

УДК 622.2

ИЗУЧЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА СОСТАВНОГО СТЕРЖНЯ ГОПКИНСОНА

В. А. Пушков^{1,2}, А. Л. Михайлов^{1,2}, А. Н. Цибилов¹, А. А. Окинчиц¹,
А. В. Юрлов¹, А. М. Васильев¹, Т. Г. Найданова¹, А. В. Баканова¹

¹РФЯЦ, ВНИИ экспериментальной физики, 607190 Саров, postmaster@ifv.vniief.ru

²Саровский физико-технический институт — филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», 607190 Саров

Представлены результаты исследования динамического сжатия пластифицированного тэна методом составного стержня Гопкинсона (ССГ). Описана методика испытаний и отдельные аспекты этого метода. Кратко приведены преимущества метода ССГ по сравнению с копровыми испытаниями взрывчатых веществ. В опытах скорости деформации составили $7\,500 \div 12\,000 \text{ с}^{-1}$. Построены диаграммы усилие — деформация, усилие — смещение, оценена величина энергии, необходимая для возбуждения взрывчатого превращения. Предложено использовать данный метод как дополнительный к имеющимся методам изучения характеристик взрывчатых веществ.

Ключевые слова: взрывчатое вещество, низкоскоростное нагружение, метод составного стержня Гопкинсона, динамическое сжатие, деформирование, взрывчатое превращение.

DOI 10.15372/FGV20210113

ВВЕДЕНИЕ

Знание характеристик взрывчатых веществ (ВВ) при различных видах воздействий (механические, электрические, климатические и др.) важно как для разработки конструкций, содержащих ВВ, так и для оценки возможных аварийных ситуаций и их последствий [1]. Отдельным направлением является исследование низкоскоростного (до $\approx 100 \text{ м/с}$) механического воздействия на ВВ, соответствующего аварийным нагрузкам при перевозке, теракте и т. п. При механическом нагружении твердого ВВ и последующем его пластическом деформировании наиболее вероятным механизмом инициирования взрывчатых превращений является образование очагов реакции, вызванных сдвиговыми деформациями. При этом в процессе деформирования происходят формирование полосы сдвига и относительное скольжение материала ВВ по границе полосы, что приводит к сильному разогреву ВВ и возникновению очагов реакции взрывчатого превращения [2].

Для изучения характеристик ВВ при динамическом нагружении давно и наиболее ши-

роко применяется способ определения чувствительности различных ВВ к удару, осуществляемому на копре с массивным стальным основанием [1, 3]. Стальной груз массой 2, 5 или 10 кг падает, ударяя по прибору, состоящему из двух стальных роликов, между которыми помещается небольшая навеска испытуемого ВВ. Этот метод стандартизован, ГОСТ Р 50835-95 [3]. Современные исследования характеристик ВВ при динамическом нагружении используют широкий спектр различных методов в прикладных и научных целях. Так, например, в РФЯЦ-ВНИИЭФ исследуют воздействие на ВВ сферических осколков или стального штыря при скоростях $\approx 6 \div 60 \text{ м/с}$ [4] и, в частности, определяют динамику распространения взрывчатого превращения и его параметры. Изучают низкоскоростное воздействие на ВВ стального ударника по методу «тест Стивена» на ударных стендах типа «Ствол», применяя в опытах радиоинтерферометр и ПВДФ-датчики давления [5, 6]. В опытах определяют место и время появления очага взрывчатого превращения, а также скорость его распространения (исследования [5] выполнены при участии сотрудников лаборатории GRAMAT, Франция). Следует отметить, что скорость взрывчатого превращения при таких нагружениях, как правило, зна-

чительно ниже скорости детонационного режима. В [7] предложено ввести понятия «медленное» и «быстрое» инициирование в зависимости от скорости фронта превращения. Для изучения инициирования взрывчатого превращения в «быстром» режиме используют, в частности, рентгенографию [8] и протонографию [9].

Исследования механических воздействий на ВВ с применением, например, тестов Стивена, Сюзан и других методов проводятся и за рубежом [5, 10–12].

Разработка физических моделей и количественное описание процессов деформирования, разрушения и возбуждения взрывчатого превращения в ВВ на сегодняшний день далеко не закончены и продолжают в целях получения более полного объема данных и построения моделей.

Недостаток стандартизированной копровой системы нагружения заключается в том, что трудно выполнить расчетные оценки и провести сравнение результатов, поскольку здесь присутствуют «размытые» граничные условия, обусловленные отскоком груза. Этого недостатка лишен метод составного стержня Гопкинсона (ССГ), который применяется для изучения динамических прочностных и пластических характеристик различных конструкционных материалов, включая ВВ [13, 14]. По методу ССГ при деформировании образцов можно реализовать скорости нагружения $\approx 5 \div 50$ м/с и скорости деформаций $\dot{\epsilon} \approx 10^2 \div 10^4$ с⁻¹, характерные для аварийных ситуаций. В копровых испытаниях на чувствительность ВВ к удару по результатам серий, состоящих не менее чем из 25 опытов каждая, определяют критическую высоту падения груза, при которой происходит или не происходит взрывчатое превращение в ВВ, а также критическое давление (напряжение) разрушения и момент взрыва [1, 3]. Метод ССГ позволяет определять более широкий спектр характеристик: нагружающий импульс напряжения $\sigma_i(t)$, напряжение σ и деформация ϵ образца, импульс напряжения, прошедший в опорный стержень, оценка момента взрыва. По диаграмме σ – ϵ можно оценить характер деформирования, разрушения и энергию, потраченную на деформирование образца до начала взрывчатого превращения [2].

В настоящей статье приведены результаты исследования динамического сжатия пластифицированного тэна методом ССГ. Описа-

на методика испытаний и отдельные аспекты метода ССГ. Скорости деформации составили $7500 \div 12000$ с⁻¹. Построены диаграммы усилие — деформация, усилие — смещение, оценена энергия, необходимая для возбуждения взрывчатого превращения. Предложено использовать метод ССГ в дополнение к стандартизованному копровому методу.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Эксперименты проведены по методу составного стержня Гопкинсона или метода Кольского [15–20]. В России метод ССГ наиболее интенсивно и в разных модификациях применяется во ВНИИЭФ и в НИИ механики Нижегородского университета, где работы начались практически одновременно с середины 70-х годов XX в. [21, 22]. Широкое распространение метода позволило провести тщательный анализ его корректности и погрешности [23–26]. Метод ССГ хорошо приспособлен для численного моделирования, так как имеет четкие граничные условия.

В опытах по методу ССГ для получения надежных результатов важно поддерживать однородность напряженно-деформированного состояния образца и снижать влияние осевой и радиальной инерции. Для решения этих вопросов нужно выбирать длину l_0 и радиус r_0 образца такими, чтобы $l_0/r_0 \cong 1$ (критерий Дэвиса — Хантера), а форму $\sigma_i(t)$ такой, чтобы длина волны напряжения $\sigma_i(x - ct)$ была намного больше l_0 [27, 28]. Кроме того, на результаты опытов сильное влияние оказывает трение на границах стержни — образец и дисперсия упругих волн в стержнях.

На рис. 1 приведена схема проведения опытов по изучению динамического сжатия пла-

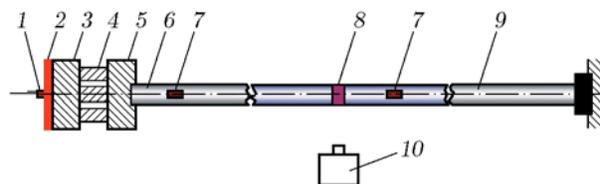


Рис. 1. Схема проведения опытов по исследованию динамического сжатия ВВ методом составного стержня Гопкинсона:

1 — электродетонатор, 2 — слой пластифицированного ВВ, 3 — стальной ударник, 4 — демпфер (Al), 5 — стальной переходник, 6 — нагружающий стержень, 7 — тензодатчики, 8 — образец ВВ, 9 — опорный стержень, 10 — видеокамера

стифицированного тэна методом ССГ. Для создания импульсов нагружения с примерно постоянной амплитудой используется взрывной узел, состоящий из стального ударника 3 с наклеенным на его свободном торце слоем пластического ВВ 2, демпфера из алюминиевого сплава 4 и переходного стального диска 5. Иницирование ВВ осуществляется электродетонатором 1. Образец ВВ 8 в опыте устанавливается между нагружающим 6 и опорным 9 мерными стержнями и подвергается динамическому сжатию с помощью взрывного нагружения.

Из-за особенностей конструкции установки и технологии проведения опытов с взрывным способом формирования нагрузки тензодатчики 7 наклеивались лишь в двух местах на стержнях на расстоянии ≈ 200 мм от левых торцов стержней (см. рис. 1).

Следует отметить, что в опытах на торцы стержней смазка не наносилась, что в совокупности с применением образцов, не отвечающих критерию $l_0/r_0 \cong 1$, привело к сильному влиянию трения на получение диаграмм напряжение — деформация (σ – ε). Поэтому далее приводятся диаграммы усилие — деформация (P – ε) и усилие — смещение (P – Δ). Для построения корректных диаграмм деформирования ВВ, особенно пластических, необходимо учитывать не только трение и инерцию, но и вязкость материала, что требует дополнительных исследований.

Для обработки данных использовали импульсы $\varepsilon_I(t)$ и $\varepsilon_T(t)$ и следующие формулы:

$$P(t) = ES[\varepsilon_T(t)], \quad (1)$$

$$\varepsilon(t) = \frac{2C}{l_0} \int_0^t [\varepsilon_I(t) - \varepsilon_T(t)] dt, \quad \Delta(t) = \varepsilon(t)l_0, \quad (2)$$

$$\dot{\varepsilon}(t) = \frac{2C}{l_0} [\varepsilon_I(t) - \varepsilon_T(t)], \quad (3)$$

где S — площадь поперечного сечения стержней, E — модуль упругости материала стержней, C — скорость продольных волн в стержнях, l_0 — первоначальная длина образца, $\varepsilon_I(t)$ — импульс деформации на нагружающем стержне (падающая волна), $\varepsilon_T(t)$ — импульс деформации на опорном стержне (прошедшая волна), $\dot{\varepsilon}(t)$ — скорость деформации, P — усилие, Δ — смещение торцов стержней.

Формулы (1)–(3) выведены из основных формул метода ССГ [15] в предположении равенства сил, действующих на испытываемый

образец со стороны стержней, и соответствующего равенства $\varepsilon_I(t) + \varepsilon_R(t) = \varepsilon_T(t)$, где $\varepsilon_R(t)$ — деформация в нагружающем стержне в отраженном импульсе (отраженной волне). Это равенство хорошо выполняется уже после одного-двух отражений входящего в образец импульса от торца образца, граничащего с опорным стержнем [23–26]. Для вывода конечных формул (1)–(3) импульс $-\varepsilon_R(t)$ заменялся на $\varepsilon_I(t) - \varepsilon_T(t)$ [29]. Следует отметить, что наиболее точными являются классические формулы метода ССГ с использованием трех импульсов деформации $\varepsilon_I(t)$, $-\varepsilon_R(t)$ и $\varepsilon_T(t)$ [15]. В то же время более простыми и удобными являются формулы (1)–(3), поэтому они часто применяются на практике [29]. Скорость деформации в опытах оценивалась на уровне 0.8 от максимального значения $\dot{\varepsilon}$. Условия проведения экспериментов представлены в таблице.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В первой серии опытов испытывались цилиндрические образцы размеров $\varnothing 10 \times 2$ мм и применялись стержни $\varnothing 20 \times 1000$ мм из титана ВТ20 и стержни $\varnothing 30 \times 1000$ мм из стали 30ХГСА. Во второй серии опытов испытывались образцы размеров $\varnothing 20 \times 2$ мм и применялись стержни $\varnothing 30 \times 1000$ мм из стали 30ХГСА.

По поводу размеров образцов отметим следующее. Для определения методом ССГ диаграмм динамического сжатия в данной постановке опытов образцы должны быть с соотношением $l_0/r_0 = 1$, например диаметром 20 мм и толщиной 10 мм, как это сделано в [2]. С учетом же особенностей пластифицированного тэна и возможностей его изготовления по толщине толщина тонких образцов выбрана равной 2 мм с целью достижения взрывчатого превращения (по аналогии с копровыми испытаниями, где на чувствительность к удару исследуются тонкие слои ВВ [3]). При выборе диаметра образцов ВВ руководствовались соображениями как уменьшения свободной поверхности торца стержня вокруг образца, где происходит отражение части падающей волны, так и увеличения времени деформирования к моменту выхода образца при сжатии за диаметр стержней.

Процесс нагружения образцов ВВ регистрировался скоростной видеокамерой FASTCAM (см. рис. 1) со скоростью видеосъемки $(3.8 \div 4.2) \cdot 10^4$ кадр/с.

Результаты экспериментов по исследованию динамического сжатия пластифицированного тэна

| Номер опыта | Размеры образца и стержней, мм | $\dot{\epsilon}$, с^{-1} | A , Дж | A/V , Дж/ см^3 | Состояние образца |
|-------------|---|------------------------------------|-------------------------------|---------------------------|---|
| 1 | $\varnothing 10 \times 2$ $\varnothing 20 \times 1000$ | 11 000 | 22.4 | 142.7 | Деформирование образца, частичное разрушение с зажиганием частиц ВВ, переходящим во взрывчатое превращение |
| 2 | $\varnothing 10 \times 2$ $\varnothing 20 \times 1000$ | 10 000 | 21.5 | 136.9 | То же |
| 3 | $\varnothing 10 \times 2$ $\varnothing 20 \times 1000$ | 12 000 | 23.9 | 152.2 | То же |
| 4 | $\varnothing 10 \times 2$ $\varnothing 20 \times 1000$ | 10 000 | 22.3 | 142.0 | То же |
| 5 | $\varnothing 10 \times 2$ $\varnothing 20 \times 1000$ | 11 000 | 21.2 | 135.0 | То же |
| 6 | $\varnothing 10 \times 2$, $\varnothing 20 \times 1000$ | 7 500 | 16.5 | 105.1 | Деформирование образца, разрушение на мелкие частицы с зажиганием отдельных частиц ВВ, не переходящим во взрывчатое превращение |
| 7 | $\varnothing 10 \times 2$ $\varnothing 30 \times 1000$ | 9 000 | 19.1 | 121.7 | То же |
| 8 | $\varnothing 20 \times 2$ $\varnothing 30 \times 1000$ | 8 000 | 12.7 ($\epsilon \leq 50\%$) | 20.2 | То же |
| 9 | $\varnothing 20 \times 2$ $\varnothing 30 \times 1000$ | 8 000 | 12.3 ($\epsilon \leq 50\%$) | 19.6 | То же |
| 10 | $\varnothing 20 \times 2$ $\varnothing 30 \times 1000$ | 7 500 | 13.1 ($\epsilon \leq 50\%$) | 20.9 | То же |
| 11 | $\varnothing 20 \times 2$ $\varnothing 30 \times 1000$ | 8 000 | 13.7 ($\epsilon \leq 50\%$) | 21.8 | То же |
| 12 | $\varnothing 20 \times 2$ $\varnothing 30 \times 1000$ | 9 000 | 14.2 ($\epsilon \leq 50\%$) | 22.6 | То же |

Сжатие образцов $\varnothing 10 \times 2$ мм

В первой серии проведено семь опытов, в шести из них применялись титановые стержни $\varnothing 20 \times 1000$ мм, в одном опыте — стальные стержни $\varnothing 30 \times 1000$ мм. Скорость деформации в опытах составила $\dot{\epsilon} = 7\,500 \div 12\,000 \text{ с}^{-1}$, длительность формирующихся волн нагружения — $210 \div 220$ мкс. На рис. 2 представлены характерные записи импульсов деформаций на нагружающем и опорном стержнях, зарегистрированные в опыте 5 со взрывчатым превращением. Близкие импульсы получены и в остальных опытах этой серии. Анализ импульсов деформации показал, что условие равенства сил на торцах стержней хорошо и удовлетворительно соблюдается до ≈ 120 мкс.

На рис. 3 приведена диаграмма изменения скорости деформации в опыте 5, имеющая

ветвь нарастания, переходящую в ветвь снижения. Скорость деформации на уровне 0.8 от максимального значения составляет $11\,000 \text{ с}^{-1}$.

В пяти опытах на стержнях $\varnothing 20 \times 1000$ мм при $\dot{\epsilon} = 10\,000 \div 12\,000 \text{ с}^{-1}$ наблюдались деформирование образцов и их частичное разрушение с воспламенением частиц ВВ, переходящим во взрывчатое превращение. В шестом опыте при $\dot{\epsilon} = 7\,500 \text{ с}^{-1}$ происходили деформирование образца, его разрушение на мелкие частицы с воспламенением отдельных частиц ВВ, не переходящим во взрывчатое превращение.

На рис. 4 приведены фотографии скоростной видеосъемки стадий динамического сжатия пластифицированного тэна в опыте 5 с взрывчатым превращением, скорость видеосъемки $4.0 \cdot 10^4$ кадр/с. Указанное на рисунке

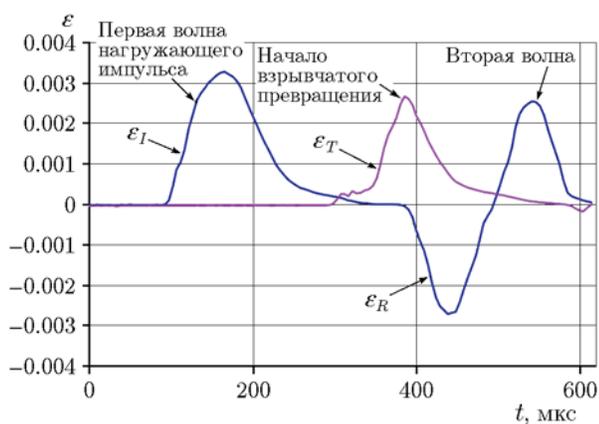


Рис. 2. Зависимость деформации от времени на нагружающем ($\varepsilon_I(t)$, падающая волна) и опорном ($\varepsilon_T(t)$, прошедшая волна) стержнях в опыте 5 с образцом размеров $\varnothing 10 \times 2$ мм

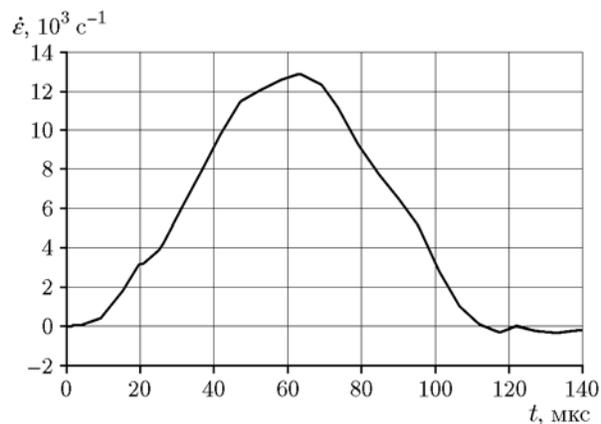


Рис. 3. Диаграмма изменения скорости деформации в опыте 5

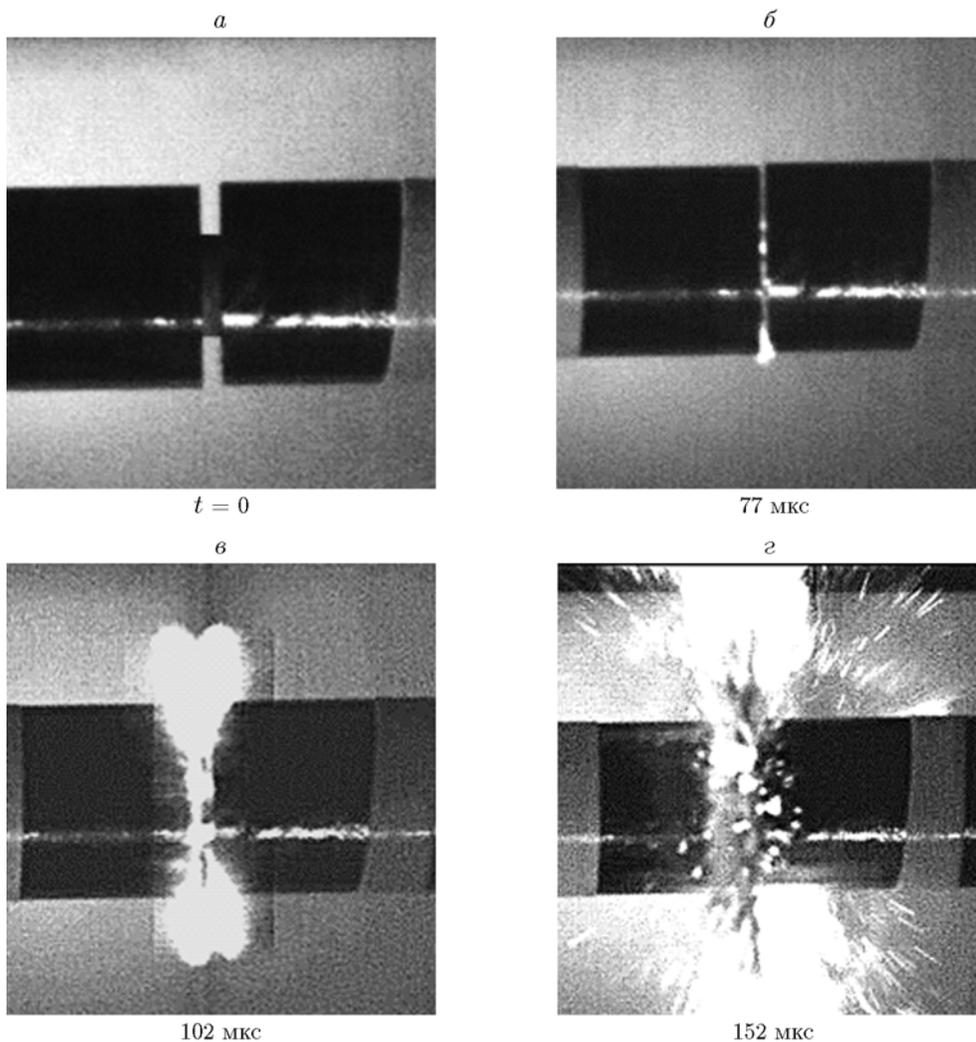


Рис. 4. Фотографии стадий динамического сжатия образца пластифицированного тэна со взрывчатым превращением в опыте 5:

a — исходное положение, *б* — деформирование образца с загоранием частиц ВВ, *в* — начальная стадия взрывчатого превращения, *г* — завершающая стадия взрывчатого превращения

время отсчитывается от начала деформирования образца (начало движения нагружающего стержня). Аналогичный процесс происходил и в других опытах с взрывчатым превращением.

Воспламенение частиц ВВ вполне очевидно вызвано разогревом за счет контактного трения ВВ на торцах стержней, а также за счет диссипации энергии пластического деформирования ВВ. Воспламенение и взрывчатое превращение происходили в процессе прохождения первой волны нагружающего импульса (см. рис. 2). Время начала взрывчатого превращения определялось анализом данных, зарегистрированных тензодатчиками и видеокамерой, с учетом интервала времени между кадрами.

На рис. 5 приведена диаграмма усилие — деформация в опыте 5. Видно, что после значения деформации около 50 % происходит существенный рост усилия, что, очевидно, связано с увеличением трения на торцах стержней. Начало взрывчатого превращения приходится на время 102 мкс и соответствует деформации 0.83 на диаграмме P — ε .

Для оценки энергии, затраченной на скоростное деформирование пластифицированного тэна, приведшее к взрывчатому превращению, построена диаграмма усилие — смещение, показанная на рис. 6,а. Диаграмма заканчивается при значении смещения, соответствующем деформации 0.83. По площади под кривой на рис. 6,а определена затраченная энергия. На рис. 6,б приведена кривая энергия — смещение, согласно которой энергия к

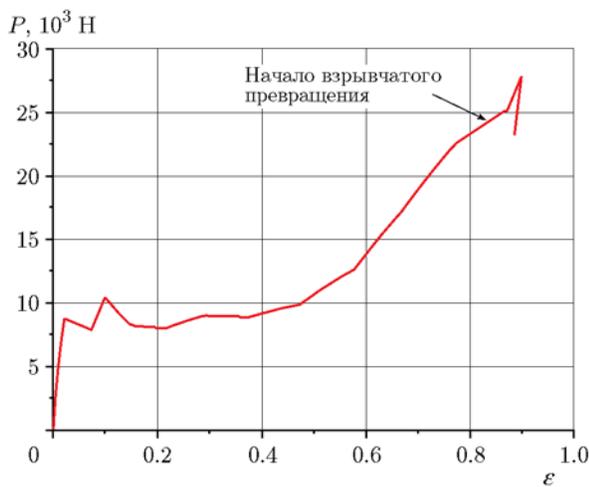


Рис. 5. Диаграмма усилие — деформация в опыте 5

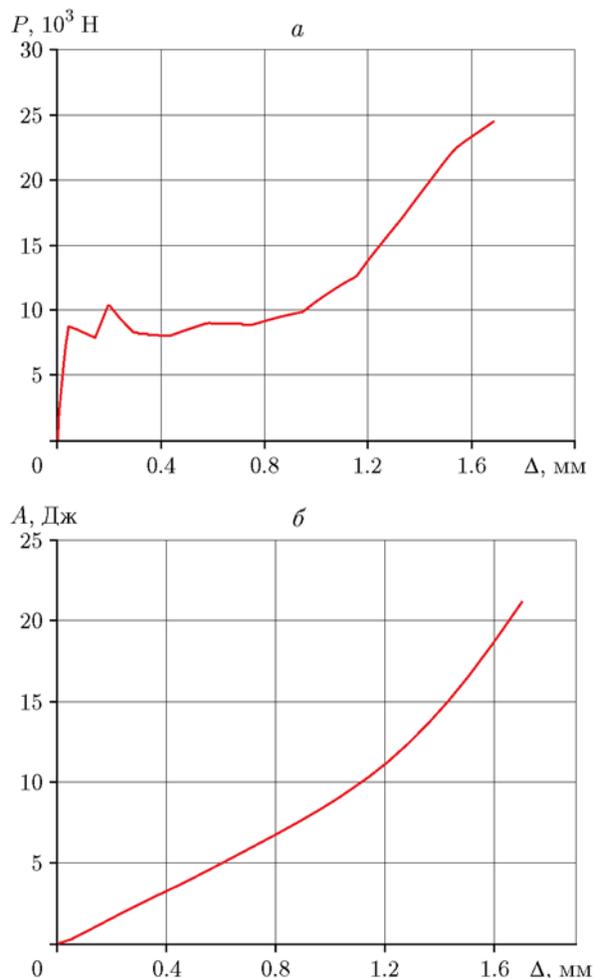


Рис. 6. Диаграммы усилие — смещение (а) и энергия — смещение (б) в опыте 5

началу взрывчатого превращения составляет $A = 21.2$ Дж. В пяти опытах со взрывчатым превращением энергия находится в диапазоне $A = 21.2 \div 23.9$ Дж (удельная объемная энергия $A/V = 135.0 \div 152.2$ Дж/см³). В двух опытах без взрывчатого превращения она составляет $A = 16.5 \div 19.1$ Дж ($A/V = 105.1 \div 121.7$ Дж/см³).

В опыте 7 на стержнях $\varnothing 30 \times 1000$ мм при $\dot{\varepsilon} = 9000$ с⁻¹, как и в опыте 6, происходили деформирование образца и его разрушение на мелкие частицы с воспламенением нескольких частиц ВВ, не переходящим во взрывчатое превращение. При этом на торцах наблюдались остатки расплющенного ВВ толщиной $0.1 \div 0.2$ мм. На рис. 7 приведены фотографии последовательных стадий процесса динамического сжатия пластифицированного тэна

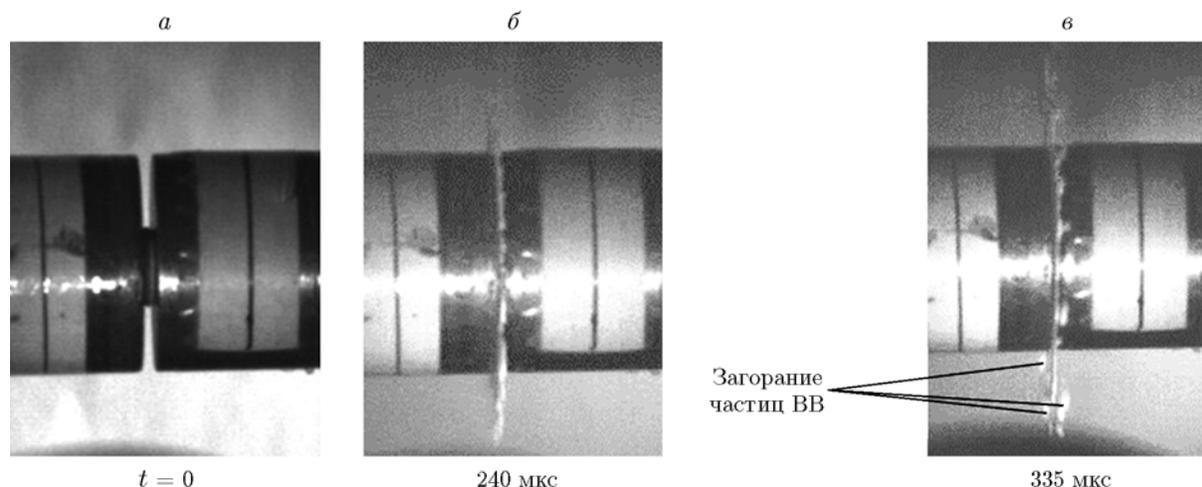


Рис. 7. Фотографии стадий динамического сжатия образца пластифицированного тэна размеров $\varnothing 10 \times 2$ мм без взрывчатого превращения в опыте 7:

a — исходное положение, *б* — деформирование и разрушение образца с разлетом частиц, *в* — продолжение разрушения, загорание частиц ВВ

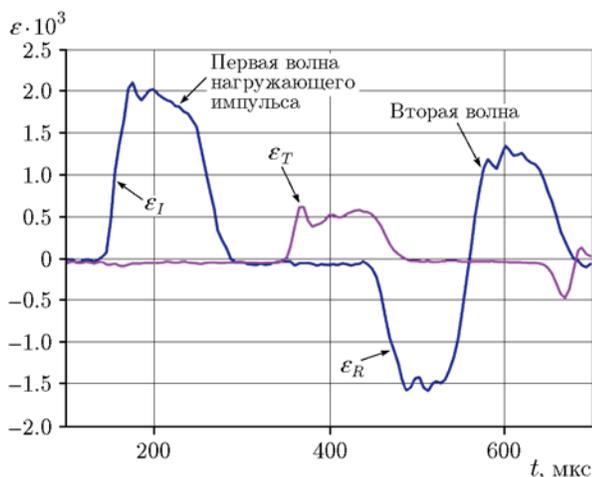


Рис. 8. Зависимость деформации от времени на нагружающем ($\varepsilon_I(t)$, падающая волна) и опорном ($\varepsilon_T(t)$, прошедшая волна) стержнях в опыте 10 с образцами размеров $\varnothing 20 \times 2$ мм

из опыта 7 без взрывчатого превращения, скорость видеосъемки $4.2 \cdot 10^4$ кадр/с.

Сжатие образцов $\varnothing 20 \times 2$ мм

Во второй серии проведено пять опытов, во всех применялись стальные стержни $\varnothing 30 \times 1000$ мм. Интервал скоростей деформации составил $\dot{\varepsilon} = 7500 \div 9000$ с⁻¹, длительность формирующихся волн нагружения — $165 \div 175$ мкс. На рис. 8 представлены характерные записи импульсов деформаций на нагружающем и опорном стержнях в опыте 10.

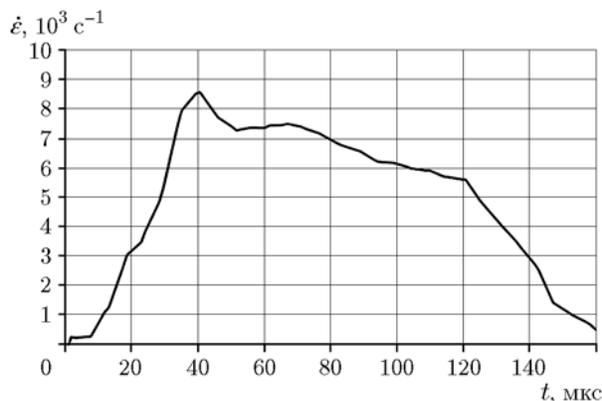


Рис. 9. Диаграмма изменения скорости деформации в опыте 10

Подобные по форме импульсы получены и в остальных опытах второй серии. Анализ импульсов деформации показал, что, так же как и в первой серии опытов, условие равенства сил на торцах стержней хорошо и удовлетворительно соблюдается до ≈ 120 мкс. В этой серии опытов импульсы деформации существенно отличаются от импульсов в первой серии. Так, на рис. 8 в самом начале на фронте импульса $\varepsilon_I(t)$ (а также импульсов $\varepsilon_T(t)$ и $\varepsilon_R(t)$) наблюдается скачок, что, очевидно, связано с влиянием дисперсии упругих волн в стержнях и влиянием трения.

На рис. 9 приведена диаграмма изменения скорости деформации в опыте 10, вначале идет нарастание скорости, а затем ступенчатое

ее снижение с небольшим, близким к горизонтальному участком.

Во всех пяти опытах происходили деформирование образцов и их разрушение на мелкие частицы с воспламенением частиц ВВ, не переходящим во взрывчатое превращение. На рис. 10 приведены фотографии скоростной ($3.8 \cdot 10^4$ кадр/с) видеосъемки различных стадий динамического сжатия пластифицированного тэна в опыте 8. Видно, что в момент времени 96 мкс (соответствует деформации ≈ 0.63) образец по диаметру вышел за пределы диаметра стержней. Аналогичный процесс наблюдался и в других опытах этой серии.

На рис. 11 приведена типичная диаграмма усилие — деформация во второй серии опытов, полученная по результатам опыта 10. Она существенно отличается от диаграммы на рис. 5. На рис. 11 на начальном участке виден значительный рост усилия, что, как отмечено выше, связано с влиянием дисперсии, а также трения в начале деформирования большего (чем в первой серии) образца. Значительные отличия имеются и при деформации $\varepsilon > 50\%$, где различие в усилиях обратное. Однако при деформациях $\varepsilon > 50\%$ в опытах этой серии диаметр образцов достигает и превышает диаметр стержней, вылетая из межстержневого зазора.

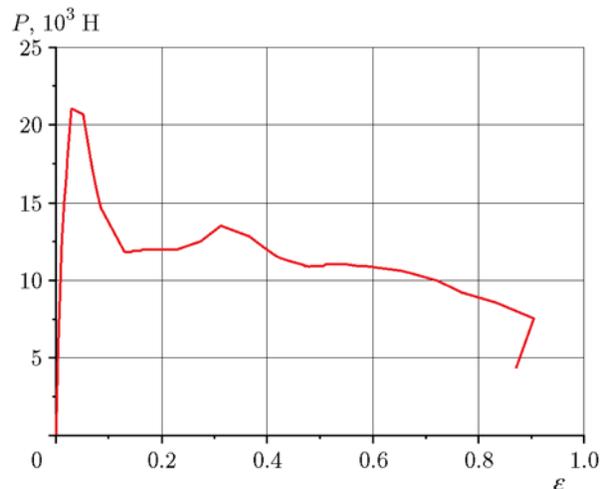


Рис. 11. Диаграмма усилие — деформация в опыте 10

Расчет усилия при этом становится некорректным. По-видимому, это стало причиной отсутствия роста усилия при больших деформациях.

Для оценки энергии, затраченной на скоростное деформирование в опыте 10, построены диаграммы усилие — смещение и энергия — смещение. Диаграммы построены до деформации 50 %, где определение напряжения

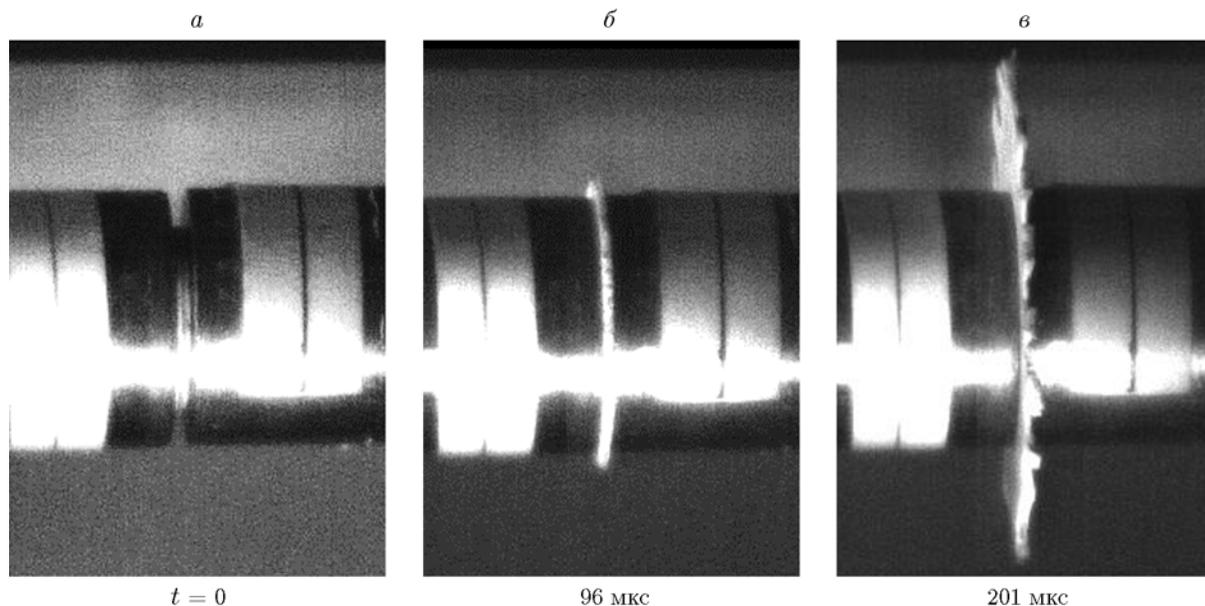


Рис. 10. Фотографии стадий динамического сжатия образца пластифицированного тэна размеров $\varnothing 20 \times 2$ мм без взрывчатого превращения в опыте 8:

а — исходное положение, *б* — деформирование и разрушение образца с разлетом частиц, *в* — продолжение разрушения, загорание частиц ВВ

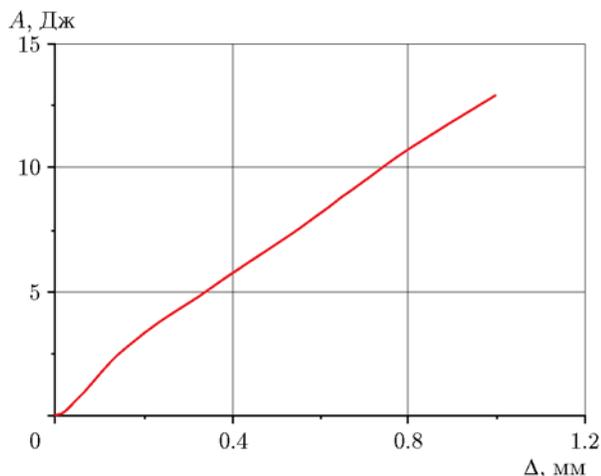


Рис. 12. Диаграмма энергия — смещение в опыте 10

и усилия еще корректно. Для иллюстрации на рис. 12 приведена диаграмма $A-\Delta$, где к деформации 50 % энергия равна 13.1 Дж. В целом по опытам второй серии энергия составляет $A = 12.3 \div 14.2$ Дж (удельная энергия $A/V = 19.6 \div 22.6$ Дж/см³).

Сводные результаты опытов с образцами пластифицированного тэна размеров $\varnothing 10 \times 2$ мм и $\varnothing 20 \times 2$ мм приведены в таблице. Отметим следующее. В первой серии опытов, где взрывчатое превращение как реализовывалось, так и отсутствовало, затраченная на деформирование энергия выше 21.2 Дж ($A/V = 135.0$ Дж/см³) приводит к возбуждению взрывчатого превращения пластифицированного тэна. Энергия ниже 19.1 Дж ($A/V = 121.7$ Дж/см³) приводит лишь к воспламенению отдельных частиц и отсутствию взрывчатого превращения.

Таким образом, учитывая имеющийся опыт работ с ВВ по методу ССГ, следует отметить, что метод ССГ позволяет, кроме изучения диаграмм деформирования, исследовать возбуждение в ВВ взрывчатого превращения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Методом ССГ проведены исследования пластифицированного тэна при динамическом сжатии образцов размеров $\varnothing 10 \times 2$ мм и $\varnothing 20 \times 2$ мм. В опытах реализованы скорости деформации $7\,500 \div 12\,000$ с⁻¹. Построены диаграммы усилие — деформация, усилие — смещение, энергия — смещение.

2. В опытах с образцами размеров $\varnothing 10 \times 2$ мм, где взрывчатое превращение как реализовывалось, так и отсутствовало, энергия на деформирование образцов, превышающая 21.2 Дж ($A/V = 135.0$ Дж/см³), приводит к возбуждению взрывчатого превращения пластифицированного тэна. Энергии ниже 19.1 Дж ($A/V = 121.7$ Дж/см³) для этого недостаточно.

Полученные в экспериментах результаты будут полезны и послужат опорными данными при разработке моделей взрывчатого превращения в ВВ при низкоинтенсивных механических воздействиях.

3. Учитывая эффективность метода ССГ, его универсальность и надежность, а также большой объем получаемой экспериментальной информации, представляется полезным использовать метод ССГ как дополнительный к стандартизованному для изучения характеристик ВВ.

Авторы выражают благодарность ведущему научному сотруднику ИФВ РФЯЦ-ВНИИЭФ В. М. Бельскому за критические замечания и полезные советы при подготовке статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Афанасьев Г. Т., Боболев В. К. Инициирование твердых взрывчатых веществ ударом. — М.: Наука, 1968.
2. Юрлов А. В., Пушков В. А., Найданова Т. Г., Цибилов А. Н., Баканова А. В. Исследование реакции взрывчатого вещества на основе октогена на динамическое нагружение методом составного стержня Гопкинсона // Физика горения и взрыва. — 2016. — Т. 52, № 4. — С. 134–138.
3. Горст А. Г. Пороха и взрывчатые вещества. — М.: Гос. изд-во оборон. пром-сти, 1957.
4. Белов Г. В., Базаров Ю. Б., Екимчев С. Н., Жиёмбетов А. К., Кудашов А. В., Олейников И. В., Шишканов А. В., Шустова Н. И. Влияние скорости ударника на параметры взрыва образцов из двух типов бризантных ВВ // Тр. XV Харитоновских чтений. — Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2013. — С. 111–118.
5. Бельский В. М., Богданов Е. И., Борисенко В. А., Ботов Е. В., Ишеев Д. М., Кручинин В. А., Михайлов А. Л., Родионов А. В., Седов А. А., Хворостин В. Н., Larebie E., Gallic S. Le, Mateille P. Система диагностики, включающая радиоинтерферометр и ПВДФ-датчик давления, для экспериментов типа тест Стивена // Тр. XI Харитоновских чтений. — Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2011. — С. 703–708.

6. **Бельский В. М., Михайлов А. Л., Родионов А. В., Седов А. А.** Микроволновая диагностика ударно-волновых и детонационных процессов // Физика горения и взрыва. — 2011. — Т. 47, № 6. — С. 29–41.
7. **Быстрое** инициирование ВВ. Особые режимы детонации: сб. науч. ст. / под. ред. В. И. Таржанова. — Снежинск: Изд-во РФЯЦ-ВНИИТФ, 1998.
8. **Панов К. Н., Титова В. Б., Корепова Н. В.** Расчетно-экспериментальные исследования условий прерывания распространения детонации в плоских слоях пластического ВВ на основе тэна // Тр. XV Харитоновских чтений. — Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2013. — С. 196–204.
9. **Бурцев С. В., Панов К. Н., Руднев А. В., Сырунин М. А.** Исследование инициирования детонации в ТАТБ методом протонной радиографии // Тр. XV Харитоновских чтений. — Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2013. — С. 74–81.
10. **Chidester S. K., Tarver C. M., DePiero A. H., Garza R. G.** Single and multiple impact ignition of new and aged high explosives in the Stiven impact test // AIP Conf. Proc. 505. — 2000. — P. 663–666.
11. **Джексон Р., Грин Л., Барлетт Р., Хоуфер У., Крамер П., Ли Р., Э. Нидикмл., Шоу Л., Вейнгарт Р.** Закономерности инициирования и распространения детонации во взрывчатом веществе ТАТБ // Детонация и взрывчатые вещества: сборник. — М.: Мир, 1981. — С. 323–342.
12. **Kerly G. I.** Theoretical model of explosive detonation products: test and sensitivity studies // Proc. of 9th Symp. on Detonation. — Office of Naval Res., 1990. — P. 443–451.
13. **Abakumov A. I., Bolshakov A. P., Vasenin S. N., Gushanov A. R., Karpenko I. I., Sinitsyn V. A.** Numerical-experimental research of deformation of energetic materials in conditions of low-velocity loading in tests with split Hopkinson pressure bar // Proc. of the IX Khariton's Readings. RFNC-VNIIEF, Sarov, Russia. — 2007. — P. 215–226.
14. **Mas E. M., Clements B. E., Blumenthal W. R., Cady C. M., Gray III G. T.** Applying micro-mechanics to finite element simulations of split Hopkinson pressure bar experiments on high explosives // Shock Compression of Condensed Matter. — 2001. — P. 539–542.
15. **Кольский Г.** Исследование механических свойств материалов при больших скоростях нагружения // Механика. — 1950. — Вып. 4. — С. 108–128.
16. **Hopkinson J.** On the rupture of iron wire by a blow // Proc. Manchester Lit. Phil. Soc. — 1872. — V. 11. — P. 40–45.
17. **Hopkinson V.** The effects of momentary stresses in metals // Proc. Roy. Soc. A. — 1905. — V. 74. — P. 498–506.
18. **Davis R. M.** A critical study of the Hopkinson pressure bar // Phil. Trans. A. — 1948. — V. 240. — P. 375–457.
19. **Ogawa K.** Impact-tension compression test by using a split — Hopkinson bar // Exp. Mech. — 1984. — V. 24, N 2. — P. 81–86.
20. **Клепачко Д. Р.** Новый метод измерения вязкого излома при высоких скоростях нагружения ударными волнами // Испытательные приборы и стенды. — 1982. — № 3. — С. 1–13.
21. **Большаков А. П., Новиков С. А., Синицын В. А.** Исследование динамических диаграмм одноосного растяжения и сжатия меди и сплава АМг // Проблемы прочности. — 1979. — № 10. — С. 87–88.
22. **Брагов А. М., Ломунов А. К., Русин Е. Е.** Методика исследования динамических свойств материалов с использованием составных стержней Гопкинсона // Прикладные проблемы прочности и пластичности: межвуз. сб. / Горьковский ун-т. — 1980. — Вып. 16. — С. 138–144.
23. **Белл Дж.** Экспериментальная проверка квазистатической гипотезы в опытах на ССГ при помощи дифракционных решеток // Механика. — 1968. — № 5. — С. 138–156.
24. **Джасмен В.** Проверка применимости метода Кольского при исследовании динамических характеристик материалов // Прикл. механика. ТАОИМ. Сер. Е. — 1971. — № 1. — С. 72–81.
25. **Большаков А. П., Коротких Ю. Г., Новиков С. А. и др.** Сравнение результатов численного эксперимента на ЭВМ и динамических испытаний сплава АМг-6 методом Кольского // Проблемы прочности. — 1982. — № 1. — С. 54–57.
26. **Николас Т.** Анализ применимости метода РСГ при исследовании материалов, характеристики которых зависят от скорости деформации // Прикл. механика. Сер. Е. — 1973. — № 1. — С. 288–295.
27. **Davies E. D. H., Hunter S. C.** The dynamic compression testing of solids by the method of the split Hopkinson pressure bar // J. Mech. Phys. Solids. — 1963. — V. 11, N 3. — P. 155–179.
28. **Бельский В. М., Пушков В. А.** Методы исследования ударно-волновых и динамических свойств материалов: учеб. пособие. — Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2014.
29. **Брагов А. М., Константинов А. Ю., Ломунов А. К.** Экспериментально-теоретическое изучение процессов высокоскоростного деформирования конструкционных материалов // Приволж. науч. журн. — 2008. — № 3. — С. 27–33.

Поступила в редакцию 13.12.2018.

После доработки 02.07.2020.

Принята к публикации 04.08.2020.