

составляющая массовой скорости v_2 и приведенная длительность положительной фазы радиальной составляющей движения среды $\tau_1/\alpha^{1/2}$ в зависимости от приведенного расстояния $r/\alpha^{1/2}R_0$, где R_0 — радиус цилиндрического заряда. Первоначальные экспериментальные данные заимствованы из работы [7].

Видно, что для предложенной схемы приведения экспериментальные данные, полученные при взрыве цилиндрических зарядов разной плотности, с вполне удовлетворительной точностью группируются вокруг единых зависимостей.

Таким образом, можно считать, что принцип подобия движения по энергии, переданной твердой среде при взрыве, справедлив и в случае взрыва цилиндрических зарядов различной плотности.

*Поступила в редакцию
10/XI 1973*

ЛИТЕРАТУРА

1. А. А. Спивак. ФГВ, 1978, 14, 2.
2. С. С. Григорян, Г. М. Ляхов и др. ПМТФ, 1963, 4.
3. А. А. Спивак, В. М. Цветков. ФТПРПИ, 1973, 5.
4. А. А. Спивак. ФГВ, 1973, 9, 2.
5. Справочник по буровзрывным работам на карьерах. Киев, Наукова думка, 1973.
6. Н. М. Кузнецов, К. К. Шведов. ФГВ, 1967, 3, 2.
7. М. М. Павлов, Д. А. Судаков. — В сб.: Взрывное дело, № 76/33, М., Недра, 1976.

ВОЗМОЖНЫЙ МЕХАНИЗМ ДЕЙСТВИЯ ДВУХСЛОЙНОГО ЗАРЯДА ВВ ПРИ ВЗРЫВНОМ УПРОЧНЕНИИ МЕТАЛЛА

*Р. П. Дидык, Е. А. Семенюк, Л. В. Грязнова, О. Я. Усов
(Днепропетровск)*

В последнее время прочно устанавливается тенденция использования в технологии взрывного упрочнения двухслойных зарядов ВВ, слою которых резко отличаются по своим физико-химическим свойствам. Как показали исследования, существенным преимуществом применения двухслойных зарядов ВВ для упрочнения металлов является отсутствие микро- и макронарушений в обрабатываемом материале, повышение циклической прочности в сочетании с высокими механическими характеристиками.

Имея в виду, что преимущества использования заряда особенно четко проявляются при обработке объемных деталей, можно попытаться объяснить действие такого заряда на основе простой модели для случая упрочнения детали цилиндрической формы.

Качественно схема механического действия цилиндрического однослойного заряда ВВ (для простоты рассматривается плоское сечение) может быть представлена следующим образом. Импульс напряжений с поверхности цилиндра идет внутрь радиусов и далее, отразившись от оси симметрии, возвращается обратно. Процесс сопровождается потерями, но при отражении импульс в определенной мере должен сохранить подобие с первоначальным импульсом, возбужденным детонационной волной. Поэтому если сравниваются между собой два одинаково энергоемких импульса, излучаемых внутри с поверхности цилиндра с амплиту-

дамп, характеризующими различные типы ВВ, то отразившиеся от оси «вторичные» импульсы должны сохранить между собой приблизительно те же соотношения. Можно считать, что эти импульсы генерируются на поверхности некоторого соосного цилиндрического «упругого излучателя».

Порождаемое импульсами поле динамических напряжений в материале будет обусловлено формой и амплитудой первоначально приложенных импульсов на контакте детонирующего ВВ с поверхностью цилиндра. При этом можно полагать, что после начала процесса детонации по периметру каждого сечения цилиндра с приходом туда детонационного фронта мгновенно устанавливается давление p_n , которое в следующий момент начинает падать из-за расширения продуктов детонации (ПД) по адиабате. Скорость падения давления зависит от скорости детонации D ; обычно чем больше величина D , тем выше значение p_n и тем быстрее развивается волна разрежения за фронтом детонации [1]. Таким образом, форма профиля гребня давления в каждой точке поверхности цилиндра характерна для применяемого типа ВВ. Подобное рассуждение справедливо и для вторичных импульсов на поверхности «упругого излучателя».

Сравним поле динамических напряжений, возникающих при действии двух различных начальных импульсов давления, приложенных внутри цилиндра на поверхности «упругого излучателя», производящего вторичные импульсы после того, как сформировавшаяся ударная волна отразилась от оси симметрии. За «упругий излучатель» следует принять соосную цилиндрическую поверхность небольшого радиуса r_0 . Требуется рассчитать и сравнить динамические напряжения для $r \geq r_0$. В качестве граничных условий задаются радиальные динамические напряжения на границе r_0 (графики вида I и II рис. 1, где $\bar{\sigma}_r$, $\bar{\tau}$ — соответственно напряжение и время в безразмерных единицах). При этом одно из них (см. рис. 1, I) порождено быстродетонирующим составом ВВ, а другое — сравнительно низким по скорости детонации ВВ, так что $\alpha_2 \gg \alpha_1$, но величины обоих импульсов одинаковы (площади под графиками равны). Система дифференциальных уравнений на характеристиках, описывающих распространение динамических напряжений в упругом теле с цилиндрической симметрией, при записи в безразмерных переменных имеет вид:

вдоль семейства характеристик $\bar{r} - \bar{\tau} = \text{const}$

$$d\bar{\sigma}_r - \frac{1-\nu}{1-\nu-2\nu^2} d\bar{\nu} = \left(\bar{\sigma}_\theta - \bar{\sigma}_r + \frac{\nu}{1-\nu-2\nu^2} \right) \frac{d\bar{r}}{\bar{r}},$$

вдоль семейства характеристик $\bar{r} + \bar{\tau} = \text{const}$

$$d\bar{\sigma}_r + \frac{1-\nu}{1-\nu-2\nu^2} d\bar{\nu} = \left(\bar{\sigma}_\theta - \bar{\sigma}_r - \frac{\nu}{1-\nu-2\nu^2} \right) \frac{d\bar{r}}{\bar{r}},$$

вдоль семейства $\bar{r} = \text{const}$

$$\frac{d\bar{\sigma}_r}{d\bar{\sigma}_\theta} = \left(1 - \nu - \frac{1}{1-\nu^2} \frac{\bar{\nu} d\bar{\tau}}{\bar{r} d\bar{\sigma}_\theta} \right) \frac{1-\nu}{\nu}.$$

При этом преобразование к безразмерным величинам проводится по формулам

$$\bar{\sigma}_{r, \theta} = \sigma/E, \quad \bar{\nu} = \nu/c, \quad \bar{\tau} = t \cdot c/r_0,$$

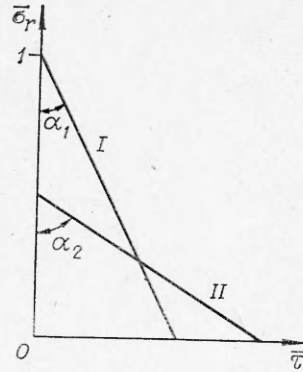


Рис. 1. Соотношение импульсов нагрузки для различных ВВ.

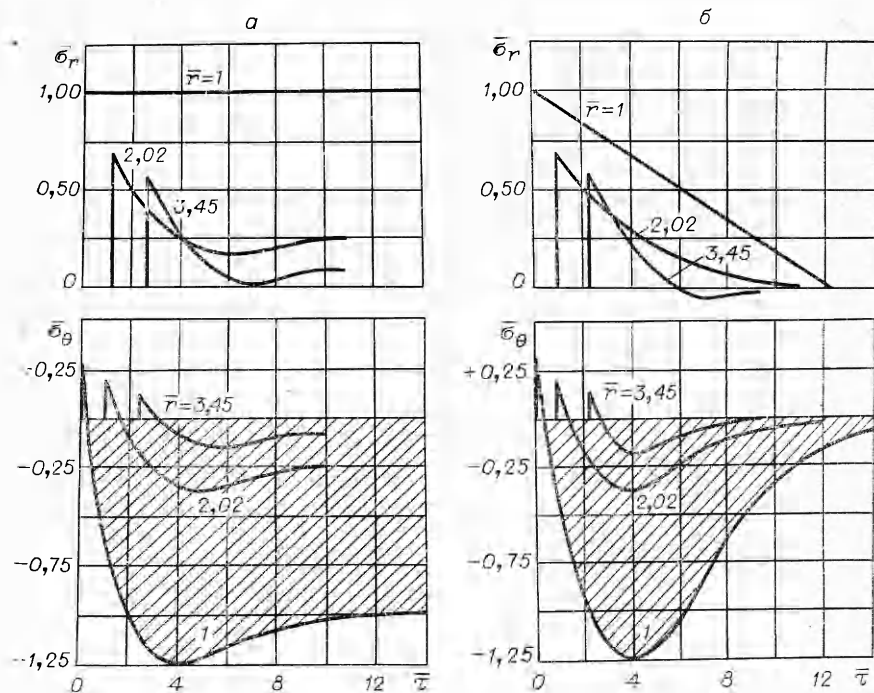


Рис. 2. Цилиндрические волны от линейно-падающей нагрузки (а) и для ступенчатой нагрузки (б).

где σ_r, σ_θ — радиальные и тангенциальные напряжения; E — модуль Юнга; c — скорость звука; r_0 — радиус полости излучателя; v — скорость распространения фронта ударной волны; ν — коэффициент Пуассона. Численное интегрирование на ЦВМ Минск-22 проведено при помощи алгоритма, запрограммированного для работы [2].

Проведенные расчеты для граничных условий, изображенных на рис. 2, а, б, показали, что по абсолютной величине σ_r и σ_θ сравнимы между собой, но при этом радиальные напряжения положительны (сжимающие), σ_θ отрицательны (растягивающие). Кроме того, для импульса рис. 1, II, соответствующего ВВ с низкой скоростью детонации, величина растягивающих напряжений оказывается значительно меньше, чем для импульса I. Значение последнего факта становится ясным, если учесть, что сталь имеет предел прочности на растяжение примерно вдвое меньше, чем на сжатие.

Таким образом, из картины напряжений следует, что разрушение внутри стального упрочняемого цилиндра будет характеризоваться по большей части околорадиальными трещинами, образующимися в случае, когда величина σ_θ превосходит предел прочности $\sigma_{кр}$. При этом в более слабом ВВ трещины могут вообще не появиться, если значения σ_θ не достигают предела прочности. Могут иметь место также и кольцевые трещины в силу механизма откола при отражении импульса от поверхности цилиндра. В целом картина трещиноватости позволяет предположить, что она образовалась в основном в условиях упругого деформирования (хрупкое разрушение). Для сравнения можно отметить, что в случае плоского нагружения поперечные динамические напряжения σ_r по величине в несколько раз меньше продольных σ_x и следует за ними по формуле

$$\sigma_r = \nu / (1 - \nu) \cdot \sigma_x.$$

Поэтому не возникает проблемы продольных разрывов образца при упрочнении плоской ударной волной.

Итак, радиальная трещиноватость цилиндрического образца возникает при наличии достаточно большой амплитуды у прикладываемого импульса напряжений, что соответствует применению сильного ВВ. Но поскольку степень поверхностного упрочнения металла определяется в основном величиной прикладываемого давления [3], возникает противоречие в требованиях к взрывчатому веществу.

Рассмотрим случай взрывного нагружения цилиндра наружным зарядом ВВ, достаточным для достижения эффекта упрочнения поверхности образца, но в то же время приводящим к возникновению остаточной трещиноватости в материале цилиндра. С точки зрения механики разрушения [4], процесс образования трещин является процессом преобразования энергии (в данном случае части энергии детонирующего ВВ в поверхностную энергию возникших трещин). Для «залечивания» этих трещин надо внести энергию, не меньшую по величине, чем затраченную на их образование, т. е. на образование новых свободных поверхностей. Эту энергию предоставляет дополнительный внешний слой ВВ — заряд ВВ II. Итак, комбинированный заряд ВВ — это двухслойный заряд, в котором внутренний, прилегающий к металлу слой мощного ВВ I обеспечивает при детонации упрочнение металла, а внешний слой ВВ II предоставляет добавочную энергию для захлопывания образовавшихся разрывов сплошности. Рассмотрим, каким требованиям должен удовлетворять заряд ВВ II.

Скорость детонации D_{II} должна быть значительно меньше, чем скорость детонации основного заряда ВВ ($D_{II} \ll D_I$) потому, что в противном случае не успеет произойти разделение динамических импульсов напряжений, и в каждом сечении цилиндра будет действовать единственный, более продолжительный — сумма двух во времени — импульс, который после отражения от центра симметрии произведет систему трещин более интенсивную, чем один лишь заряд ВВ I. Это вытекает из того, что такой «растянутый» импульс можно считать в предельном случае переходящим в граничный импульс «ступенчатой» формы, который, как показывают расчеты, приводит к значительному росту амплитуды и продолжительности существования поля отрицательных напряжений (см. рис. 2). Итак, добавочный импульс от ВВ II не должен непосредственно «накладываться» на импульс от ВВ I, они должны быть разделены во времени, достаточном для формирования системы трещин до прихода второго импульса. Только при этом условии возможно «залечивающее» действие ВВ II.

В качестве иллюстрации можно привести следующий расчет. Пусть $D_I = 6,8$ км/с, $D_{II} = 3,4$ км/с и $c = 5$ км/с, $r = 1,9$ см. Требуется оценить, на каком расстоянии от торца, где началась детонация, произойдет разделение импульсов, т. е. импульс от ВВ II встретится на поверхности цилиндра с отразившимся от осп импульсом напряжений, порожденным ВВ I. Из геометрических соображений ясно, что

$$2r/c = (X^* - X)/(D_I - D_{II}),$$

где $X^*/X = D_I/D_{II}$. Подставляя исходные данные, получим в результате $X = 2,4$ см. Таким образом, начиная с расстояния примерно в 2 см от торца, выполняется условие «разделения» импульсов, и чем дальше, тем лучше.

Следующее условие для заряда ВВ II заключается в том, что он не должен быть чрезмерно мощным. Точнее, его энергии должно хватить на захлопывание трещин, но не на образование новых. Энергоемкость ВВ II определяется толщиной внешнего слоя d_{II} , из второго условия можно вывести элементарную оценку минимальной достаточной величины d_{II} . Пусть при обработке цилиндрического образца зарядом ВВ I в поперечном единичном сечении единичной толщины образовалось n трещин,

каждая длиной l_i (т. е. всего $L = \sum_1^n l_i$). В соответствии с энергетическим условием разрушения затраченная на образование этих трещин энергия, равная суммарной поверхностной энергии вновь образованных трещин, выражается в виде $W_{\text{тр}} = 2\gamma \sum_1^n l_i$, где γ — работа образования единицы свободной поверхности.

Наименьший достаточный заряд ВВ II должен возместить эту «потерянную» энергию. По величине она, по крайней мере, не больше той части энергии продуктов детонации, которая пошла на взаимодействие с поверхностью цилиндра (W_{II}). Последнюю можно оценить величиной 35% всей энергии продуктов детонации из условия максимума перехода энергии при метании пластины [2].

Для получения оценки снизу положим, что $W_{\text{II}} = 0,35 E_{\text{ВВ}}$ ($E_{\text{ВВ}} = \epsilon_{\text{ВВ}} \cdot M$), $E_{\text{ВВ}}$ — тепловая энергия взрыва. Составляем баланс: $W_{\text{тр}} = W_{\text{II}}$, т. е.

$$2\gamma \sum_1^n l_i = 0,35 \cdot 4,187 \epsilon_{\text{ВВ}} \cdot \rho_{\text{ВВ}} \cdot \pi d_{\text{II}} (2R + d_{\text{II}}).$$

Здесь γ выражается в Дж/см², $[l_i]$, $[R]$, $[d_{\text{II}}]$ — в см, $[\rho_{\text{ВВ}}]$ — в г/см³, $[\epsilon_{\text{ВВ}}]$ — в ккал/кг.

Величина d_{II} определяется из уравнения

$$\frac{2\gamma \sum_1^n l_i}{d_{\text{II}}} = 4,66 \cdot \rho_{\text{ВВ}} \cdot \epsilon_{\text{ВВ}} (2R + d_{\text{II}}),$$

где $R = r + d_1$ — внутренний радиус внешнего заряда; d_1 — толщина слоя ВВ I.

Для проверки состоятельности предлагаемой модели поставлен эксперимент, основная идея которого заключается в следующем: если на самом деле имеет место «залечивание» наведенной трещиноватости при помощи энергии дополнительного слоя ВВ, то этот эффект должен оказываться в некоторой степени независим от величины промежутка времени между действием ВВ I и ВВ II. Это следует из того экспериментального факта, что упрочненный двухслойным зарядом цилиндрический образец характеризуется примерно одинаковым микроскопическим строением металла и, в частности, отсутствием трещиноватости в любых поперечных сечениях цилиндра, начиная с некоторого расстояния от торца с детонатором. Но с удалением от этого торца растет временной промежуток Δt , характеризующий «разделение» импульсов для данного сечения. Следовательно, и в предельном случае сколь угодно большого Δt (т. е. при раздельном подрыве зарядов) есть основание ожидать хотя бы частичного проявления эффекта «залечивания» трещин, хотя такое предсказание может показаться парадоксальным в силу того, что действие второго заряда приходится на образец, уже ослабленный нарушением сплошности материала. Опыты вполне подтвердили наличие ожидаемого эффекта.

Взрывному нагружению подвергались идентичные цилиндрические образцы из Ст.35 размером 38×150 мм. В качестве зарядов использовались гексопласт $d_1 = 4,7$ мм, $D_1 = 6800$ м/с и аммонит 6ЖВ с 10%-ной добавкой селитры с $d_{\text{II}} = 90$ мм, $D_{\text{II}} = 3100$ м/с при насыпной плотности $\rho_{\text{ВВ}} = 1,00$ г/см³.

Эксперимент был проведен в следующей последовательности. На стальной цилиндр наносился слой гексопласта (рис. 3, а). Заряд инициировался с одного торца детонатором, установленным на отводах заряда ВВ. Верхний торец цилиндра со стороны возбуждения заряда предохранялся от разрушения инертной прокладкой. Цилиндр после обработки

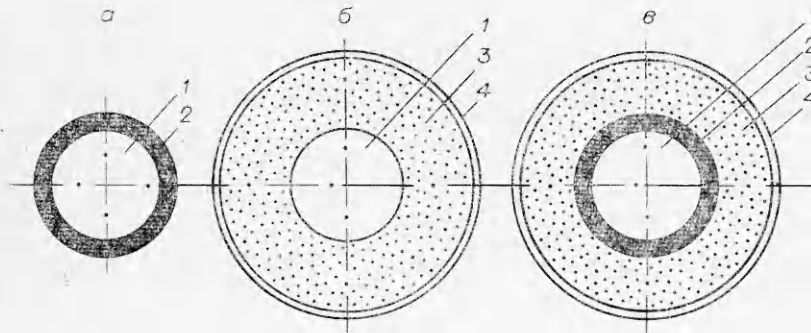


Рис. 3. Схемы взрывной обработки стальных цилиндров.
1 — ВВ I — гексопласт; 2 — стальной цилиндр; 3 — ВВ II — аммонит, 4 — каркас.

мощным составом ВВ I был подвергнут повторному нагружению аммиачно-селитренным зарядом ВВ II (рис. 3, б), который предварительно располагался равномерным слоем в картонном каркасе по периметру образца и инициировался «пауком», состоящим из шести отрезков детонирующего шнура. Действие комбинированного заряда осуществлялось совместным подрывом гексопласта и аммонита при обработке стального цилиндра (рис. 3, в). В этом случае на цилиндрическую поверхность образца последовательно наносились слои мощного ВВ I и низко детонирующего заряда. Детонационная волна в двухслойном заряде возбуждалась инициированием мощного состава ВВ, прилегающего непосредственно к металлической поверхности.

С учетом уравнения состояния материала и используемых типов ВВ в зависимости от угла падения детонационного фронта [5] по отношению к преграде реализованы:

- 1) упрочнение гексопластом с начальной плотностью $\rho_0 = 1,65 \text{ г/см}^3$, угол падения детонационного фронта β близок к 90° , $p_n = 300 \text{ кбар}$;
- 2) упрочнение аммонитом, $\rho_0 = 1,0 \text{ г/см}^3$, $\beta = 90^\circ$, $p_n = 65 \text{ кбар}$;
- 3) упрочнение комбинированным составом ВВ, давление основного заряда 174 кбар при $\beta = 40^\circ$.

На рис. 4, а приведена макрофотография образца Ст.35, обработанного только зарядом гексопласта. Поверхность образца покрыта сетью развитой трещиноватости с преобладающим радиальным направлением, интенсивность раскрытия которых возрастает от центра к периферии. После повторного нагружения этого же образца «слабым» составом ВВ (рис. 4, б) трещиноватость оказалась гораздо менее выраженной, сократившись более чем наполовину, что наглядно продемонстрировало эффект «залечивания» трещин. Для сравнения идентичный образец подвергался также обработке комбинированным зарядом, скомпонованным из слоев гексопласта и аммонита, аналогичных тем, которые перед этим применялись порознь. Совместное действие зарядов полностью предотвратило

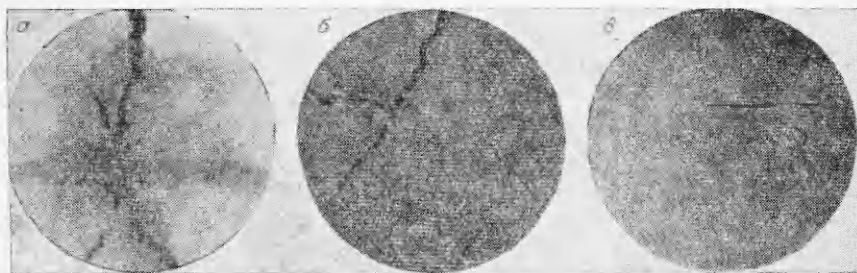


Рис. 4. Фотографии образцов с результатами действия взрыва.

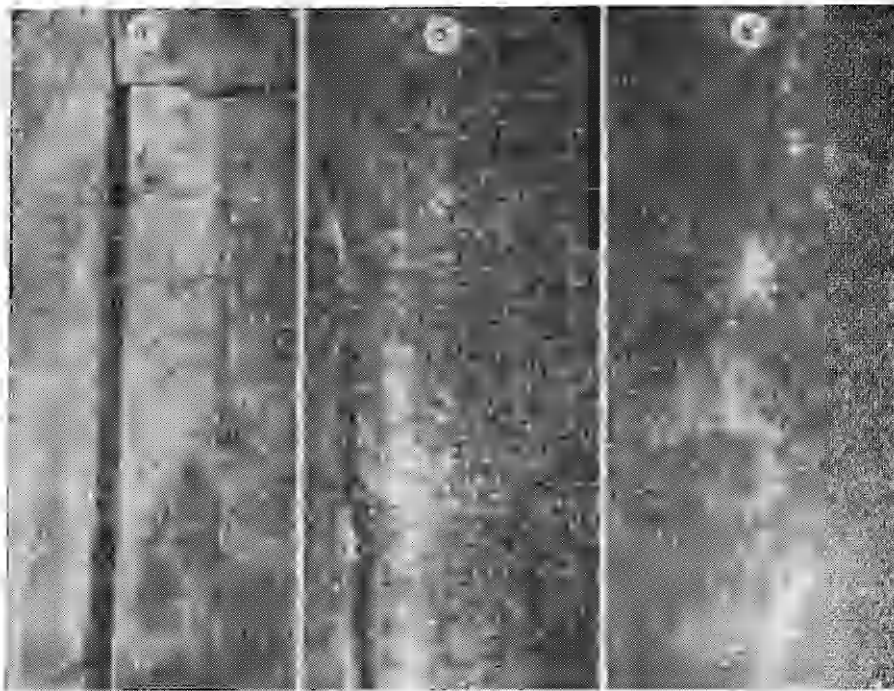


Рис. 5. Вид цилиндрических поверхностей после обработки гексопластом (а), аммонитом (б) и двухслойным зарядом ВВ (в).

наличие микро- и макронарушений материала в упрочненном образце (рис. 4, в). Этот результат не согласуется с рассмотрением дополнительного слоя ВВ как активной «забивки», позволяющей управлять полем динамических напряжений в образце. Тенденция к «залечиванию» разрывов наглядно иллюстрируется также при сравнении двух магистральных трещин вдоль образующих цилиндра (рис. 5, а, б).

Таким образом, предполагаемый механизм действия комбинированных зарядов ВВ, используемых при упрочнении металлов, нашел определенное подтверждение в описанных выше опытах.

*Поступила в редакцию 15/IX 1978,
после доработки — 6/IV 1979*

ЛИТЕРАТУРА

1. Физика взрыва. Под ред. К. П. Станюковича. М., Наука, 1975.
2. М. Ф. Друкованный, Е. А. Семенюк и др. ФТПРПИ, 1973, 5.
3. А. А. Дерибас. Физика упрочнения и сварки взрывом. Новосибирск, Наука, 1972.
4. Дж. Ф. Нотт. Основы механики разрушения. М., Металлургия, 1978.
5. Р. П. Дядык, Л. В. Грязнова. ФГВ, 1974, 10, 1.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ВВ В ПЛОТНЫХ СРЕДАХ

*Г. М. Ляхов, В. А. Коваленко, Е. А. Коваленко
(Москва)*

В настоящее время применяется большое количество промышленных ВВ с различными физико-механическими характеристиками. Изыскание путей повышения эффективности взрыва существующих ВВ и определение характеристик новых, более рациональных ВВ, должно