

УДК 536.46

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УДАРНОГО ИНИЦИИРОВАНИЯ СМЕСИ АЛЮМИНИЙ/ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕН

М. Х. Чжан, В. Цз. Жуань, К. Дун, Ю. Г. Юй

Нанкинский научно-технологический университет, 210094 Нанкин, Китай, zmhalt@163.com

Реакционно-активные материалы представляют собой новый класс энергетических материалов, которые чрезвычайно эффективно высвобождают энергию под действием сильной ударной нагрузки. Исследовалось ударное инициирование смеси алюминий/политетрафторэтилен. Определены значения давления инициирования этой смеси при различных условиях. Критическое давление инициирования составляет приблизительно 1.44 ГПа. Установлено, что при длительности ударной нагрузки порядка нескольких миллисекунд критическое давление инициирования реакции в этом материале слабо зависит от плотности образца. При ударном инициировании существенную роль играют работа пластической деформации и теплота внутреннего трения. Показано, что при ударном инициировании скорость высвобождения энергии выше, чем при поверхностном зажигании.

Ключевые слова: энергетические материалы, ударное инициирование, критическое давление инициирования.

DOI 10.15372/FGV20170312

ВВЕДЕНИЕ

Реакционно-активные материалы — это категория энергетических материалов, которые создаются из различных компонентов в соответствии с определенной рецептурой и способны быстро высвободить большое количество энергии под действием высокой динамической нагрузки. Это могут быть комбинации термитов, интерметаллидов, металл-полимерных смесей, метастабильных межмолекулярных композитов, матричные материалы, а также гидриды [1]. Смесей металл — фторполимер служат типичным примером таких материалов, так как фторполимер является идеальным окислителем в окислительно-восстановительных реакциях из-за высокого содержания фтора (>70 %). В последние годы указанные материалы широко изучаются в связи с их низкой чувствительностью, большой запасаемой энергией, уникальными свойствами высвобождения энергии и другими физико-химическими характеристиками [2, 3].

Типичным представителем материалов, в которых под действием интенсивной ударной нагрузки высвобождается большое количество энергии и генерируется детонационноподобная

взрывная волна, является смесь алюминия с политетрафторэтиленом (Al/ПТФЭ). Исследования этого материала в основном касаются технологии его приготовления [4], характеристик энерговыделения [5–7], эффективности реакции [8] и разработки теоретических моделей [9, 10], в то время как работы по изучению критических условий ударного инициирования и его механизма встречаются редко. Обсуждаемые материалы широко применяются в двигательных установках, в пиротехнических составах, в качестве зарядов в военных приложениях и в различных современных оборонных отраслях промышленности благодаря хорошим энергетическим свойствам [11].

В настоящей работе с использованием ударной установки исследуются критическое давление и механизм ударного инициирования стехиометрической смеси 26.5 % Al и 73.5 % ПТФЭ (по массе).

ЭКСПЕРИМЕНТ

Схема ударной установки показана на рис. 1. Она состоит из камеры, поршня, инициирующего стержня, направляющей втулки, наковальни, порохового заряда и алюминиевой диафрагмы. Объем камеры 161 см³, она выдерживает максимальное давление 400 МПа. Диаметр поршня 30 мм, диаметр инициирующего стержня 6 мм. Иницирующее устройство

© Zhang M. H., Ruan W. J., Dong K., Yu Y. G., 2017.

School of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Science and Technology, 210094 Nanjing, China.

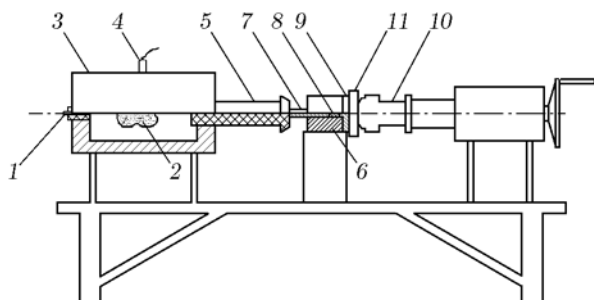


Рис. 1. Схема ударной установки:

1 — отверстие для иницирования, 2 — заряд пороха, 3 — камера, 4 — датчик давления, 5 — поршень, 6 — направляющая втулка, 7 — иницирующий стержень, 8 — образец, 9 — наковальня, 10 — фиксатор, 11 — датчик силы

включает в себя электрозапал и синхронизатор. В состав измерительной системы входят датчики давления и силы, регистратор и высокоскоростная видеокамера.

Смесь Al/ПТФЭ готовили путем сухого смешивания компонентов. Средний исходный размер частиц ПТФЭ и Al — 30 и 25 мкм соответственно. Из приготовленной стехиометрической смеси прессовали образцы в виде таблеток диаметром 6 мм и высотой 6,3 мм. Образцы различной плотности и оборудование для прессования показаны на рис. 2. Плотность определялась как доля от теоретически максимальной плотности (% TMD).

При проведении эксперимента после разгона поршня иницирующий стержень ударяет по образцу. Путем регулирования диаметра иницирующего стержня можно получить ударное давление, в несколько раз превосходящее давление в камере. Коэффициент пре-

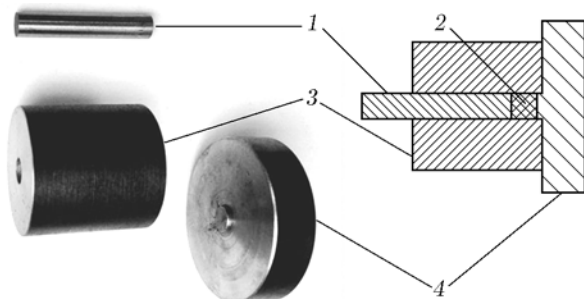


Рис. 2. Фотографии образцов и оборудование для прессования:

1 — иницирующий стержень, 2 — образец, 3 — направляющая втулка, 4 — наковальня

образования давления равен отношению площади поперечного сечения поршня к площади поперечного сечения иницирующего стержня. В данных экспериментах его значение 25. Для точного расчета ударного давления определяли коэффициент затухания путем измерения перед экспериментом давления в камере и силы удара.

На основе предполагаемого давления иницирования можно рассчитать массу пороха и толщину мембраны алюминия в камере. Иницирование порохового заряда и запуск видеокамеры происходят синхронно. Анализ кадров высокоскоростной видеосъемки дает информацию о результатах иницирования. Если образец иницируется, то масса порохового заряда уменьшается, и эксперимент повторяется вновь. В противоположном случае масса заряда увеличивается. Эта процедура повторяется до тех пор, пока не достигается критическое давление иницирования смеси.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Определение силы удара сложнее, чем определение давления, и больше погрешность ее измерения. Одновременное определение силы удара и давления в каждом опыте является сложной задачей. Поэтому перед проведением экспериментов вычисляли коэффициент затухания ξ , исходя из теоретической максимальной силы удара F_t , измеренной максимальной силы удара F_m , максимального давления p в камере и площади поперечного сечения поршня A :

$$\xi = \frac{F_t - F_m}{F_t}, \quad F_t = pA.$$

Для определения ξ было проведено три опыта, и среднее значение ($\xi = 0.151$) принималось в качестве окончательного. Результаты представлены в табл. 1, а на рис. 3 показаны зависимости давления в камере и силы удара от времени, полученные в опыте 1.

Было выполнено двенадцать экспериментов по ударному иницированию. Результаты показаны в табл. 2. В первых восьми опытах относительная плотность образцов составляла 79%. При ударном давлении 1,83 ГПа образец иницировался, что означает, что ударное давление превосходило критическое давление иницирования. Затем ударное давление уменьша-

Таблица 1
 Параметры определения коэффициента затухания

Номер опыта	p , МПа	F_t , кН	F_m , кН	ξ
1	16.1	11.37	9.45	0.17
2	23.5	16.655	13.95	0.16
3	27.8	19.64	17.2	0.125

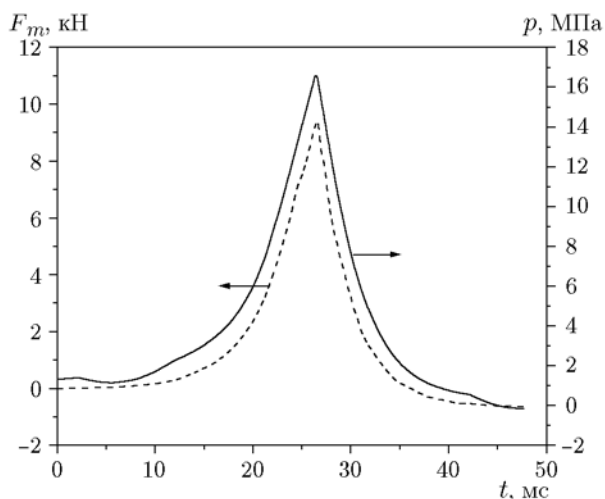


Рис. 3. Зависимости давления в камере и силы удара от времени в эксперименте 1

лось за счет уменьшения массы порохового заряда. Когда давление в камере понижалось до 48 МПа, инициирование не происходило, а при повышении давления в камере до 70 МПа образец снова инициировался. Поэтому можно считать, что критическое давление инициирования лежит между 1.02 и 1.83 ГПа. Для того чтобы получить точное значение критического давления инициирования этого образца, давление в камере регулировали в диапазоне $48 \div 70$ МПа. При ударном давлении 1.28 ГПа образец не воспламенялся, при его повышении до 1.36 ГПа образец реагировал частично, а при увеличении давления до 1.44 ГПа реагировал полностью. Таким образом, критическое давление инициирования образцов этой плотности составляет примерно 1.44 ГПа.

На рис. 4 показаны фотографии направляющих втулок после экспериментов как при полном реагировании образцов, так и при частичном. В первом случае направляющая втулка и наковальня почти полностью были покрыты продуктами реакции. При этом наковальня плавилась, что свидетельствует о выделении большого количества энергии в ходе реакции и о высокой температуре продуктов реакции. В тех экспериментах, где реакция прошла частично, реагирующий материал инициировался, но механической энергии ударника было

Таблица 2

Данные ударного инициирования

Номер	Масса, г	Плотность, г/см ³ (% TMD)	Давление в камере, МПа	Ударное давление, ГПа	Иницирование
1	0.34	1.8 (79)	86	1.83	Да
2	0.34	1.8 (79)	38	0.81	Нет
3	0.34	1.8 (79)	48	1.02	Нет
4	0.34	1.8 (79)	70	1.49	Да
5	0.34	1.8 (79)	50	1.06	Нет
6	0.34	1.8 (79)	64	1.36	Да
7	0.34	1.8 (79)	68	1.44	Да
8	0.34	1.8 (79)	60	1.28	Нет
9	0.38	2.13 (88.5)	71	1.5	Да
10	0.38	2.13 (88.5)	58	1.23	Нет
11	0.42	2.36 (98)	61.5	1.39	Да
12	0.42	2.36 (98)	56	1.27	Нет

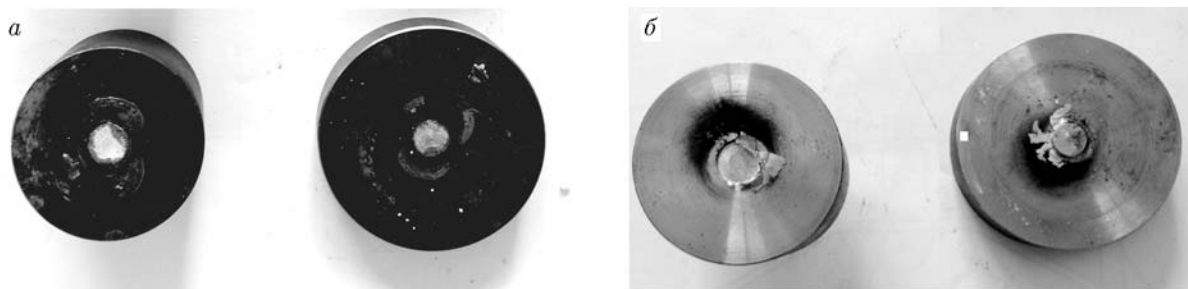


Рис. 4. Фотографии деталей оборудования после нагружения:

a — образец, прореагировавший полностью, *б* — частично

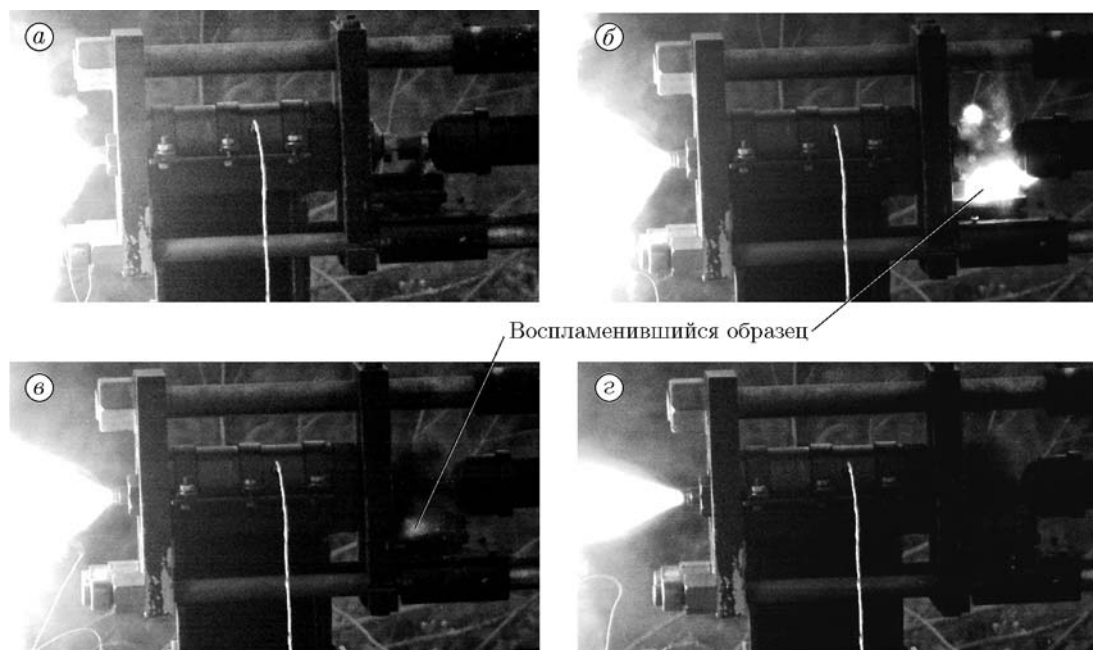


Рис. 5. Видеокадры ударного инициирования:

a — 1, *б* — 2, *в* — 3, *г* — 4 мс

недостаточно для поддержания реакции.

Для того чтобы определить влияние плотности на критическое давление ударного инициирования, мы использовали образцы плотностью 88.5 и 98 %. Как видно из табл. 2, явных различий в значениях критического давления инициирования этих образцов по сравнению с образцами плотностью 79 % нет. Разумно полагать, что при скорости нагружения порядка нескольких сотен мегапаскалей в миллисекунду плотность образца не играет важной роли в процессе инициирования, так как скорость нагружения недостаточно высока, чтобы были возможны пластический коллапс пор и образование микроструй в процессе их сжатия. При нагружении в течение нескольких милли-

секунд тепло, генерируемое при коллапсе пор, может рассасываться и температура материала в окрестности пор будет расти слабо. Поэтому коллапс пор не может быть основным процессом, ответственным за инициирование. Кроме того, маловероятно, чтобы большое количество тепла могло генерироваться в результате трения между частицами в этом материале, так как тефлон может, как смазка, снижать трение между частицами.

При интенсивной ударной нагрузке высокая скорость пластической деформации частиц Al будет обеспечивать энергию, необходимую для протекания реакции. Кроме того, частицы ПТФЭ обладают значительной вязкостью и в процессе ударного нагружения могут дополни-

тельно генерировать тепло за счет внутреннего трения (вязкое тепло). К тому же, когда температура достигает 400 °С, ПТФЭ может разлагаться на фторированные газы, которые, продавливаясь через микроскопические поры в образце, генерируют дополнительное вязкое тепло. По мере роста генерации тепла достигается необходимая для протекания реакции энергия. Поэтому пластическая работа и вязкое тепло важны для ударного воспламенения данного типа реагирующих материалов.

Фрагменты видеосъемки ударного инициирования представлены на рис. 5. Они показывают, что образец бурно реагирует под ударной нагрузкой и длительность реакции составляет $\approx 1 \div 3$ мс. Для сравнения скоростей реакции при ударном и поверхностном инициировании проведена серия экспериментов с воспламенением поверхности этого образца. Результаты показывают, что образец смеси стехиометрического состава плохо воспламеняется открытым пламенем. При увеличении содержания Al до 55 % образец успешно инициируется, и время его сгорания составляет 3.2 с, т. е. время реакции Al при поверхностном инициировании намного больше, чем при ударном.

При высокой ударной нагрузке образец инициируется в большом числе точек, его температура немедленно возрастает, в результате скорость выделения энергии при ударном инициировании намного выше, чем при поверхностном.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При скорости нагружения в несколько сотен мегапаскалей в миллисекунду критическое давление инициирования стехиометрической смеси Al/ПТФЭ (26.5/73.5) с размером частиц алюминия 25 мкм составляет примерно 1.44 ГПа.

При такой же скорости нагружения и при приложении нагрузки в течение нескольких миллисекунд критическое давление инициирования смеси Al/ПТФЭ слабо зависит от плотности образцов. Наиболее важный фактор, отвечающий за инициирование, — теплота внутреннего трения.

Скорость выделения энергии и температура продуктов при ударном инициировании выше, чем при поверхностном. Поскольку смесь Al/ПТФЭ малочувствительна к инициированию форсом пламени, этот материал может с успехом использоваться в системах вооружения в качестве идеального энергетического заряда.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Thadhani N. N.** Shock-induced and shock-assisted solid-state chemical reactions in powder mixtures // *J. Appl. Phys.* — 1994. — V. 78, N 4. — P. 2129–2138.
2. **Ames R. G.** Vented chamber calorimetry for impact-initiated energetic materials // 43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. — 2005. — P. 279.
3. **Herbold E. B.** Particle size effect on strength, failure, and shock behavior in polytetrafluoroethylene — Al—W granular composite materials // *J. Appl. Phys.* — 2008. — V. 104, N 10. — 103903.
4. **Yang S. Q., Xu S. L., Zhang T.** Preparation and performance of PTEF/Al reactive materials // *J. Nat. Univ. Defense Technol.* — 2008. — V. 30, N 6. — P. 512–516.
5. **Ames R. G.** Energy release characteristics of impact-initiated energy materials // *Mater. Res. Soc.* — 2006. — V. 896. — P. 123–132.
6. **Wang H. F., Zheng Y. F., Yu Q. B., Liu Z. W., Yu W. M.** Impact-induced initiation and energy release behavior of reactive materials // *J. Appl. Phys.* — 2011. — V. 110, N 7. — 074904.
7. **Ames R. G.** Reaction efficiencies for impact-initiated energetic materials // 32nd Intern. Pyrotechnics Seminar. — 2005.
8. **Zhang X. F., Shi A. S., Qiao L., Zhang J., Zhang Y. G., Guan Z. W.** Experimental study on impact-initiated characters of multifunctional energetic structural materials // *J. Appl. Phys.* — 2013. — V. 113, N 8. — 083508.
9. **Song L., Thadhani N. N.** Shock-induced chemical reactions and synthesis of nickel aluminides // *Symp. on Reaction Synthesis of Materials.* — 1992. — V. 23A. — P. 41–48.
10. **Zhang X. F., Shi A. S., Zhang J., Qiao L., He Y., Guan Z. W.** Thermochemical modeling of temperature controlled shock-induced chemical reactions in multifunctional energetic structural materials under shock compression // *J. Appl. Phys.* — 2012. — V. 111, N 12. — 123501.
11. **Borrelli J.** The effects of fuel particles size on the reaction of Al/TEFLON mixtures // *Masters' Thesis (Texas Tech University).* — 2006.