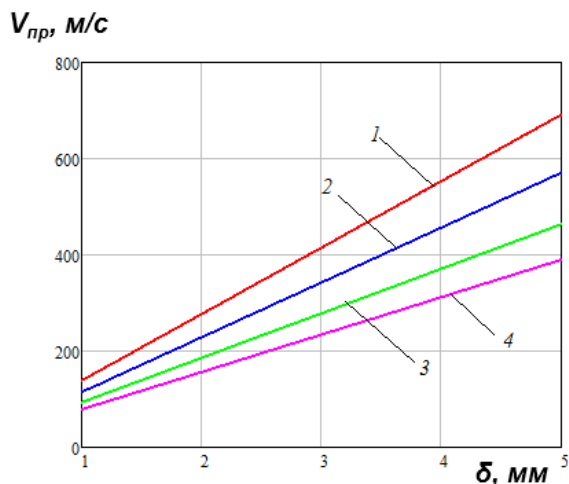


Рисунок 2. Зависимость скорости пробития от толщины оболочки ВУ для различных диаметров ПЭ: (1 – $d = 8$ мм; 2 – $d = 10$ мм; 3 – $d = 12$ мм; 4 – $d = 15$ мм)

Выполненные оценки показывают реалистичность предлагаемого принципа устройства и действия инженерных боеприпасов разминирования.

Список литературы

1. Средства поражения и боеприпасы: Учебник / А.В. Бабкин, В.А. Велданов, Е.Ф. Грязнов и др.; Под общ. ред. В.В. Селиванова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 984 с.: ил.
2. Мельников В.Э. Современная пиротехника. – М.: 2014. – 480 с.
3. Шидловский А.А. Основы пиротехники. М.: Машиностроение, 1964.
4. Физические величины: Справочник / Под ред. И.С. Григорьевой, Е.З. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991.
5. Физика взрыва: В 2 т. / И.Ф. Кобылкин [и др.]; Под ред. Л.П. Орленко. М.: ФИЗМАТЛИТ. 2002. Т.2. 656 с.

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ БИМЕТАЛЛА НЕРЖАВЕЮЩАЯ СТАЛЬ – БРОНЗА МЕТОДОМ СВАРКИ ВЗРЫВОМ

О.Б. Дреннов, А.Л. Михайлов

РФЯЦ – ВНИИЭФ, г. Саров, Россия

Введение

В рамках реализации международного проекта термоядернофизических систем ИТЭР ОАО «НИКИЭТ» предложил ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» проработать технологию изготовления матриц для последующего исполнения адаптера электросоединителя АЭ1.000.СБ разработки ОАО «НИКИЭТ».

Адаптер электросоединитель предполагается выполнить в виде биметаллического слоя из материалов со специальными свойствами: нержавеющая сталь 03X17H14M3 – бронза БрХ1Цр. Необходимо обеспечить контакт по плоскости соединения двух металлов. Для выполнения последнего требования была выбрана технология сварки взрывом. Необходимо было разработать