

УДК 621.43.056; 629.7.036.5-67:624.131.34

# ВЛИЯНИЕ ПРОЧНОСТИ КОРПУСА ЗАРЯДА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ ТВЕРДОТОПЛИВНЫХ ПУЛЬСИРУЮЩИХ ВЗРЫВНЫХ УСТРОЙСТВ

В. О. Соловьёв, Н. М. Овчинников, М. С. Кельнер

Институт машиноведения им. А. А. Благоднарова РАН, 101000 Москва, solovievo@yandex.ru

Приведен анализ результатов экспериментального исследования влияния прочности тонкостенного корпуса для заряда тэна на эффективность работы малогабаритных пульсирующих взрывных устройств различного целевого назначения.

Ключевые слова: твердотопливные пульсирующие взрывные устройства, прочностные свойства корпуса заряда ВВ, специальные электродетонаторы.

DOI 10.15372/FGV20200513

Твердотопливные пульсирующие взрывные устройства — класс машин, включающих в себя автоматическую систему подачи и инициирования зарядов взрывчатого вещества (ВВ) и совершающих полезную работу серий последовательных взрывов. К таким машинам относятся, например: устройства для обработки материалов или получения материалов с новыми физико-механическими свойствами; устройства и комплексы для взрывобурения горных пород различной прочности; детонационные ракетные двигатели различного целевого назначения (ТДРД); ударно-волновые и акустические генераторы для воздействия на биообъекты.

В работе [1] предложена концепция защиты стальных отражателей, одного из основных элементов пульсирующих взрывных устройств, от разрушающего воздействия продуктов взрыва (ПВ) энергоаккумулирующими материалами и приведены результаты экспериментальных исследований. В экспериментах использовались цилиндрические заряды (диаметр заряда равен их высоте) массой 6, 12 и 18 г с плотностью заряжания ВВ  $10^3$  кг/м<sup>3</sup>. Заряды оснащали скальным аммонитом № 3, тротилом, гексогеном и формовали в тонкостенных оболочках из алюминиевой фольги для уменьшения влияния корпуса заряда ВВ на расширение ПВ на поверхности отражателя.

Массу заряда ВВ выбирали исходя из условия минимизации потерь энергии ПВ при

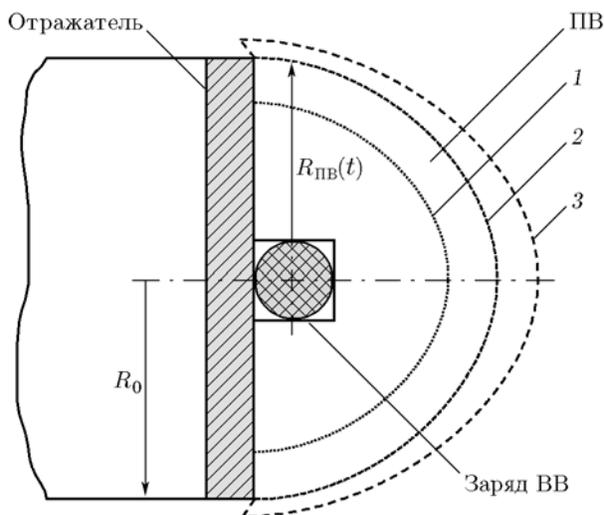


Рис. 1. Различные схемы расширения ПВ на поверхности плоского отражателя ТДРД:

1 — режим недорасширения ПВ, 2 — режим рационального расширения ПВ, 3 — режим перерасширения ПВ

работе ТДРД (рис. 1). Основным условием, обеспечивающим рациональную силу тяги (удельный импульс силы тяги), является выполнение соотношения  $R_0 \approx R_{ПВ \max}$  (см. рис. 1, область 2), где  $R_0$  — радиус отражателя ТДРД, мм;  $R_{ПВ}(t)$  — радиус расширения ПВ на поверхности отражателя, мм.

При условии недорасширения ПВ на поверхности плоского отражателя  $R_{ПВ}(t) < R_0$  (область 1 на рис. 1) сила тяги ТДРД становится меньше расчетного значения, а при перерасширении ПВ  $R_{ПВ}(t) > R_0$  (область 3 на

рис. 1) возникает дополнительная потеря энергии, расходуемой на избыточный нагрев окружающей среды и на дополнительное сопротивление изделия из-за перерасширения ПВ за границы отражателя, что следует из формулы

$$F(t) = \pi R_{\text{ПВ}}^2(t)p(t) = \pi R_{\text{ПВ}}^2(t)C_x \rho W^2/2, \quad (1)$$

где  $F(t)$  — сила тяги ТДРД, пропорциональная сопротивлению при движении изделия, Н;  $p(t)$  — давление ПВ, Н/м<sup>2</sup>;  $C_x$  — коэффициент сопротивления;  $\rho$  — плотность окружающей среды, кг/м<sup>3</sup>;  $W$  — скорость движения изделия, м/с.

Нижний порог массы используемых безоболочечных зарядов ограничен критическим диаметром ВВ. Авторами статьи [1] предложен вариант оболочечного заряда ВВ малой массы, оболочка которого не только защищает от внешних повреждений, но и играет роль отражателя, обеспечивающего эффективный процесс детонации ВВ в зависимости от решаемых устройством задач (метание или разрушение пород).

Известны работы, проведенные в России и за рубежом, по изучению деформации и разрушения металлических оболочек, оснащенных зарядами ВВ [2, 3].

Следует отметить, что несущая способность корпусов зарядов ВВ зависит не только от геометрических характеристик самих корпусов (диаметра, высоты и толщины) и мощности заряда, но и от прочностных свойств конструкционных материалов, используемых для их изготовления.

Цель настоящей работы заключалась в исследовании влияния прочностных свойств корпусов зарядов ВВ на воспрепятствование боковому разлету и формирование оптимального потока ПВ, воздействующего на поверхность мишени.

Новизна исследований заключается в использовании корпусов с каналом скачкообразно изменяющегося диаметра, оснащаемых тэном массой менее 0.5 г. Конструкция корпуса одновременно играет роль отражателя, формирующего процесс детонации в канале.

Исследовался высокобезопасный специальный электрический детонатор (СЭД) [4], предназначенный для подрыва промышленных ВВ. Модификации СЭД диаметром 8 мм имели длину 15 ÷ 30 мм и минимальную энергию подрыва 0.5 Дж.

Были проведены эксперименты по выявлению влияния прочности конструкционных материалов корпусов, изготовленных из сталей марок Ст3, сталь 20, сталь 45, 30ХГСА, 30ХГСА (закаленная), 65Г, 65Г (закаленная) и бронзы марки БрОЦ4-3, на эффективность работы оболочечных зарядов ВВ массой 0.33 г.

Ввиду значительного разброса справочных данных по прочностным характеристикам материалов прутков [5], из которых изготавливались корпуса зарядов, для уточнения прочностных характеристик были проведены испытания по ГОСТ 1497-84 на сервогидравлической машине фирмы «Shimadzu». Нагружение осуществлялось с постоянной скоростью перемещения активного захвата, равной 0.02 мм/с.

Определяли следующие прочностные характеристики образцов:  $\sigma_{\text{пц}}$  — предел пропорциональности, МПа;  $\sigma_{0.2}$  — предел текучести условный, МПа;  $\sigma_{\text{ТВ}}$  — верхний предел текучести, МПа;  $\sigma_{\text{T}}$  — нижний предел текучести, МПа;  $\sigma_{\text{в}}$  — временное сопротивление растяжению, МПа;  $\sigma_{\text{от}}$  — сопротивление отрыву, МПа;  $\delta$  — относительное удлинение образца, %;  $\psi$  — относительное сужение образца, %;  $\varepsilon$  — деформация образца, %;  $\varepsilon_{\text{пц}}$  — деформация образца на пределе пропорциональности, %;  $\varepsilon_{0.2}$  — деформация образца на пределе текучести (условном), %;  $\varepsilon_{\text{ТВ}}$  — деформация образца на верхнем пределе текучести, %;  $\varepsilon_{\text{T}}$  — деформация образца на нижнем пределе текучести, %;  $\varepsilon_{\text{в}}$  — деформация образца при временном сопротивлении, %;  $\varepsilon_{\text{от}}$  — деформация образца при сопротивлении отрыву, %.

Проведенный авторами сравнительный анализ показал, что среди всех прочностных характеристик металлов только временное сопротивление растяжению  $\sigma_{\text{в}}$  наиболее адекватно отображает влияние материала корпуса на объем и форму образуемых в свинцовых мишенях полостей при детонации заряда ВВ (табл. 1).

Из справочных материалов следует, что при нагреве используемых нами металлов всего лишь до 500 °С их прочностные свойства падают в 2 ÷ 3 раза [5]. В исследуемых нами процессах образцы подвергались нагреву ударной волной и продуктами детонации до более высоких температур.

В отличие от работ [2, 3], нас интересовало влияние материала корпуса на развитие детонации тэна массой менее 0.5 г. Корпуса зарядов ВВ имели толщину до 3 мм с каналом скачко-

Таблица 1  
Временное сопротивление растяжению  $\sigma_v$ ,  
полученное при испытаниях по ГОСТ 1497-84

Материал	$\sigma_v$ , МПа
Ст3	447.7
Сталь 20	518.7
Бронза БрОЦ4-3	520.0
Сталь 45	722.3
Сталь 65Г	730.0
Сталь 30ХГСА	762.0
Сталь 65Г (закаленная)	1 155.7
Сталь 30ХГСА (закаленная)	2 058.3

образно изменяющегося диаметра от 1 до 6 мм, инициируемых электропроводным пленочным мостиком.

Для понимания развития детонации в каналах малого диаметра при электрическом инициировании тэна пленочным мостиком [4] были проведены оценочные эксперименты на одноканальных образцах с наружным диаметром 8 мм и длиной 30 мм, с диаметром канала 3.2 мм и длиной канала 25 мм, оснащенных тэном массой 0.24 г с плотностью заряжения 1 200 кг/м<sup>3</sup>. Характерный вид разрушенного образца испытываемой конструкции из стали 45 представлен на рис. 2. Образующуюся при детонации внутреннюю полость образца можно условно разделить на три характерные зоны А, Б и В, которые имеют вид двух сопряженных геометрических фигур: зона Б — бочкообразной формы, зона В — в виде усеченного конуса. Видно, что раздутие канала происходило по-разному. Так, в начале зоны Б диаметр увеличился в 1.8 раза, в середине зоны Б — в

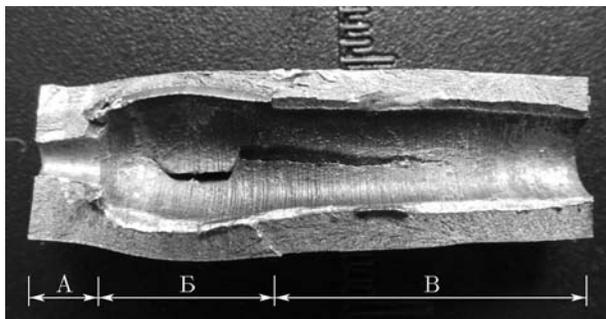


Рис. 2. Вид одноканального образца после взрыва

2 раза, в начале зоны В — в 1.5 раза, в конце зоны В (на выходе) — в 1.4 раза.

Зона А первоначально имела цилиндрическую форму диаметром 1 мм и предназначалась для подведения электрических проводов с пленочным электропроводным мостиком к заряду тэна, инициируемого взрывной машинкой ПИВ-100М.

Образующиеся после детонации полости конусообразной формы свидетельствуют о том, что процесс развивался в режиме нестационарной детонации.

Наличие режима нестационарной детонации косвенно подтверждается и другой серией экспериментов, проведенных на СЭД (корпус из стали 45) диаметром 8 мм, длиной 25 мм, оснащенный тэном массой 0.4 г с плотностью заряжения  $1.3 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>. СЭД устанавливался плоским открытым торцом на свинцовую пластину (рис. 3,а). Использовалась высокоскоростная покадровая съемка на цветную пленку в затемненном помещении с последующей спектральной обработкой. Из рис. 3,б видно, что преобладающими цветами различных зон являются синий и красный. Наблюдаемые цветовые зоны относятся к области расширения ПВ. Температуру в различных зонах определяли в соответствии с законом смещения Вина по формуле

$$\lambda = b/T, \quad (2)$$

где  $\lambda$  — длина волны излучения максимальной интенсивности,  $T$  — температура, коэффициент  $b = 0.002898$  м · К. Результаты вычислений представлены в табл. 2. Характерные температуры для нормального режима детонации тэна, приведенные в работах [6–8], лежат в диапазоне 3 400 ÷ 4 400 К. Наблюдаемые на рис. 3,б цветовые температурные зоны свидетельствуют о режиме пересжатой детонации.

Были проведены также эксперименты по пробиванию свинцовых пластин толщиной 5 мм по ГОСТ 3778-77 СЭД с корпусами, изготовленными из Ст3 и стали 65Г (закаленная) (рис. 4). Из рис. 4 видно, что размеры и характер пробития свинцовых пластин различны. Корпуса, выполненные из Ст3, обеспечивали продуктам взрыва большее расширение, чем корпуса из стали 65Г (закаленная), что привело к увеличению площади воздействия ПВ с меньшей плотностью энергии и давлением на свинцовую пластину, а это, в свою очередь, привело не только к увеличению диаметра

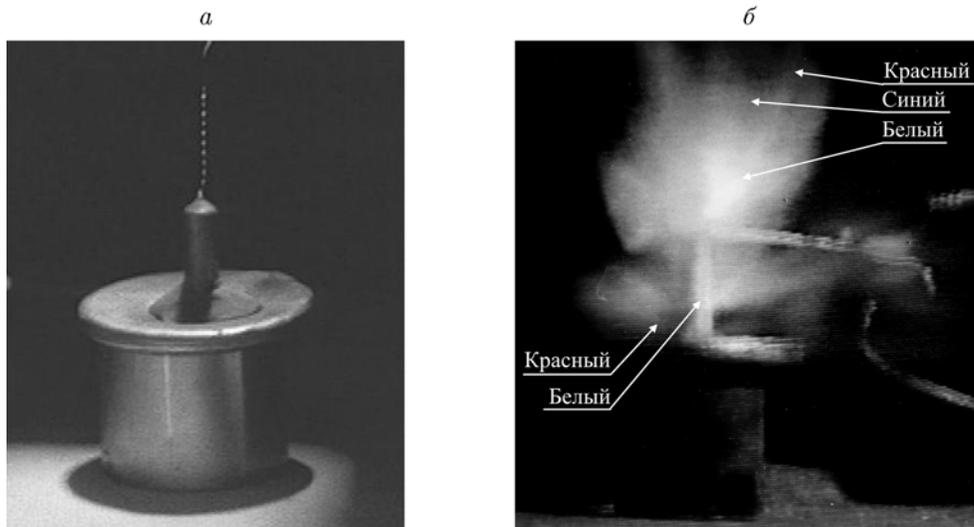


Рис. 3. Испытания СЭД:  
*а* — СЭД перед испытаниями, *б* — СЭД в процессе работы

ра пробитого отверстия до 22 мм, но и к деформации растяжения (за счет малой прочности Ст3), а также к формированию высокоплотного узконаправленного потока истекающих ПВ и пробитию отверстия диаметром 12 мм за счет

большой прочности стали 65Г (закаленная).

Проведенные эксперименты показали, что не только конструкция, но и материал корпуса СЭД позволяет варьировать режим детонации от нормальной до пересжатой и форму струи истекающих ПВ в зависимости от решаемых задач.

В дальнейшем для количественной оценки эффективности влияния материала корпуса заряда были проведены эксперименты на стенде, который представлял собой массивную стальную плиту (подложку), на которую уста-

Таблица 2  
 Температуры, рассчитанные по формуле Вина

Цвет	$\lambda$ , нм	$T$ , К
Красный	800 ÷ 650	3 623 ÷ 4 458
Синий	450 ÷ 440	6 440 ÷ 6 586

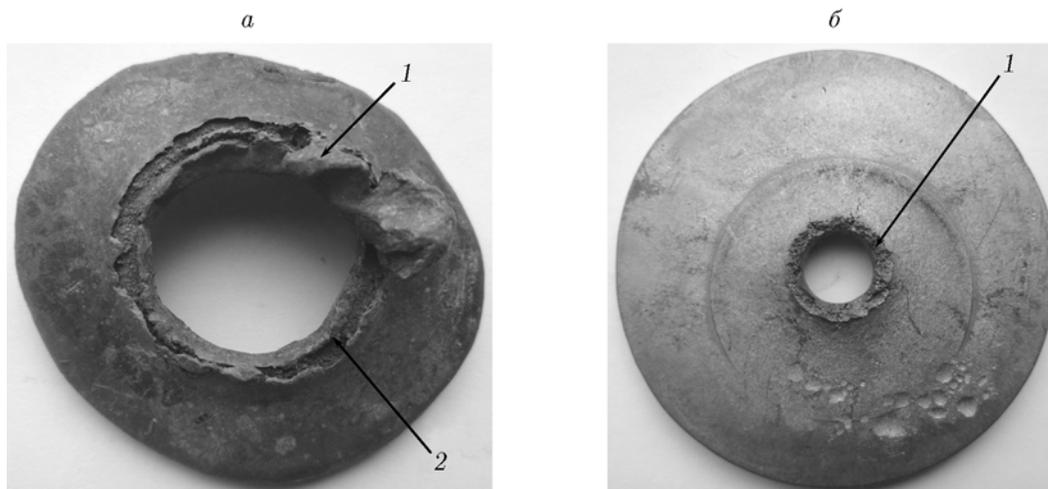


Рис. 4. Характерные пробития свинцовых пластин со стороны, обратной воздействию ПВ СЭД:  
*а* — корпус СЭД из Ст3: 1 — зона растяжения, 2 — зона частичного откола; *б* — корпус СЭД из стали 65Г (закаленная): 1 — зона сплошного откола

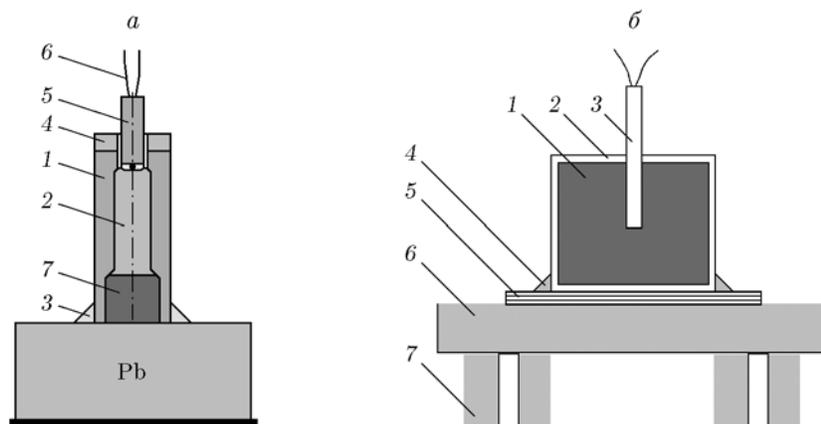


Рис. 5. Стенды для изучения расширения ПВ на поверхности отражателей:

*a* — для зарядов ВВ, размещенных в жестких корпусах: 1 — жесткий корпус-отражатель СЭД, 2 — инициирующий заряд ВВ, 3 — пластилин, 4 — герметизирующая пробка, 5 — изолятор, 6 — электрические провода, 7 — основной заряд ВВ; *б* — для бескорпусных зарядов ВВ, используемых в работе [1]: 1 — заряд ВВ, 2 — корпус из алюминиевой фольги, 3 — электрический детонатор ЭД-202, 4 — пластилин, 5 — сборка из тонких свинцовых пластин, 6 — отражатель стальной, 7 — стол

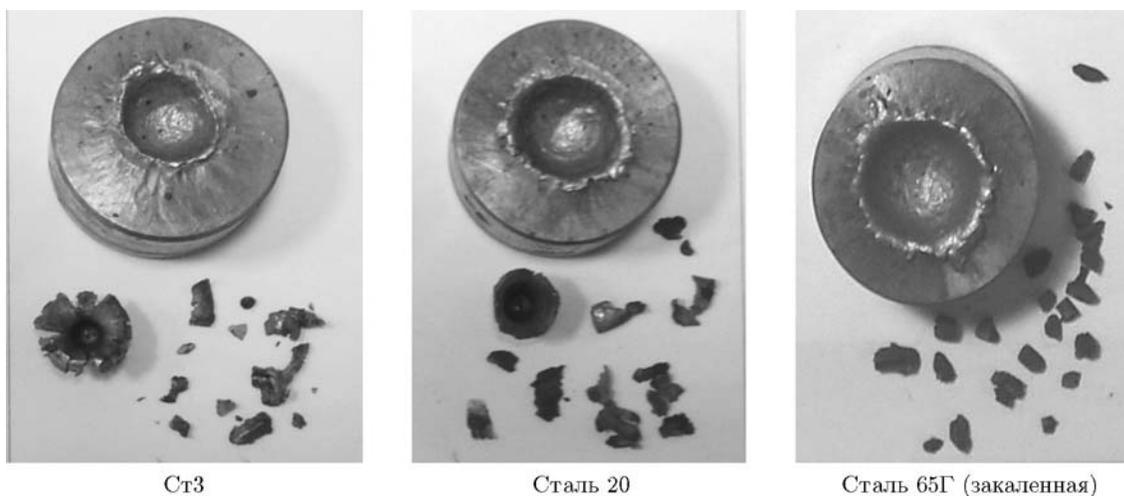


Рис. 6. Характерный вид полостей, образующихся в свинцовых цилиндрах после инициирования СЭД, корпуса которых изготовлены из различных металлов, и их разрушенные фрагменты

навливалась свинцовая мишень в форме цилиндра диаметром 40 мм и высотой 20 мм. На мишень открытым плоским торцом крепился СЭД, инициируемый взрывной машинкой ПИВ-100М (рис. 5, *a*).

Следует отметить, что форма зарядов СЭД (рис. 5, *a*) аналогична форме зарядов, применяемых в работе [1] (см. рис. 5, *б*), т. е. диаметр основного заряда равен его высоте. СЭД диаметром 8 мм и высотой 20 мм оснащался тэном массой 0.33 г с плотностью заряжания  $1.3 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ .

Характерный вид полостей, образующихся в свинцовых цилиндрах в результате воздей-

ствия ПВ СЭД, а также фрагменты корпусов детонаторов после их срабатывания показаны на рис. 6. Вид фрагментов разрушенных корпусов зарядов позволяет заключить, что формирование режимов детонации в корпусах из различных конструкционных материалов протекало по-разному. Так, фрагмент донной части корпуса из Ст3 довольно хорошо сохранился, лишь раскрывшись лепестками, на осколки распалась более тонкая выходная часть корпуса, что свидетельствует о формировании нормальной детонации.

Донная часть корпуса из стали 20 была раздута и оторвана целиком, а стенки цилин-

дрических каналов превратились в осколки, что свидетельствует о более быстром формировании режима детонации с большими плотностью энергии и давлением, чем при использовании зарядов в корпусе из Ст3.

Корпус из стали 65Г (закаленная), предел текучести которой близок к пределу прочности, разрушился полностью на мелкие осколки, что, по нашему мнению, свидетельствует о более быстром формировании режима детонации с более высоким давлением и с меньшими потерями рассеиваемой энергии, т. е. о более эффективном процессе.

О росте эффективности зарядов ВВ по мере роста значения  $\sigma_B$  для стальных корпусов зарядов свидетельствуют и размеры полостей, образующихся в свинцовых цилиндрах (см. рис. 6) под действием ПВ СЭД. Анализ полученных результатов показал, что после подрыва СЭД на контактной поверхности свинцовых цилиндров ПВ образуют полости, имеющие форму шарового или эллиптического сегмента.

Результаты экспериментов представлены на рис. 7, 8.

На рис. 7 максимум соотношения  $d/h$  для бронзы марки БрОЦ4-3 соответствует  $\sigma_B = 520$  МПа. Видно, что при  $\sigma_B \approx 520$  МПа наблюдается разрыв функции  $d/h = f(\sigma_B)$ , где  $d$  — диаметр полости, мм;  $h$  — глубина полости, мм;  $\sigma_B$  — временное сопротивление материала корпуса СЭД, МПа. Представленная на рис. 7 зависимость для материала корпуса СЭД с сопротивлением  $\sigma_B \leq 520$  МПа выражается соот-

ношением

$$d/h = 0.225\sigma_B^{0.435} \quad (3)$$

при достоверности аппроксимации  $R^2 = 0.997$ . Аналогичная зависимость для материалов с  $\sigma_B \geq 520$  МПа имеет вид

$$d/h = 4.306\sigma_B^{-0.036} \quad (4)$$

при  $R^2 = 0.957$ .

Наблюдаемый на рис. 7 разрыв функции можно представить как два локальных максимума для материалов с сопротивлением  $\sigma_B$  больше или меньше 520 МПа. Правая и левая ветви кривой являются областями компромиссов противоречивого влияния двух факторов, характеризующих параметр  $d/h$ , т. е. детонации и временного сопротивления растяжению  $\sigma_B$ . В связи с этим получаемые значения  $d/h$  могут быть практически одинаковыми при различных абсолютных значениях  $d$  и  $h$ . В нашем случае для стали 20  $\sigma_B = 518.7$  МПа,  $d/h = 3.40$  при  $d = 15.3$  мм и  $h = 4.5$  мм, а для стали 45  $\sigma_B = 722.3$  МПа,  $d/h = 3.41$  при  $d = 15.7$  мм и  $h = 4.6$  мм.

Образующиеся полости при их геометрическом подобии имеют разный объем. Увеличение объема полости свидетельствует о более высоком КПД при разрушении свинца (см. рис. 8). Так, для стали 20 по сравнению со Ст3 КПД выше на 8 %, для БрОЦ4-3 по сравнению со Ст3 — на 9 %, для пары сталь 45 — сталь 20 на 16 %, сталь 45 — Ст3 на 25 %, сталь 30ХГСА (закаленная) — сталь 20 на

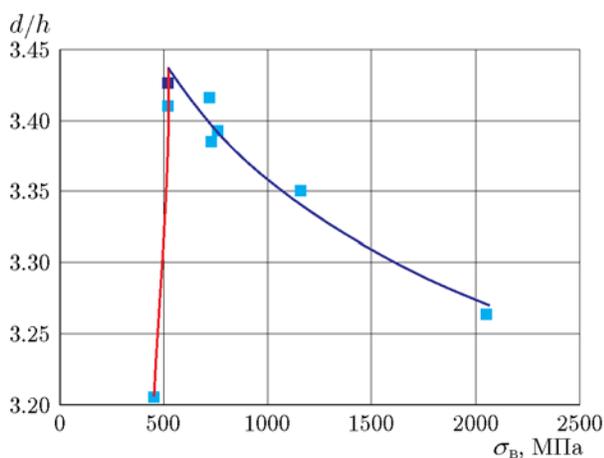


Рис. 7. Зависимость параметра  $d/h$  от временного сопротивления на растяжение материала корпуса СЭД

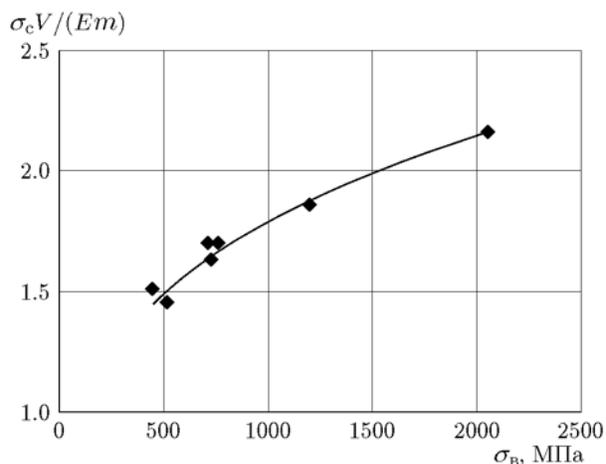


Рис. 8. Зависимость параметра  $\sigma_c V / (Em)$  от временного сопротивления на растяжение материала корпуса СЭД

41 %, сталь 30ХГСА (закаленная) — Ст3 на 50 %.

На рис. 8 приведена зависимость параметра  $\sigma_c V / (Em)$  от временного сопротивления  $\sigma_v$  материала корпуса СЭД, где  $\sigma_c$  — предел прочности на сжатие для свинца, МПа;  $V$  — объем полости в свинцовом цилиндре, м<sup>3</sup>;  $E$  — теплота взрыва тэна, Дж/кг;  $m$  — масса тэна, кг. Данная зависимость показывает, что с увеличением временного сопротивления материала корпуса заряда ВВ возрастает эффективность (КПД) деформации (разрушения) нагружаемого продуктами взрыва материала, которую можно выразить степенной зависимостью

$$\sigma_c V / (Em) = 0.29 \sigma_v^{0.263} \quad (5)$$

при  $R^2 = 0.951$ .

Полученные в статье результаты доказывают целесообразность использования конструкционных материалов с различным временным сопротивлением при проектировании корпусов зарядов для пульсирующих взрывных устройств различного целевого назначения:

— с  $\sigma_v < 520$  МПа для изделий фугасного действия, оснащенных многоразовыми отражателями, например для ТДРД;

— с  $\sigma_v > 520$  МПа для изделий бризантного действия, оснащенных одноразовыми отражателями и кассетами, например для взрыво-реактивных установок, предназначенных для разрушения горных пород [9].

При увеличении временного сопротивления материала корпуса заряда ВВ в 4.6 раза (от  $\sigma_v = 447.7$  МПа для Ст3 до  $\sigma_v = 2058$  МПа для стали 30ХГСА (закаленная)) КПД разрушения нагружаемого образца (бризантность по свинцу от воздействия ПВ сосредоточенного заряда) возрастает в 1.5 раза, что свидетельствует о важности выбора материала корпусов для разрабатываемых зарядов различного целевого назначения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Соловьев В. О., Кельнер М. С. Защита стальных отражателей от разрушающего воздействия продуктов детонации, использующихся в твердотопливных пульсирующих взрывных устройствах // Проблемы машиностроения и надежности машин. — 2015. — № 1. — С. 88–93.
2. Физика взрыва: в 2 т. / под ред. Л. П. Орленко. — 3-е изд. — М.: Физматлит, 2004. — Т. 2.
3. Чжу Ц.-Ц., Ли Вэнь-Б., Ван С.-М., Ли Вэй-Б. Сохранение расширяющейся цилиндрической металлической оболочки в промежуточной фазе разрушения // Физика горения и взрыва. — 2018. — Т. 54, № 2. — С. 131–139.
4. Соловьев В. О., Думенко В. И. Электродетонатор и электровоспламенитель для него // МКИ 6 F 42 В 3/13, Пат. № 2056034, РФ, приоритет от 30.03.1992. — Оpubл. в Официальном бюл. «Изобретения. Полезные модели» № 7 от 10.03.1996 г., ФИПС РОСПАТЕНТ.
5. Марочник сталей и сплавов / под ред. А. С. Зубченко. — 2-е изд. — М.: Машиностроение, 2003.
6. Пепекин В. И., Губин С. А. Методы расчета параметров детонации взрывчатых веществ // Хим. физика. — 2003. — Т. 22, № 9. — С. 72–97.
7. Селиванов В. В., Кобылкин И. Ф., Новиков С. А. Взрывные технологии / под общей ред. В. В. Селиванова. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008.
8. Волков К. В., Даниленко В. В., Елин В. И. Синтез алмаза из углерода продуктов детонации ВВ // Физика горения и взрыва. — 1990. — Т. 26, № 3. — С. 123–125.
9. Фролов К. В., Соловьев В. О., Пацюк В. В. Об использовании взрывореактивных комплексов малого класса для разрушения горных пород и искусственных материалов // Проблемы машиностроения и надежности машин. — 2001. — № 5. — С. 3–7.

*Поступила в редакцию 29.07.2019.*

*После доработки 18.02.2020.*

*Принята к публикации 19.02.2020.*