

УДК 662.215.4;662.215.5

ВЛИЯНИЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО МЕХАНИЧЕСКОГО ПОВРЕЖДЕНИЯ И ПОРИСТОСТИ ВЗРЫВЧАТОГО ВЕЩЕСТВА НА УСЛОВИЯ ИНИЦИИРОВАНИЯ И ПАРАМЕТРЫ ВЗРЫВА ПРИ НИЗКОСКОРОСТНОМ УДАРЕ

Г. В. Белов, Ю. Б. Базаров, С. Н. Васенин, О. В. Колмаков,
Е. Н. Костюков, А. В. Кудашов, А. Н. Тюрин, А. В. Шишканов,
Н. И. Шустова

РФЯЦ, ВНИИ экспериментальной физики, 607188 Саров, G.V.Belov@ifv.vniief.ru

Представлены результаты экспериментального исследования влияния поврежденности и начальной пористости образцов флегматизированного октогена на предельные условия инициирования и параметры взрыва при воздействии стальными сферическими ударниками массой $2 \div 100$ г. Показано, что предварительное механическое повреждение образцов ВВ, так же как и снижение начальной плотности, приводит к качественно одинаковому результату — увеличению предельной скорости ударника, вызывающей инициирование взрывчатого превращения. Получены данные по структуре повреждения образцов при отсутствии инициирования и по зависимости физико-механических характеристик образцов от их плотности.

Ключевые слова: ударник, флегматизированный октоген, инициирование, взрывчатое превращение, поврежденность, пористость.

DOI 10.15372/FGV20170215

ВВЕДЕНИЕ

Реакция взрывчатого вещества (ВВ) на внешний механический импульс определяется множеством факторов, связанных с его химическим составом, физико-механическими свойствами конкретной детали, параметрами нагружающего импульса и рядом других. Прогнозирование последствий ударного воздействия на ВВ невозможно без учета всех факторов, влияющих на процесс инициирования и развития взрыва. В большинстве исследований рассматривается влияние какого-либо одного фактора (характеризующего либо свойства ВВ, либо параметр воздействующего импульса) на условия инициирования и параметры взрыва ВВ (взрывчатое превращение, детонация). В меньшей степени изучены случаи последовательного (комплексного) воздействия, когда за относительно слабым механическим или тепловым импульсом, не вызывающим взрывчатого превращения, но изменяющим характеристики ВВ (например, плотность, прочность, степень дефектности), следует повторное воздей-

ствие. Реакция ВВ в таких случаях может зависеть как от степени предварительного повреждения, так и от времени приложения повторного импульса. Например, в [1, 2] для образцов ВВ на основе ТАТБ показано, что его предварительное повреждение ударной волной интенсивностью ≈ 2.5 ГПа приводит к снижению порогового давления инициирования детонации. При этом существенную роль в увеличении чувствительности может играть возросшая дефектность кристаллов ВВ. В то же время при повторном нагружении еще находящегося в ударно-сжатом состоянии ВВ его ударно-волновая чувствительность может снижаться [3]. Описанные эффекты не имеют пока достаточно четкого количественного описания и иногда противоречивы [4]. При этом результаты относятся к одному фактору — ударно-волновому воздействию, как первичному, так и повторному. Интерес представляют и другие сочетания. Например, сначала механический удар, а затем удар компактного тела (осколка). Ранее в [5] для такой ситуации было выявлено влияние поврежденности образца ВВ на условия инициирования детонации (пороговую скорость удара) и параметры взрыва в области инициирования низкоскоростного ре-

© Белов Г. В., Базаров Ю. Б., Васенин С. Н., Колмаков О. В., Костюков Е. Н., Кудашов А. В., Тюрин А. Н., Шишканов А. В., Шустова Н. И., 2017.

жима взрывчатого превращения. В настоящей работе, которая является логическим продолжением [5], рассмотрено влияние поврежденности и начальной пористости образцов, которая также может рассматриваться как поврежденность, на предельные условия инициирования взрывчатого превращения. Такие данные необходимы для создания физических моделей инициирования и развития взрыва, практических оценок безопасности и параметров взрыва содержащих ВВ систем.

ПОСТАНОВКА ОПЫТОВ

Образцы ВВ «номинальной» плотности (цилиндры диаметром 120 мм и высотой 60 мм с пористостью $\approx 1\%$) изготавливались из флегматизированного октогена прессованием. Способ нанесения повреждений описан в работе [5]. Схема экспериментов показана на рис. 1. Образцы помещали в стальной корпус. Повреждение производилось с помощью заряда пластического ВВ. Между ВВ и образцом располагалась демпфирующая слойка из алюминиевого диска и пенопласта. В данной работе использовались образцы с той же степенью поврежденности, при которой в [5] выявлено увеличение скорости распространения низкоскоростного режима взрывчатого превращения и снижение пороговой скорости удара, вызывающей инициирование детонации. Состояние поврежденных образцов характеризуется следующими параметрами: 1) увеличение объема образца на $\approx 3 \div 4\%$; 2) количество трещин на

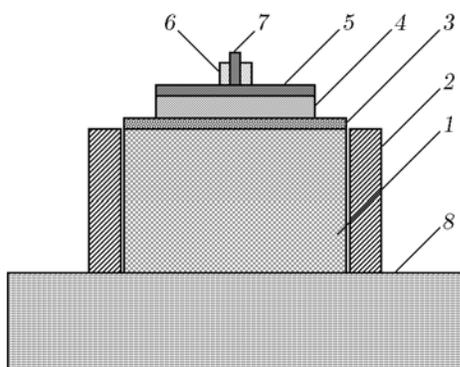


Рис. 1. Схема экспериментов по предварительному повреждению:

1 — образец, 2 — корпус, 3 — диск из пенопласта, 4 — диск из алюминия, 5 — пластическое ВВ, 6 — оправка под детонатор, 7 — детонатор, 8 — основание из дерева (4 см)

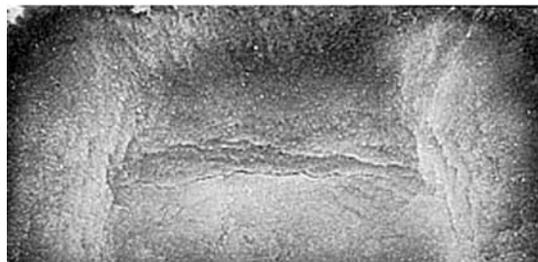


Рис. 2. Вид сечения образца в диаметральной плоскости

поверхности от 5 до 20 на 1 см^2 ; 3) снижение скорости ультразвука до $70 \div 84\%$; 4) снижение средней плотности в зоне удара на $1.3 \div 3.2\%$. При этом внутренняя структура образца ВВ после ударно-волнового воздействия достаточно сложная (рис. 2). Характерные расчетные параметры нагружающего импульса составляли: давление $\approx 0.6 \text{ ГПа}$, длительность на полувысоте $\approx 1 \text{ мкс}$. Степень поврежденности контролировалась визуально и путем измерения размеров образца до и после нагружения.

Образцы меньшей плотности (с большей пористостью) изготавливались в двух вариантах: с плотностью на $4 \div 5$ и $6 \div 7\%$ ниже «номинальной». Дополнительно было изготовлено три контрольных образца с уменьшенной на $6 \div 7\%$ плотностью для определения физико-механических свойств. Размеры образцов — $\varnothing 20 \times 30 \text{ мм}$.

Схема проведения экспериментов по определению предельных условий инициирования взрывчатого превращения представлена на рис. 3.

Нагружение образцов ВВ осуществлялось стальными сферическими ударниками диаметром 8, 14.3, 18.3 и 29 мм (масса 2, 12, 25 и 100 г соответственно). Ударники разгоняли взрывным ствольным метательным устройством. Скорость удара определялась с помощью электромагнитных датчиков МД1 и МД2, размещенных в ствольной насадке, и дополнительно контролировалась по записи видеокамеры. Предельная (минимальная) скорость удара, вызывающая инициирование взрывчатого превращения, определялась по результатам 5–6 опытов как середина диапазона между минимальной скоростью удара с инициированием взрывчатого превращения и максимальной скоростью удара без инициирования взрывчатого превращения.

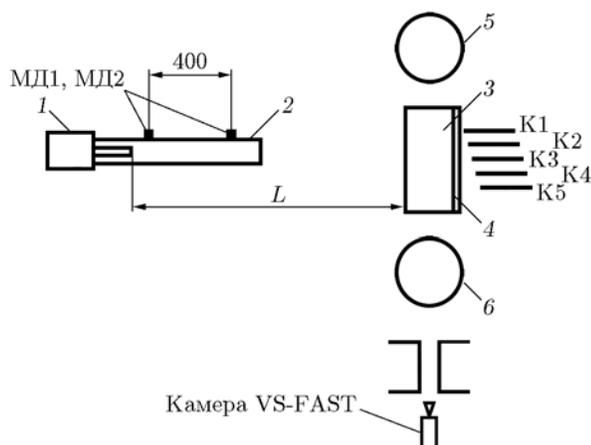


Рис. 3. Схема эксперимента:

1 — метательное устройство, 2 — ствольная насадка с датчиками МД1 и МД2 для измерения скорости ударника, 3 — образец ВВ, 4 — пластинка-индикатор, К1–К5 — игловые контактные датчики (контактный приемник), 5, 6 — импульсомеры ($d = 90$ мм, $m \approx 2.9$ кг)

Визуально взаимодействие ударника с образцом ВВ регистрировалось видеокамерой VS-FAST со скоростью съемки 1000 кадр/с.

Реакция образца определялась по параметрам движения стальной пластинки-индикатора, регистрируемым игловыми контактными датчиками К1 ÷ К5, установленными на базах 2, 7, 12, 22 и 32 мм. В случае инициирования взрыва в образце ВВ регистрировался механический импульс, который передавался незакрепленным сферическим мишеням (импульсомерам, $d = 90$ мм, $m \approx 2.9$ кг), установленным в 24 см от центра образца.

В случае отсутствия взрывчатого превращения проводилась постопытная дефектоскопия образца ВВ на месте проведения эксперимента, заключающаяся в обмере и описании повреждений. Два образца дополнительно анализировались в лабораторных условиях. Полезная информация получена также из анализа отпечатков на ударнике, оставшихся после его взаимодействия с образцом. В процессе разгона ударника на нем появлялся тонкий слой сажи от продуктов взрыва. При взаимодействии с образцом темный налет с ударника переходил на поверхность кратера, а на ударнике образовывалось чистое пятно, позволявшее определить максимальную глубину внедрения.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Результаты всех опытов с образцами «номинальной» плотности, пониженной плотности и с поврежденными образцами представлены на рис. 4 в координатах предельная скорость ударника — диаметр ударника. В качестве «погрешностей» по вертикальной оси отложен диапазон скоростей удара, показывающий результаты с инициированием взрывчатого превращения и отсутствием инициирования. Как видно из рис. 4, при снижении плотности образцов ВВ предельные скорости ударника, приводящие к инициированию взрывчатого превращения, увеличиваются во всех рассмотренных нами случаях. Аналогичный результат получен и при предварительном повреждении образца.

Повышение предельной скорости удара качественно может быть интерпретировано с позиций влияния факторов, определяющих разогрев материала при сдвиге. Согласно [6] интенсивность разогрева определяется произведением uv , где u — скорость смещения частей материала, p — давление на границе раздела. Значение p задается (ограничивается) прочностью материала, а u — остаточной скоростью ударника в момент формирования критического (по условиям инициирования) поля деформаций. С уменьшением плотности и в случае предварительного повреждения образцов их прочность заметно снижается. Поэтому для обеспечения

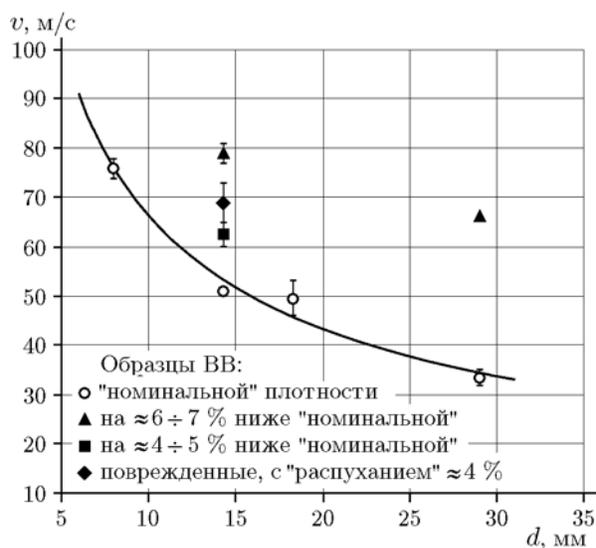


Рис. 4. Зависимость предельной скорости ударника от его диаметра и свойств образца

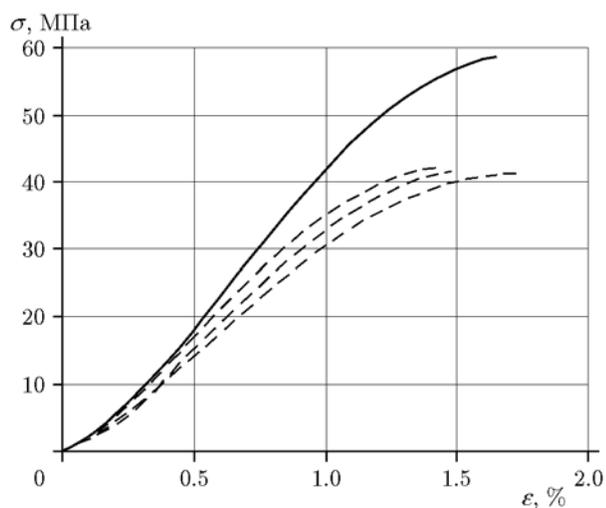


Рис. 5. Диаграмма напряжение — относительная деформация:

сплошная линия — образцы ВВ «номинальной» плотности, штриховые линии — образцы ВВ с пониженной на 6 ÷ 7 % плотностью

эквивалентной интенсивности разогрева требуется повышение скорости ударника. В качестве иллюстрации на рис. 5 представлена σ – ε -диаграмма трех контрольных образцов пониженной на 6 ÷ 7 % плотности в сравнении с образцами «номинальной» плотности.

Значения физико-механических характеристик ВВ (предела прочности и модуля упругости) при сжатии образцов пониженной плотности оказались на 30 и 20 % меньше результатов, полученных для образцов «номинальной» плотности. Значения скорости ультразвука и динамических упругих характеристик в испытанных образцах также ниже, чем в образцах ВВ «номинальной» плотности, на 1 ÷ 10 %.

Полученные в экспериментах результаты позволили выявить следующие феноменологические особенности, сопровождающие процесс внедрения ударника в образец.

До скоростей удара ≈ 63 м/с (ударник массой 100 г, образец с пониженной на 6 ÷ 7 % плотностью) в образце ВВ образуется кратер с сетью расходящихся от него радиальных трещин на поверхности (рис. 6) и конических внутри. При этом на разрезанных образцах ВВ не зафиксировано признаков образования медианной трещины по оси кратера непосредственно под его поверхностью, характерной для некоторых случаев упругопластического внедрения шара [7]. Непосредственно под по-

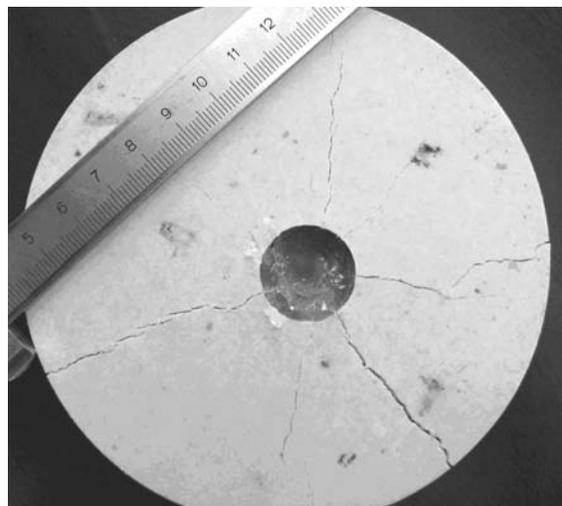


Рис. 6. Вид образца после удара со скоростью до 63 м/с

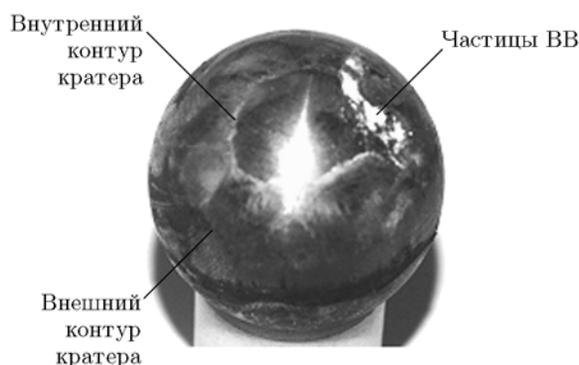


Рис. 7. Вид ударника после опыта

верхностью кратера зарегистрирована кольцевая трещина, разделяющая области материала, движущиеся в осевом и радиальном направлениях. Это проявляется в образовании двух контуров отпечатка на шаре, визуальной трещины на дне кратера и на срезе образца на уровне дна кратера (рис. 7–9). Телесный угол (по ударнику), соответствующий месту образования кольцевой трещины, составляет $48 \div 56^\circ$. При скоростях удара, близких к условиям инициирования ($66 \div 67$ м/с), вокруг кратера образуются поверхностные сколы (рис. 10). Важной деталью кратерообразования на этой стадии представляется образование «пробки» в виде усеченного конуса из материала образца, находящегося внутри кольцевой трещины, зарегистрированной и при меньших скоростях. Угол раствора конуса $\approx 35^\circ$. Вполне вероятно, что местом инициирования является граница между «пробочной» частью образ-

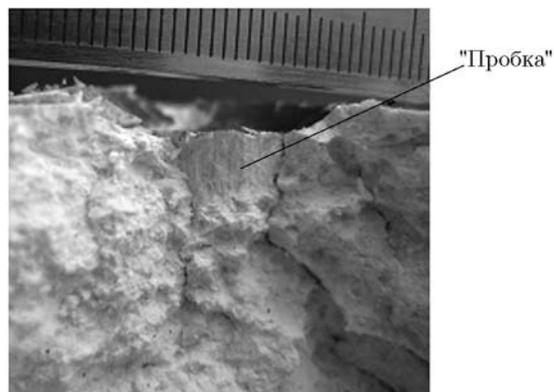


Рис. 8. «Пробка» под центральной частью ударника

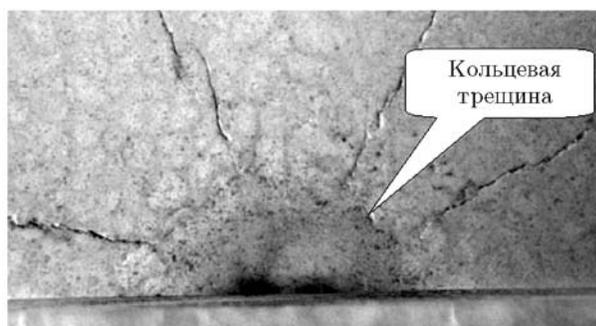


Рис. 9. Срез образца на уровне дна кратера (вид сверху)

ца, движущейся вместе с ударником, и периферийной частью, движущейся преимущественно радиально. Поверхностью раздела этих частей служит кольцевая трещина, зарождающаяся при меньших скоростях удара (см. рис. 8), при которых «пробка» еще не сформировалась. Не исключено, однако, что место инициирования может быть локализовано в части ударника между внутренним и внешним контурами отпечатка кратера, где материал образца ВВ скользит по поверхности ударника. Об этом свидетельствует наличие частиц ВВ, прилипших к поверхности шара в этом месте (см. рис. 7).

Полученные результаты по параметрам кратера, образованного ударником в образце ВВ, позволяют оценить максимальную глубину внедрения и уменьшение глубины кратера за счет упругой разгрузки. Сравнение замеренной после опытов глубины кратера с вычисленной по размерам отпечатка кратера на ударнике свидетельствует о том, что во всех опытах замеренная глубина меньше вычисленной. Это

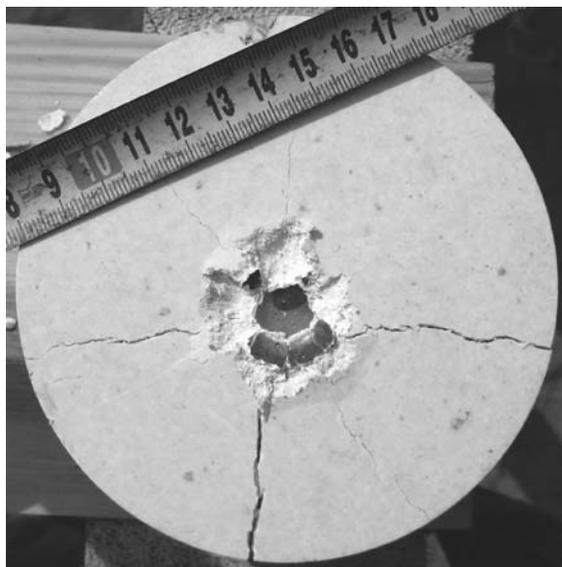


Рис. 10. Вид образца после удара со скоростью $66 \div 67$ м/с

связано с тем, что за счет упругой разгрузки глубина кратера уменьшается [8]. По полученным значениям остаточной глубины кратера и максимальной глубины внедрения может быть оценен коэффициент восстановления по зависимости [8]:

$$\frac{h_{\text{ост}}}{h_y + h_{\text{ост}}} = 1 - 1.25k^2,$$

где $h_{\text{ост}}$ — остаточная глубина кратера, h_y — уменьшение глубины кратера за счет упругой разгрузки, k — коэффициент восстановления.

В случае удара по образцам пониженной на $6 \div 7$ % плотности шариком массой 100 г со скоростью 58 и 63 м/с коэффициент восстановления составил $k = 0.37$ и 0.43 соответственно (среднее значение 0.4 ± 0.03).

Представляет интерес изменение кинематических параметров движения ударника по мере увеличения скорости удара и наступления условий инициирования взрывчатого превращения. На рис. 11 приведена зависимость отношения квадратов скоростей ударника при подлете к образцу ВВ и при отскоке от образца, т. е. отношения кинетических энергий до и после удара. Как видно из графика, до скоростей удара $v \approx 63$ м/с это отношение линейно растет с увеличением скорости. При скоростях удара, непосредственно предшествующих условиям инициирования ($v = 65 \div 66$ м/с), происходит резкий излом зависимости и отноше-

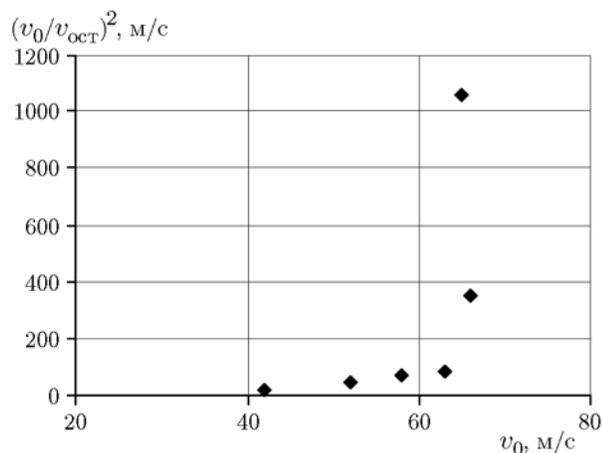


Рис. 11. Зависимость отношения квадратов скоростей ударника (до и после удара) от скорости удара

ние энергий резко возрастает, что свидетельствует о почти полном поглощении энергии ударника образцом. Это коррелирует с появлением сколов на лицевой поверхности образца.

В случае инициирования взрывчатого превращения в образцах («номинальной» плотности, пониженной плотности либо поврежденных) механический импульс взрыва составлял $0.04 \div 0.5$ от импульса, полученного в режиме детонации. При этом величина импульса растет с увеличением размера ударника. Данные по зависимости механического импульса от размера ударника для образцов «номинальной» плотности при скоростях удара, близких к предельным, представлены на рис. 12.

Аналогичная тенденция наблюдается и для скоростей пластинки-индикатора. Максимальные скорости, зарегистрированные на базе до 27 мм, составляли $0.2 \div 1$ км/с, что в $3.5 \div 18$ раз ниже полученных при детонации образца [9]. При этом реагировала лишь часть ВВ, о чем свидетельствует наличие фрагментов образца и диспергированного ВВ на поверхности окружающего оборудования. Количество остатков ВВ уменьшается с увеличением размера ударника, т. е. с увеличением размеров первичного очага реакции. Параметры взрыва образцов согласуются с выявленными в [9] закономерностями поведения ВВ в допороговой по инициированию детонации области удара.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные в работе результаты свидетельствуют о том, что предварительное меха-

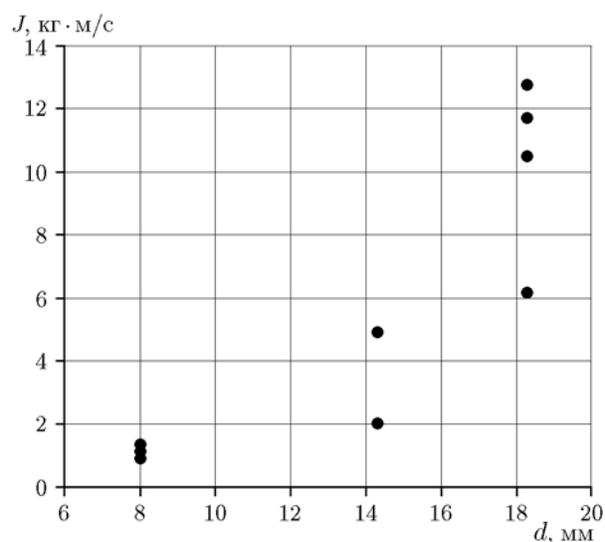


Рис. 12. Зависимость механического импульса от диаметра ударника

ническое повреждение образцов ВВ с описанными выше параметрами, так же как и снижение начальной плотности образцов, приводит к качественно одинаковому результату — увеличению предельной скорости ударника, вызывающей инициирование взрывчатого превращения, т. е. к снижению чувствительности ВВ к удару. Такой результат противоположен полученному ранее в [5] для зависимости пороговой скорости ударника от поврежденности образцов (такой же, как и в данной работе). Согласно [5] пороговая скорость удара, вызывающая инициирование детонации, для поврежденного образца меньше, чем для неповрежденного. Это различие вызвано сменой механизмов инициирования: ударно-волновой разогрев ВВ при инициировании детонации и деформационный при инициировании низкоскоростного режима взрывчатого превращения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Плаксин И. Е., Герасименко В. Ф., Шутов В. И., Герасимов В. М. О чувствительности ВВ на основе ТАТБ, поврежденного при ударно-волновых воздействиях // Новые модели и коды в физике ударных волн: сб. докл. междунар. конф. — СПб., 1994.
2. Комрачков В. А., Ковтун А. Д., Макаров Ю. М., Макаров А. Л., Панов К. Н. Метод импульсной рентгенографии в исследованиях детонации. — Саров, 2011. — (Препр. / РФЯЦ-ВНИИЭФ).

3. **Комрачков В. А., Ковтун А. Д., Макаров Ю. М.** Применение импульсной рентгенографии для исследования ударно-волнового инициирования ТАТБ // Физика горения и взрыва. — 1999. — Т. 35, № 2. — С. 96–101.
4. **Уэйрик Л. Дж.** Воздействие множественных ударов на чувствительность энергетических материалов к ударному возбуждению // Симп. по энергетическим материалам: сб. докл. — Ливермор, 1994.
5. **Белов Г. В., Базаров Ю. Б., Глушихин В. В., Дякин Е. П., Еременко А. С., Екимчев С. Н., Игошина С. Г., Костюков Е. Н., Шишканов А. В., Шустова Н. И.** О влиянии предварительного механического повреждения образцов ВВ на параметры взрывчатого превращения и величину пороговой скорости инициирования детонации при ударе осколком // 9 Харитоновские тематические научные чтения: тр. междунар. конф. — Саров, 2007. — С. 187–191.
6. **Щетинин В. Г.** Оценка разогрева твердых тел на поверхности трения // Хим. физика. — 1983. — № 5. — С. 688–692.
7. **Колесников Ю. В., Морозов Е. М.** Механика контактного разрушения. — М.: Наука, 1989. — С. 74.
8. **Клейс И. Р., Кангур Х. Ф.** Экспериментальное и расчетное определение глубины повреждения от удара сферического индентора // Трение и износ. — 1987. — Т. 8, № 4. — С. 605–613.
9. **Белов Г. В., Базаров Ю. Б., Дякин Е. П., Екимчев С. Н., Жиёмбетов А. К., Зималин В. С., Олейников И. В., Тилькунов В. А., Шишканов А. В., Шустова Н. И.** Влияние скорости удара на параметры взрыва образцов флегматизированного октогена // 11 Харитоновские тематические научные чтения: тр. междунар. конф. — Саров, 2009. — С. 51–54.

*Поступила в редакцию 24/V 2016 г.,
в окончательном варианте — 21/IX 2016 г.*
