

УДК 662.215.4; 662.215.5

Влияние предварительного механического повреждения и пористости взрывчатого вещества на условия инициирования и параметры взрыва при низкоскоростном ударе

Представлены экспериментальные результаты по влиянию поврежденности и начальной пористости образцов из флегматизированного октогена на предельные условия инициирования и параметры взрыва при воздействии стальными сферическими ударниками массой 2–100 г. Показано, что предварительное механическое повреждение образцов ВВ (взрывчатых веществ), 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 зависимости физико-механических характеристик образцов от их плотности.

**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**

Введение

Реакция 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 воздействие. 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 $\sim 2,5$ ГПа приводит к снижению порогового давления инициирования детонации. При этом существенную роль в возрастании 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 – ударно-волновому виду воздействия, 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 авторами было выявлено влияние поврежденности образца ВВ на условия инициирования детонации (пороговую скорость удара) и параметры взрыва в области инициирования низкоскоростного режима 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 $\sim 1\%$) 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.

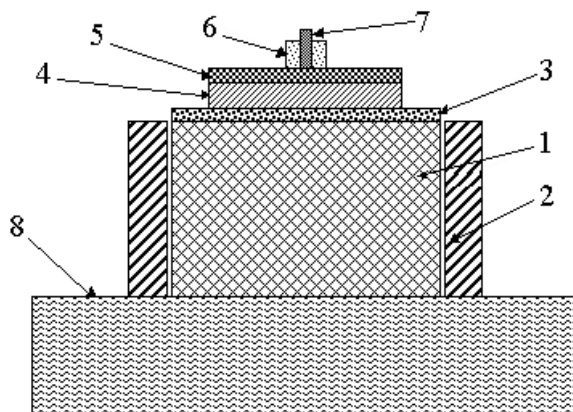


Рис. 1. Схема экспериментов по предварительному повреждению: 1 – образец; 2 – корпус; 3 – диск из пенопласта; 4 – диск из алюминия; 5 – пластическое взрывчатое вещество; 6 – оправа под детонатор; 7 – детонатор; 8 – основание из дерева (4 см)

Между ВВ и образцом располагалась демпфирующая слойка из алюминиевого диска и пенопласта. В данной работе использовались образцы с такой же степенью повреждения, при которой в [5] выявлены увеличение скорости распространения НСР ВП и снижение пороговой скорости удара, вызывающей инициирование детонации. Состояние поврежденных образцов характеризуется следующими параметрами: 1) увеличение объема образца $\sim 3-4\%$; 2) количество трещин на поверхности от 5 до 20 на см^2 ; 3) снижение скорости ультразвука до $70-84\%$; 4) снижение средней плотности в зоне удара на $1,3-3,2\%$. При этом разрушения образца ВВ имеют достаточно сложную внутреннюю структуру, представленную на рис. 2. Характерные расчетные параметры нагружающего импульса составляли: давление $\sim 0,6$ ГПа, длительность на полувывсоте ~ 1 мкс. Степень поврежденности контролировалась визуально и путем измерения размеров образца до и после нагружения.

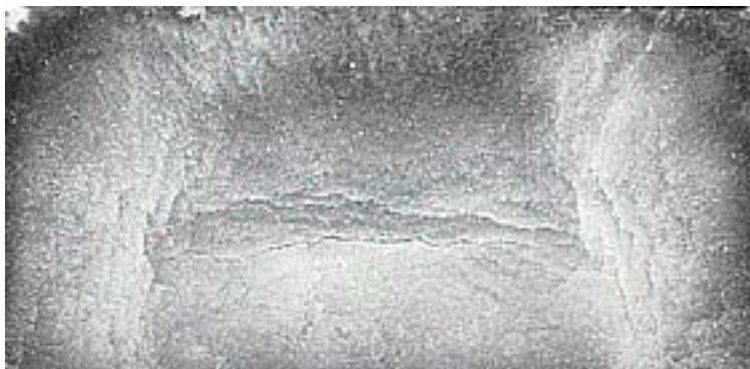


Рис. 2. Вид сечения образца в диаметральной плоскости

Образцы меньшей плотности (с большей пористостью) изготавливались в двух вариантах: с плотностью на $4-5$ и $6-7\%$ ниже номинальной. Дополнительно было изготовлено три контрольных образца с уменьшенной на $6-7\%$ плотностью для определения физико-механических свойств. Размеры этих образцов: $\varnothing 20 \times 30$ 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). Разгон ударников производился взрывным ствольным метательным устройством. Скорость удара определялась с помощью электромагнитных датчиков МД1 и МД2, которые размещались 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.

Визуально процесс взаимодействия ударника с образцом ВВ регистрировался видеокамерой VS-FAST со скоростью съемки 1000 кадров/с.

Реакция образца определялась по параметрам движения стальной пластинки-индикатора, регистрируемым игловыми контактными датчиками ($K1 \dots K5$), установленными на базах: $2, 7, 12, 22$ и 32 мм. В случаях инициирования взрыва в образце ВВ регистрировался механический импульс, переданный незакрепленным сферическим мишеням (импульсомерам, $d = 90$ мм, $m \approx 2,9$ кг), установленным в 24 см от центра образца.

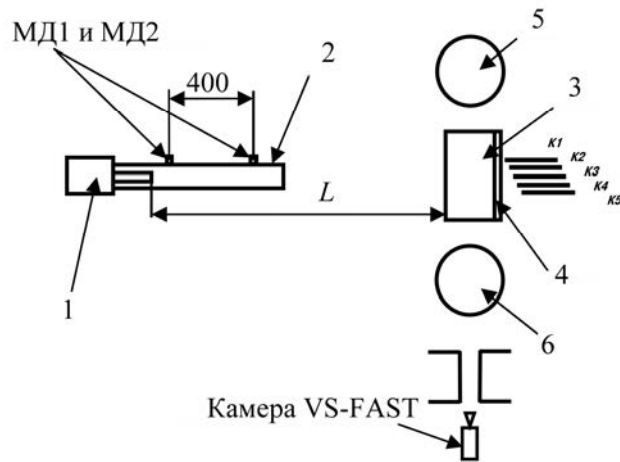


Рис. 3. Схема проведения экспериментов: 1 – метательное устройство; 2 – ствольная насадка с датчиками МД1 и МД2 для измерения скорости ударника; 3 – образец ВВ; 4 – пластинка-индикатор; К1, К2, К3, К4, К5 – игловые контактные датчики (контактный приемник); 5, 6 – импульсометры ($d = 90$ мм; $m \approx 2,9$ кг)

В случаях отсутствия взрывчатого превращения производилась 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 оставался тонкий слой из сажи от ПВ. При взаимодействии с образцом темный налет с ударника оставался на поверхности кратера, а на ударнике образовывалось чистое пятно, позволявшее определить максимальную глубину внедрения.

Результаты

Результаты всех опытов с образцами номинальной плотности, пониженной плотности и поврежденных представлены на рис. 4 в координатах: предельная скорость ударника – диаметр ударника. В качестве погрешностей по вертикальной оси отложен диапазон скоростей удара, разделяющий результаты с инициированием взрывчатого превращения и отсутствием инициирования. Как видно из графика, 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.

Качественно повышение предельной скорости удара может быть интерпретировано с позиций влияния факторов, определяющих разогрев материала при сдвиге. По [7] интенсивность разогрева определяется произведением $U \times P$, где U – скорость смещения частей материала, P – давление на границе раздела. P определяется (ограничивается) прочностью материала, а U – остаточной скоростью ударника на момент формирования критического (по условиям инициирования) поля деформаций. С понижением плотности и при предварительном повреждении образцов их прочность заметно снижается. Поэтому для обеспечения эквивалентной интенсивности разогрева требуется повышение скорости ударника. На рис. 5 представлена σ - ϵ диаграмма контрольных образцов пониженной на 6–7 % плотности в сравнении с образцами номинальной плотности.

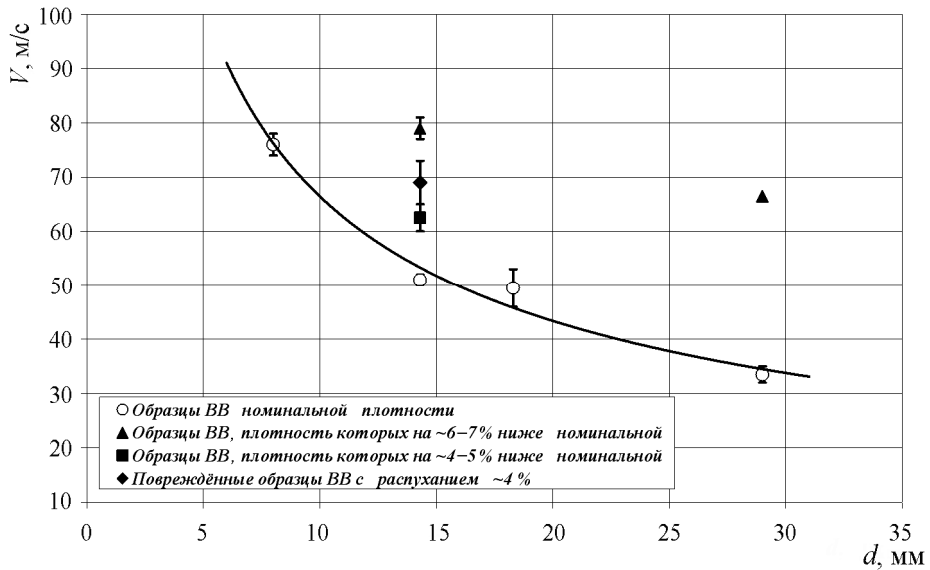


Рис. 4. Зависимость предельной скорости ударника от его диаметра и свойств образца

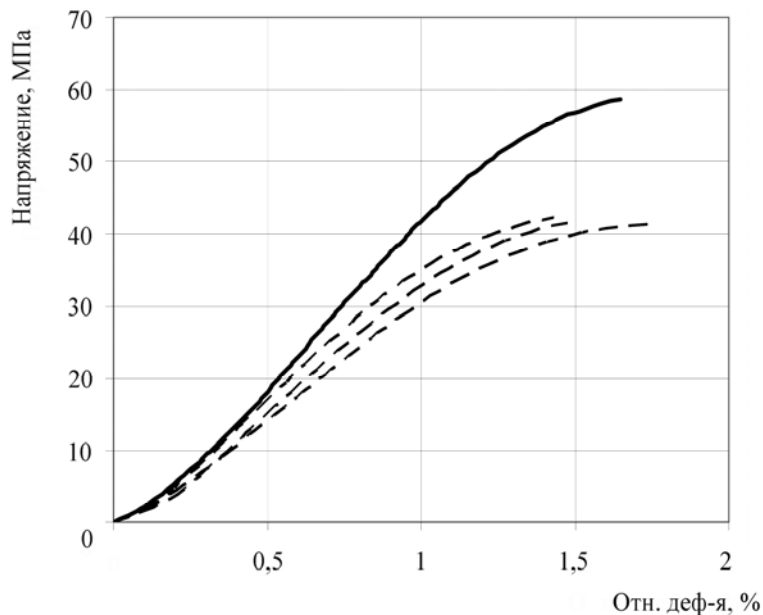


Рис. 5. σ - ϵ диаграмма: ----- – образцы ВВ с пониженной на 6–7 % плотностью; ———— – образцы ВВ номинальной плотности

Значения физико-механических характеристик (предела прочности и модуля упругости) ВВ при сжатии на образцах пониженной плотности на 30 и 20 % соответственно ниже результатов, полученных на образцах номинальной плотности. Значения скорости ультразвука и динамических упругих характеристик в испытанных образцах также ниже уровня значений, полученных для образцов ВВ номинальной плотности на 1–10 %.

Полученные в экспериментах результаты позволяют 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 [8]. Непосредственно под поверхностью кратера зарегистрировано образование кольцевой трещины, разделяющей области материала, движущиеся в осевом и радиальном направлениях. Это проявляется в образовании двух контуров отпечатка на шаре, визуальной трещины на дне кратера и срезе образца на уровне дна кратера (рис. 7–9). Телесный угол (по ударнику), соответствующий месту образования кольцевой трещины, составляет $48\text{--}56^\circ$. При скоростях удара, близких к условиям инициирования (скорости 66–67 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.

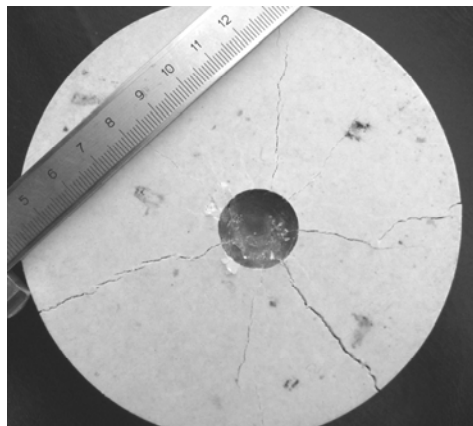


Рис. 6. Вид образца после удара



Рис. 7. Вид ударника после опыта

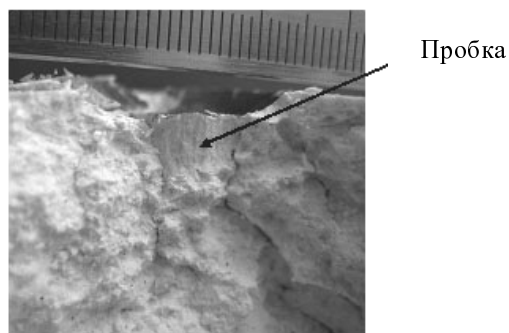


Рис. 8. Пробка под центральной частью ударника

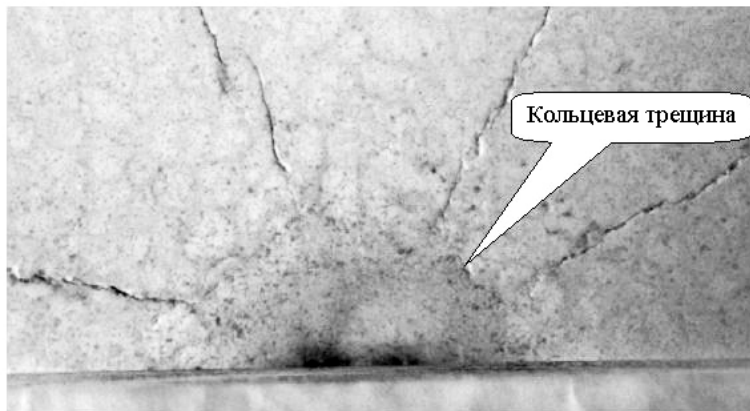


Рис. 9. Срез образца на уровне дна кратера (вид сверху)

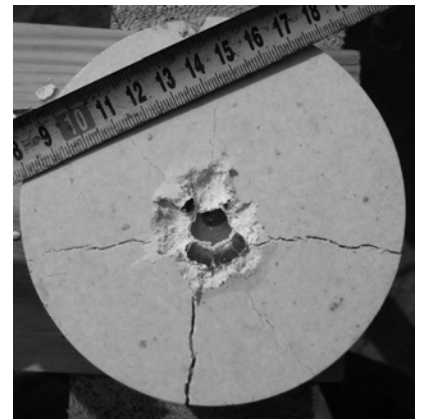


Рис. 10. Вид образца после удара

Угол раствора конуса $\sim 35^\circ$. Вполне вероятно, что местом инициирования является граница между пробочной частью образца, движущейся вместе с ударником, и периферийной частью, движущейся преимущественно радиально. Поверхностью раздела этих частей является кольцевая трещина, зарождающаяся при меньших скоростях удара (см. рис. 8), при которых формирования «пробки» еще не произошло. 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 частичек 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 связано с тем, что за счет упругой разгрузки глубина кратера уменьшается [9]. По полученным значениям остаточной глубины кратера и максимальной глубины внедрения может быть оценен коэффициент восстановления по зависимости из [9]: $h_{\text{ост}} / (h_y + h_{\text{ост}}) = 1 - 1,25k^2$, где $h_{\text{ост}}$ – остаточная глубина кратера, h_y – уменьшение глубины кратера за счет упругой разгрузки, k – коэффициент восстановления.

Для случаев удара по образцам пониженной (на 6–7 %) плотности шариком массой 100 г со скоростью 58 и 63 м/с значения коэффициента восстановления составили $k = 0,37$ и $0,43$ соответственно при среднем значении $0,4 \pm 0,03$.

Представляет интерес изменение кинематических параметров движения ударника по мере увеличения скорости удара и наступления условий инициирования взрывчатого превращения. На рис. 11 представлена зависимость отношения квадратов скоростей ударника при подлете к образцу ВВ и отскоке от образца, т. е. отношение кинетических энергий до и после удара. Как видно из графика, до скоростей удара ≈ 63 м/с это отношение линейно растет с увеличением скорости. При скоростях удара, непосредственно предшествующих условиям инициирования (65–66 м/с), происходит резкий излом зависимости, и отношение энергий резко возрастает, что свидетельствует о почти полном поглощении энергии ударника образцом. Это коррелирует с появлением сколов на лицевой поверхности образца.

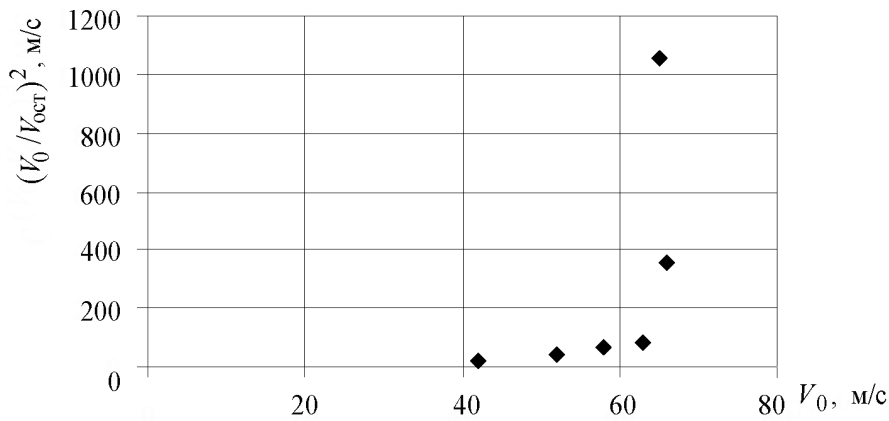


Рис. 11. Зависимость отношения квадратов скоростей ударника (до и после удара) от скорости удара

В случаях инициирования взрывчатого превращения в образцах (номинальной плотности, пониженной либо поврежденных) механический импульс взрыва составлял 0,04–0,5 от импульса, полученного для режима 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.

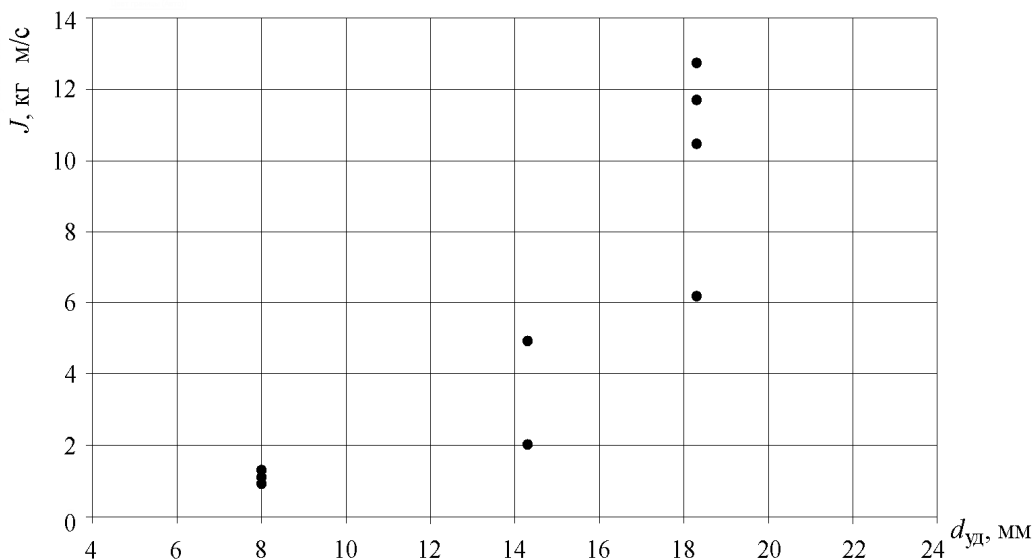


Рис. 12. Зависимость механического импульса от диаметра ударника

Аналогичная тенденция и для скоростей пластинки-индикатора. Максимальные скорости, зарегистрированные на базе до 27 мм, составляли (0,2–1) км/с, что в 3,5–18 раз ниже полученных при детонации образца [6]. При этом реагировала лишь часть ВВ, о чем свидетельствовало нали-

чие 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 [6] закономерностями поведения ВВ в допороговой по иницированию детонации области удара.

Таким образом, полученные в работе результаты свидетельствуют о том, что предварительное механическое 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 иницирование взрывчатого превращения, т. е. снижению чувствительности ВВ к удару. Такой результат противоположен результату, полученному ранее в [5] для зависимости пороговой скорости ударника от поврежденности образцов (таких же, как и в данной работе). Согласно [5], пороговая скорость удара, вызывающая иницирование детонации, для поврежденного образца меньше, чем для неповрежденного. Это различие вызвано сменой механизмов иницирования: ударно-волновой разогрев ВВ при иницировании детонации и деформационный при иницировании низкоскоростного режима взрывчатого превращения.

Список литературы

1. Плаксин И. Е., Герасименко В. Ф., Шутов В. И., Герасимов В. М. О чувствительности ВВ на основе ТАТБ, поврежденного при ударно-волновых воздействиях // Сборник докладов международной конференции «Новые модели и коды в физике ударных волн». Санкт-Петербург, 1994.
2. Комрачков В. А., Ковтун А. Д., Макаров Ю. М. и др. Метод импульсной рентгенографии в исследованиях детонации: Препринт. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2011.
3. Комрачков В. А., Ковтун А. Д., Макаров Ю. М. Применение импульсной рентгенографии для исследования ударно-волнового иницирования 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 // Сборник докладов симпозиума по энергетическим материалам. Русская версия. Т. II. Pleasanton. California, 1994.
5. Белов Г. В., Базаров Ю. Б., Глушихин В. В. и др. О влиянии предварительного механического повреждения образцов ВВ на параметры взрывчатого превращения и величину пороговой скорости иницирования детонации при ударе осколком // Труды международной конференции «9 Харитоновские тематические научные чтения». Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2007. С. 187–191.
6. Белов Г. В., Базаров Ю. Б., Дякин Е. П. и др. Влияние скорости удара на параметры взрыва образцов флегматизированного октогена // Труды международной конференции «11 Харитоновские тематические научные чтения». Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2009. С. 51–54.
7. Щетинин В. Г. Оценка разогрева твердых тел на поверхности трения // Химическая физика. 1983. № 5. С. 688–692.

8. Колесников Ю. В., Морозов Е. М. Механика контактного разрушения. М.: Наука, 1989. С. 74.
9. Клейс И. Р., Кангур Х. Ф. Экспериментальное и расчетное определение глубины повреждений от удара сферического индентора // Трение и износ. 1987. Т. 8, № 4. С. 605–613.

Influence of Preliminary Mechanical Damage and Porosity of Explosive on Initiation Conditions and Explosion Parameters at Low-speed Impact

**G. V. Belov, Yu. B. Bazarov, S. N. Vasenin, O. V. Kolmakov, E. N. Kostyukov,
A. V. Kudashov, A. N. Tyurin, A. V. Shishkanov, N. I. Shustova**

The experimental results are presented with regard to the influence of damage and initial porosity of samples made of phlegmatized HMX on the limiting conditions of initiation and the explosion parameters under the action of steel spherical impactors weighing 2 – 100 g. It was demonstrated that preliminary mechanical damage of HE samples as well as a decrease of initial density leads to identical results in a qualitative sense – to an increase of a limit velocity of impactor causing initiation of explosive transformation. The data are gained concerning a structure of damage of samples in the absence of initiation and a dependence of physical and mechanical characteristics of samples upon their density.