

УДК 535.341,544.454

ВЛИЯНИЕ ПЛОТНОСТИ КОМПОЗИТОВ ТЭН — АЛЮМИНИЙ НА ПОРОГИ ВЗРЫВЧАТОГО РАЗЛОЖЕНИЯ ПРИ ЛАЗЕРНОМ ИНИЦИИРОВАНИИ

Б. П. Адуев, Д. Р. Нурмухаметов, Н. В. Нелюбина

Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, 650000 Кемерово
lesinko-iuxm@yandex.ru

Приведены результаты исследования порогов взрывчатого разложения композитов тэн — алюминий в зависимости от концентрации включений при различных плотностях образцов. Увеличение плотности образцов приводит к уменьшению минимальной критической плотности энергии взрывчатого разложения и концентрации включений, при которых наблюдаются взрывы.

Ключевые слова: лазерное инициирование, тэн, взрыв, газодинамическая разгрузка, наночастицы алюминия.

DOI 10.15372/FGV20190613

ВВЕДЕНИЕ

Изучение лазерного инициирования взрывчатых веществ началось во второй половине 60-х годов прошлого века. Краткий обзор исследований по этому направлению содержится в работе [1] (см. также библиографию в ней).

На порог лазерного инициирования влияет множество факторов. Среди них перспективным оказалось введение светопоглощающих добавок в тэн. Эта идея была высказана в работах [2–4] в конце 1960-х и частично реализована [1, 5, 6] в 1980-х годах. Дальнейшее развитие данное направление получило в наших работах, в которых в качестве добавок в тэн использовались в основном частицы металлов размером $100 \div 150$ нм (см., например, [7] и библиографию в ней). В результате детальных исследований для образцов плотностью $\rho = 1.7$ г/см³ при оптимальной концентрации включений 0.2 % (по массе) был получен минимальный порог инициирования $H_{cr}^{\min} = 0.7$ Дж/см², что в десятки раз меньше такового для чистого тэна. Отметим, что в наших работах был исследован ряд факторов, от которых зависит H_{cr} . Но в данной статье мы рассматриваем только влияние условий газодинамической разгрузки образца на величину H_{cr} . Приведенное выше значение H_{cr} получено в условиях, когда образцы накрывались прозрачной стеклянной пластиной со сто-

роны облучения, и газодинамическая разгрузка, по существу, определялась массой этой пластины. Во всех наших предыдущих работах плотность образцов поддерживалась одинаковой $\rho = 1.70 \div 1.73$ г/см³. Прессованные образцы тэна без добавок были практически прозрачными в видимой и ближней инфракрасной областях спектра [8] и обладали минимальным диффузным рассеянием.

В настоящей работе исследована зависимость критической энергии инициирования H_{cr} от плотности образцов в диапазоне $\rho = 1.1 \div 1.7$ г/см³ в зависимости от концентрации включений наночастиц алюминия. Диапазоны плотности снизу и сверху ограничивались возможностями методики изготовления образцов.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для подготовки образцов, как и в предыдущих работах (см., например, [9, 10]), использовался синтезированный нами порошок тэна с размером зерен в максимуме распределения $1 \div 2$ мкм.

В качестве добавки взят порошок алюминия, изготовленный методом газофазного синтеза в Институте физики металлов УрО РАН, с размером частиц в максимуме распределения $100 \div 120$ нм. Возраст порошка на момент проведения экспериментов составлял 6 лет. Известно, что в процессе хранения наночастицы Al покрываются оксидной пленкой. Массовое содержание оксида алюминия (Al₂O₃) по данным рентгенофазового анализа равнялось 27 %.

При таком его содержании толщина оксидной оболочки составляет 5 нм. Влияние оксидной оболочки алюминия на взрывчатые характеристики тэна было исследовано в [9]. В настоящей работе под наночастицами алюминия мы будем иметь в виду наночастицы со структурой металлического ядра алюминия, покрытого оксидной оболочкой толщиной 5 нм.

К навеске тэна добавлялась необходимая масса частиц алюминия, смесь помещалась в гексан и подвергалась перемешиванию в ультразвуковой ванне для равномерного распределения включений в основной матрице. После этого проводились испарение гексана и сушка смеси. Образцы изготавливались с использованием специальной пресс-формы — медной пластины толщиной 1 мм, в центре которой имелось отверстие диаметром 3 мм. В отверстие засыпали необходимую массу смеси. При прессовании давление поднималось в течение 30 мин до величины 1.8 ГПа. В результате в центре пластины получали образец диаметром $d = 3$ мм и толщиной, равной толщине пластины, $h = 1$ мм.

Плотность образца рассчитывали по формуле

$$\rho = 4m/(\pi d^2 h). \quad (1)$$

Массу образца m измеряли на аналитических весах с точностью измерения 0.1 мг, диаметр d — с помощью оптического микроскопа с точностью 1 мкм, а высоту h — микрометром с точностью 5 мкм. Расчет погрешности однократного измерения плотности составил менее 1 %.

Согласно (1) при изменении массы образца меняется его плотность. В экспериментах использовались образцы плотностью $\rho = 1.1, 1.3, 1.5$ и 1.7 г/см³. Соответственно расчетные значения массы навесок, которые засыпались в пресс-форму для получения образцов указанной плотности, составили $m = 7.7, 9.2, 10.6$ и 12.0 мг. Кроме того, для каждой плотности изготавливались образцы с массовым содержанием включений $n = 0.025, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.75$ и 1.0 %.

Схема эксперимента представлена на рис. 1. Образец устанавливался на дюралевую пластину-свидетель, которая находилась на массивной стальной подложке. О наличии взрыва свидетельствовали громкий звуковой сигнал, отпечаток на пластине-свидетеле и сигнал фотоумножителя, регистрирующего

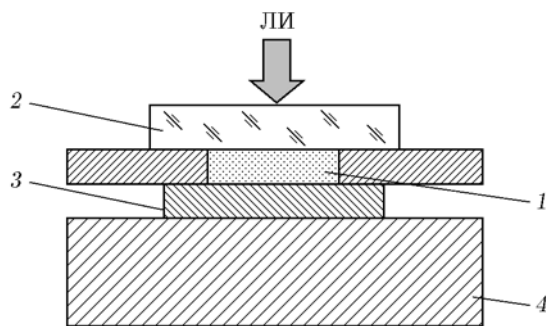


Рис. 1. Экспериментальная ячейка:

1 — образец в медном держателе, 2 — стеклянная пластина, 3 — дюралевая пластина-свидетель, 4 — массивное металлическое основание

свечение продуктов взрыва. В качестве источника инициирования использовали первую гармонику YAG:Nd³⁺-лазера, работающего в режиме модуляции добротности. Длительность импульса 14 нс, максимальная энергия в импульсе 1.5 Дж. Энергия регулировалась с помощью калиброванных светофильтров. С помощью линзы лазерное излучение фокусировалось в плоскости образца в пятно диаметром 2.5 мм. Для блокирования газодинамической разгрузки, как и в предыдущих работах (например, [9, 10]), образец накрывали со стороны облучения прозрачной для лазерного излучения стеклянной пластиной толщиной 1 мм.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для образцов каждой плотности экспериментально получали зависимость вероятности взрыва от плотности энергии при варьировании концентрации включений в образцах (кривые частоты) и определяли критическую энергию, соответствующую 50%-й вероятности взрыва (порог). Для примера на рис. 2 представлено семейство кривых частоты (P) при $\rho = 1.1$ г/см³. Экспериментальные точки аппроксимировались интегралом вероятности и определялись порог и дисперсия, характеризующая ошибку измерения (указано в таблице). Критические энергии инициирования в зависимости от концентрации включений для образцов различной плотности представлены на рис. 3. Из рисунка следует, что с увеличением плотности образца минимальный порог инициирования уменьшается. При этом соответствующая ему концентрация включений так-

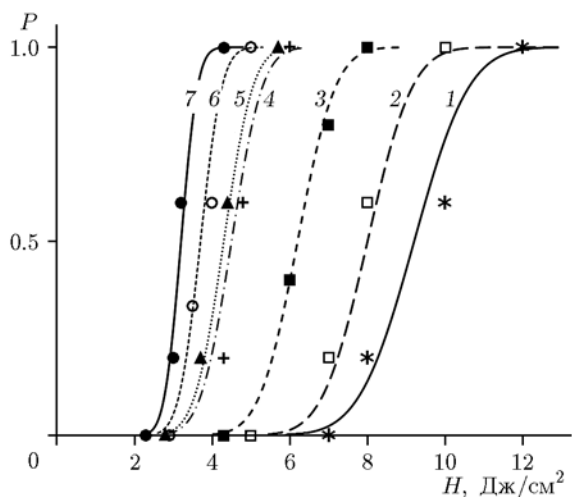


Рис. 2. Зависимость вероятности взрыва от плотности энергии лазерного излучения для образцов тэна плотностью 1.1 г/см^3 с включениями наночастиц алюминия различной концентрации:

1 — $n = 1.0 \%$, 2 — 0.025% , 3 — 0.1% , 4 — 0.2% , 5 — 0.75% , 6 — 0.3% , 7 — 0.5%

$\rho, \text{ г/см}^3$	$n_{cr}^{\min}, \%$	$H_{cr}^{\min}, \text{ Дж/см}^2$	$\Delta H_{cr}^{\min}, \text{ Дж/см}^2$
1.1	0.5	3.2	0.3
1.3	0.4	2.1	0.3
1.5	0.3	1.0	0.2
1.7	0.2	0.7	0.1

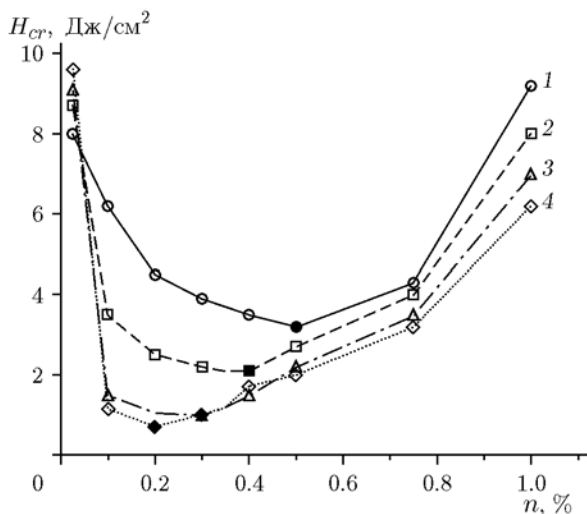


Рис. 3. Зависимость критической энергии инициирования от концентрации включений алюминия в образцах разной плотности:

1 — $\rho = 1.1 \text{ г/см}^3$, 2 — 1.3 , 3 — 1.5 , 4 — 1.7 г/см^3

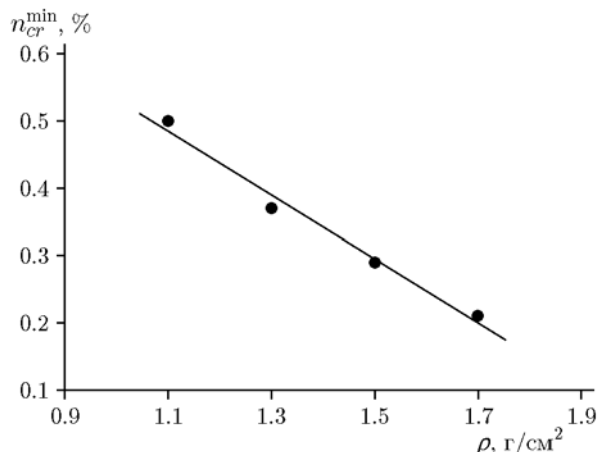


Рис. 4. Зависимость оптимальной концентрации частиц алюминия, при которой наблюдается минимальный порог лазерного инициирования, от плотности образцов

же уменьшается. В дальнейшем такие концентрации будем называть оптимальными, $n_{opt} \equiv n_{cr}^{\min}$. Поведение зависимости $n_{cr}^{\min}(\rho)$ наглядно иллюстрирует рис. 4. В таблице представлены значения H_{cr}^{\min} и n_{cr}^{\min} в зависимости от плотности образцов.

Полученные результаты можно объяснить следующим образом. В данном эксперименте излучение практически полностью поглощается включениями металла, которые нагреваются до высокой температуры, вплоть до температуры плавления или оптического взрыва частиц добавки, как, например, считается в [1]. Это приводит к инициированию реакции в окрестности такой горячей точки, и, если концентрация этих точек достаточна, образуются макроочаги, которые, сливаясь, дают ударную волну и взрыв в образце. Мы считаем, что детальная картина выглядит несколько сложнее. За время импульса поглощенное включением тепло нагревает окружающую матрицу тэна на расстояние L от границы включения, которое приближенно можно оценить по формуле

$$L = \sqrt{\chi\tau}, \quad (2)$$

где $\chi = 1.1 \cdot 10^3 \text{ см}^2/\text{с}$ — температуропроводность тэна, $\tau = 14 \text{ нс}$ — длительность импульса.

В нашем случае $L = 40 \text{ нм}$. Температура плавления тэна $T_m = 414 \text{ К}$, температура кипения тэна $T_p = 453 \text{ К}$ [11], удельная теплота испарения тэна $\lambda = 0.27 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}$ [12]. Выполненная в работе [13] оценка нагрева включения

Al и оболочки тэна толщиной L с учетом испарения оболочки тэна показала, что уже при плотности энергии лазерного импульса $H = 0.1 \text{ Дж/см}^2$ двухслойная сфера нагреется до 500 К и начинается испарение тэна. Если опираться на эти расчеты, при $H > 0.1 \text{ Дж/см}^2$ в очагах будет увеличиваться давление, возможен выход газа к поверхности и при блокировании газодинамической разгрузки — возникновение ударной волны. Более корректные расчеты в рамках микроочаговой теории лазерного инициирования приведены в [14] для композита тэн — Al и в работе [15] для композита тэн — Co. Расчеты показали, что при достижении пороговой плотности энергии температура включений составляет $\approx 1200 \text{ К}$. При этом очаги взрывчатого разложения начинают формироваться в окружающей включение оболочке тэна уже во время облучения при достижении максимальной интенсивности лазерного импульса. При этом температура в очагах быстро нарастает и еще до окончания действия лазерного импульса превышает температуру включения. Очевидно, как и в предыдущих рассуждениях, происходят испарение тэна, возрастание давления и возникновение ударных волн, приводящих к взрыву. В этой модели, с нашей точки зрения, порог взрывчатого разложения в большей степени определяется не сортом включения, от которого передается тепло матрице тэна, а свойствами самой матрицы. В пользу этого свидетельствуют данные экспериментальных измерений критической энергии инициирования детонации композитов: $H_{cr} = 0.7 \text{ Дж/см}^2$ при $n_{opt} = 0.2 \%$ для тэн — Al [10], $H_{cr} = 0.5 \text{ Дж/см}^2$ при $n_{opt} = 0.4 \%$ для тэн — Fe [16], $H_{cr} = 0.7 \text{ Дж/см}^2$ при $n_{opt} = 0.1 \%$ для тэн — Ni [17]. При увеличении плотности композитных материалов увеличивается площадь контакта матрицы с металлической частицей, следовательно, облегчается нагрев прилегающих слоев тэна и вспышка происходит при меньших значениях H_{cr} и n_{opt} , что качественно согласуется с результатами экспериментов, представленных на рис. 3 и 4.

Отметим, что порог инициирования нормальной детонации в тэне должен увеличиваться с ростом плотности образца, что следует как из теории [18], так и из экспериментов [1, 4, 19] и, на первый взгляд, противоречит нашим результатам. Однако следует учитывать, что в цитированных работах образцы имели размеры $5 \times 10 \text{ мм}$ [4] и $4 \times 4 \text{ мм}$ [1, 19], пре-

вышающие критические размеры нормальной детонации, и поведение зависимости H_{cr} качественно совпадает с теоретическими представлениями.

В нашем случае размер образцов составлял $3 \times 1 \text{ мм}$, а толщина заряда была меньше «глубины возникновения детонации». При этом геометрия эксперимента такова, что существенную роль для инициирования взрыва играет наличие акустически жесткой металлической подложки на тыльной стороне образца — инициирование может начинаться на тыльной стороне образца. Были проведены специальные эксперименты, в которых в дюралевой пластине-свидетеле (см. рис. 1) делалось отверстие диаметром, равным диаметру образца. В этом случае акустически жесткая подложка на тыльной стороне образца отсутствовала. При использовании композитов, аналогичных исследованным в экспериментах с акустически жесткой подложкой, взрыв не происходил. Этот эффект наглядно проявляется при инициировании тонких (1.5 мм) монокристаллов тэна электронным пучком. Монокристаллы прозрачны, и развитие реакции при инициировании визуализируется с помощью регистрации свечения в реальном масштабе времени стрик-камерой [20]. Свечение возникает на тыльной стороне образца при отражении ударной волны от жесткой преграды. Далее идет развитие реакции с детонационной скоростью. Если убрать акустически жесткую преграду с тыльной стороны образца, то взрыв не происходит [20].

В связи с вышесказанным результаты данной работы отличаются от результатов классических экспериментальных и теоретических исследований детонирующих объектов [1, 4, 18, 19]. Возможно, при лазерном инициировании тонких образцов следует говорить о низкоскоростной детонации по классификации, приведенной в [18]. В этом случае закономерности взрывчатого разложения могут быть иными, чем в условиях, обеспечивающих возникновение нормальной детонации.

В подтверждение этих соображений упомянем, что при лазерном инициировании взрыва тонких образцов тэна с включениями частиц алюминия нами обнаружено уменьшение скорости ударных волн в воздухе с ростом плотности образцов [21], что также противоречит представлениям о нормальной детонации.

ВЫВОДЫ

1. Критическая энергия инициирования тонких образцов композитов типа тэна — металл уменьшается с ростом плотности образцов, что противоречит результатам экспериментов с образцами, толщина которых позволяет развитие в них детонации.

2. Для образцов плотностью 1.7 г/см^3 площадь контакта включений наночастиц Al с матрицей тэна максимальна. Это обеспечивает минимально возможную в условиях эксперимента критическую плотность энергии, при которой за время импульса лазерного излучения оболочка тэна, окружающая включение, прогревается до температуры, при которой инициируется химическая реакция, приводящая к взрыву образца.

3. При уменьшении плотности образцов увеличивается их пористость и, как следствие, уменьшается площадь контакта частиц тэна с наночастицами алюминия. Это затрудняет теплопередачу от частицы к тэну. В результате происходит увеличение критической энергии и оптимальной концентрации включений, при которой прогрев окружающей наночастицы алюминия оболочки тэна становится достаточным для инициирования в ней химической реакции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Таржанов В. И., Сдобнов В. И., Зинченко А. Д., Погребов А. И. Лазерное инициирование низкоплотных смесей тэна с металлическими добавками // Физика горения и взрыва. — 2017. — Т. 53, № 2. — С. 118–125.
2. Галеев И. А., Зайцев Б. Н. Механизм возбуждения детонации ВВ излучением оптического квантового генератора // Первый Всесоюз. симпоз. по горению и взрыву: тез. докл. — М.: Наука, 1968. — С. 146–147.
3. Галеев И. А., Зайцев Б. Н. Об отражательной способности ВВ // Физика горения и взрыва. — 1969. — Т. 5, № 3. — С. 447.
4. Бриш А. А., Галеев И. А., Зайцев Б. Н., Сбитнев Е. А., Татаринцев Л. В. О механизме инициирования конденсированных ВВ излучением ОКГ // Физика горения и взрыва. — 1969. — Т. 5, № 4. — С. 475–480.
5. Александров В. Е., Долголаптев А. В., Иоффе В. Б., Ковальчук В. М., Левин Б. В., Образцов А. П. Исследование особенностей воспламенения конденсированных сред с поглощающими добавками при концентрированном подводе лучистой энергии // Физика горения и взрыва. — 1983. — Т. 19, № 4. — С. 17–20.
6. Иоффе В. Б., Долголаптев А. В., Александров В. Е., Образцов А. П. Воспламенение алюминийсодержащих конденсированных систем лазерным моноимпульсным излучением // Физика горения и взрыва. — 1985. — Т. 21, № 3. — С. 51–55.
7. Адуев Б. П., Нурмухаметов Д. Р., Звекон А. А., Каленский А. В., Никитин А. П. Модификация свойств взрывчатых материалов добавками нанодисперсных энергоемких металлических частиц // Химия в интересах устойчивого развития. — 2015. — Т. 23, № 2. — С. 183–192.
8. Алукер Э. Д., Алукер Н. Л., Белокуров Г. М., Кречетов А. Г., Лобойко Б. Г., Нурмухаметов Д. Р., Тупицын А. В., Филин В. П. Эффективность лазерного инициирования и спектры поглощения тэна // Хим. физика. — 2010. — Т. 29, № 1. — С. 49–52.
9. Адуев Б. П., Нурмухаметов Д. Р., Звекон А. А., Нелюбина Н. В. Влияние массовой доли оксида в наночастицах алюминия на порог взрывного разложения и эффективность поглощения света в компаунде на основе тэна // Физика горения и взрыва. — 2014. — Т. 50, № 5. — С. 87–90.
10. Адуев Б. П., Нурмухаметов Д. Р., Звекон А. А., Никитин А. П., Каленский А. В. Особенности лазерного инициирования композитов на основе тэна с включениями ультрадисперсных частиц алюминия // Физика горения и взрыва. — 2016. — Т. 52, № 6. — С. 104–110.
11. Боуден Ф., Иоффе А. Быстрые реакции в твердых веществах. — М.: Мир, 1962.
12. Орлова Е. Ю. Химия и технология бризантных взрывчатых веществ. — М.: Оборонгиз, 1960.
13. Адуев Б. П., Нурмухаметов Д. Р., Белокуров Г. М., Нелюбина Н. В. Оптико-акустические эффекты в тетранитрате пентаэритрита с включениями ультрадисперсных частиц алюминия при импульсном лазерном воздействии // Оптика и спектроскопия. — 2018. — Т. 124, № 3. — С. 404–409.
14. Каленский А. В., Ананьева М. В., Звекон А. А., Зыков И. Ю. Кинетические закономерности взрывчатого разложения таблеток тетранитропентаэритрит-алюминий // Журн. техн. физики. — 2015. — Т. 85, № 3. — С. 119–123.
15. Адуев Б. П., Ананьев В. А., Никитин А. П., Звекон А. А., Каленский А. В. Закономерности инициирования цепного и теплового взрыва энергетических материалов импульсным лазерным излучением // Хим. физика. — 2016. — Т. 35, № 11. — С. 26–36.
16. Адуев Б. П., Нурмухаметов Д. Р., Звекон А. А., Никитин А. П., Ковалев Р. Ю. Лазерное инициирование композитных материалов на основе тэна и наночастиц железа // Хим. физика. — 2016. — Т. 35, № 7. — С. 38–43.

17. Адуев Б. П., Нурмухаметов Д. Р., Звекон А. А., Лисков И. Ю. Влияние размера включений ультрадисперсных частиц никеля на порог лазерного инициирования тэна // Физика горения и взрыва. — 2015. — Т. 51, № 4. — С. 82–86.
18. Физика взрыва / под ред. Л. П. Орленко. — М.: Физматлит, 2004. — Т. 1.
19. Таржанов В. И., Зинченко А. Д., Сдобнов В. И., Токарев Б. Б., Погребов А. И., Волкова А. А. Лазерное инициирование тэна // Физика горения и взрыва. — 1996. — Т. 32, № 4. — С. 113–119.
20. Адуев Б. П., Белокуров Г. М., Гречин С. С., Лисков И. Ю. К вопросу о возбуждении детонации в бризантных взрывчатых веществах сильноточным электронным пучком // Журн. техн. физики. — 2014. — Т. 84, № 1. — С. 61–66.
21. Адуев Б. П., Нурмухаметов Д. Р., Лисков И. Ю., Белокуров Г. М. Скорости ударных волн в воздухе при лазерном инициировании взрыва тэна и композитов тэна с включениями алюминия // Физика взрыва: теория, эксперимент, приложения: сб. тез. докл. всерос. конф. — Новосибирск: Ин-т гидродинамики СО РАН, 2018. — С. 79.

Поступила в редакцию 31.05.2018.

После доработки 30.10.2018.

Принята к публикации 17.04.2019.
