

31. Амосов А. П. Разогрев и воспламенение твердых реакционноспособных систем при высокоскоростном трении, сопровождающемся образованием пластической и жидкой прослоек//Хим. физика. 1982. № 10. С. 1401—1411.
32. Либрович В. Б. О воспламенении порохов и взрывчатых веществ//ПМТФ. 1963. № 6. С. 74—79.
33. Рыкалин Н. Н. Расчеты тепловых процессов при сварке. М.: Машгиз, 1951. 296 с.
34. Крагельский И. В. Трение и износ. М.: Машиностроение, 1968. 480 с.
35. Кудинов В. А., Толстый Д. М. Трение и колебания//Трение, изнашивание и смазка: Справочник в 2 кн. М., 1979. Кн. 2. С. 11—22.
36. Амосов А. П. Релаксационные колебания при внешнем трении//ДАН СССР. 1973. Т. 212. № 3. С. 565—572.
37. Амосов А. П. Об условиях возникновения релаксационных колебаний при внешнем трении//Машиноведение. 1975. № 5. С. 82—89.
38. Амосов А. П. Тепловая теория автоколебаний при трении со смазкой//ДАН СССР. 1979. Т. 247. № 2. С. 311—314.
39. Столин А. М., Худяев С. И. Неизотермическая неустойчивость течения вязкоупругих сред//ДАН СССР. 1972. Т. 207. № 1. С. 60—63.
40. Амосов А. П., Бостанджиян С. А., Зиненко Ж. А. Разогрев и воспламенение твердых ВВ при сдвиговом разрушении//ДАН СССР. 1973. Т. 209. № 6. С. 1361—1364.
41. Амосов А. П., Бостанджиян С. А. Релаксационный механизм локального разогрева твердых ВВ при механических воздействиях//ФГВ. 1976. № 4. С. 559—568.
42. Холево Н. А. Чувствительность взрывчатых веществ к удару. М.: Машиностроение, 1974. 136 с.
43. Амосов А. П., Муратов С. М. Воздействие на тонкий пластический слой ударом//ДАН СССР. 1977. Т. 234. № 5. С. 1051—1054.
44. Амосов А. П., Мишина В. А. К теории воздействия на тонкий пластический слой ударом//ФГВ. 1980. № 2. С. 145—147.
45. Соколовский В. В. Теория пластичности. М.: Высш. школа, 1969. 608 с.
46. Муратов С. М., Амосов А. П. и др. Иницирование жидких ВВ методом выдавливания в фильеру//Химическая физика процессов горения и взрыва. Детонация: Материалы VI Всесоюз. симпозиума по горению и взрыву (23—26 сентября 1980 г., Алма-Ата). Черногоровка, 1980. С. 43—46.
47. A. P. Amosov, B. S. Seplyarsky etc. SHS Mixture Ignition at Adiabatic Gas Compression//1993. PAC RIM. Meeting Program and Abstracts. November 7—10, 1993. Honolulu, Hawaii: ASC, 1993. P. 137.
48. Сеплярский Б. С. Воспламенение конденсированных систем при фильтрации газа//ФГВ. 1991. № 1. С. 3—12.
49. Буркина Р. С., Вилонов В. Н. О возбуждении химической реакции в «горячей точке»//ФГВ. 1980. № 4. С. 75—79.
50. Тютяев А. В., Амосов А. П., Болховитинов Л. Г. Воспламенение парогазового пузыря в жидкости//ФГВ. 1983. № 4. С. 58—62.
51. Тютяев А. В., Амосов А. П. Развитие сферического очага горения в жидкости//ФГВ. 1985. № 4. С. 48—51.
52. Марголин А. Д. Развитие очага горения в жидком ВВ//ФГВ. 1979. № 3. С. 72—77.
53. Амосов А. П. Внедрение клиновидного пуансона в пластическую массу//Математическая физика: Сб. тр. Куйбышев: КПТИ, 1979. С. 124—128.
54. Амосов А. П., Муратов С. М. Разогрев пластической массы при внедрении клиновидного пуансона//Математическая физика: Сб. тр. Куйбышев: КПТИ, 1979. С. 128—131.

УДК 614.838.4

С. П. БАЖАНОВ, А. П. АМОСОВ, В. А. МИШИНА

ДЕФОРМАЦИЯ И ВОСПЛАМЕНЕНИЕ СМЕСЕЙ МЕТАЛЛ—ОКИСЛИТЕЛЬ ПРИ НАГРУЖЕНИИ В ЗАМКНУТОМ ОБЪЕМЕ

Дается экспериментально-теоретическое обоснование модели разогрева применительно к прессованию смесей металл—окислитель при трении, учитывающей сдвигообразование в смеси и возможность выдавливания в зазор. Проводятся оценки разогрева смесей с учетом наиболее опасных деформационных процессов при высокоскоростном нагружении. Путем сопоставления разогревов и температур воспламенения смесей с учетом коэффициента безопасности даются рекомендации по безопасным скоростям нагружения образцов.

В связи с развитием технологии самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) и металлотермии возникают проблемы безопасности промежуточной технологической операции изготовления образцов из смесей металл—окислитель методом прессования. В настоящей работе приведены результаты экспериментального и теоретического исследования процессов деформации и воспламенения смесей в условиях, моделирующих прессование.

Использовались цилиндрические матрицы высотой 60 мм, наружным диаметром 40 мм и диаметром канала 10 мм. Нижний пуансон высотой 10 мм имел зазор C с матрицей 0,05 мм. Зазор между верхним пуансоном высотой 60 мм и матрицей мог быть в пределах 0,05—0,35 мм.

Торцы пуансонов либо имели острую кромку, либо фаску радиусом 1 мм. Испытания проводились в стальных матрицах и в матрицах, снабженных картонными трубками толщиной 0,7 и 1,25 мм для уменьшения теплоотвода в матрицу.

Исследовались смеси на основе циркония, магния или титана. Окислителем были или нитрат бария, или пероксид бария. Основные характеристики смесей будут приведены ниже. Смесей испытывались в насыпном или подпрессованном состоянии в виде шашки. Зазор между шашкой и матрицей составлял 0,5 мм. Масса смеси была 50—2000 мг.

В эксперименте использовался режим ударного нагружения смесей на копре К-44-П грузом массой 10 кг, время воздействия порядка 1 мс. В теоретических расчетах рассматривался также и режим медленного нагружения длительностью до 1 с. Для характеристики удара использовалась его энергия в джоулях. Уплотнение смесей осуществлялось однократными и многократными ударами, энергия которых увеличивалась с шагом 5—10 Дж. Степень опасности смесей оценивали по нижнему пределу частоты воспламенения при ударе на копре [1, 2]. Учитывался опыт работ со смесями металл—окислитель [3—7]. Для изучения процесса нагружения применялся метод тензометрирования [3]. Процесс регистрировался цифровым запоминающим двухлучевым осциллографом С8-7. Фиксация момента воспламенения осуществлялась с помощью фотодиодов ФД-10.

Копровые испытания показали, что наиболее опасными являются условия нагружения смесей в насыпном состоянии, при которых происходит выдавливание смесей в зазор между пуансоном и матрицей. При минимальном зазоре 0,05 мм воспламенение смесей наблюдалось лишь при ударе грузом со скоростью 4 м/с, т. е. с энергией удара около 100 Дж. Наличие зазора 0,35 мм и фаски на пуансоне уменьшает энергию инициирования воспламенения в несколько раз. Увеличение высоты образца с 1—2 до 15—20 мм мало сказывается на частоте воспламенения. При многократном нагружении энергия инициирования в стальных матрицах увеличивается до 65 Дж, т. е. наклеп смесей при последовательных ударах затрудняет воспламенение.

Смеси на основе магния в виде шашки при однократном нагружении в матрицах с картонной трубкой оказываются менее чувствительными (85—90 Дж). При наличии картонных трубок различной толщины энергия инициирования практически не зависит от режима нагружения ударом (однократный или многократный).

Типичные осциллограммы процесса нагружения, иллюстрирующие различный характер деформации смесей в условиях испытания, приведены на рисунке.

Первый тип осциллограмм $P(t)$ -зависимости давления от времени характеризует процесс уплотнения образца без выдавливания смеси в зазор, когда облой после испытания практически не наблюдается. На первой стадии, в основном, происходит упругопластическое уплотнение смеси до предельной плотности при значениях параметров P_1 и t_1 . На второй стадии преобладает упругое сжатие смеси в системах ударника, происходит накопление энергии в системе нагружения, и вторая часть осциллограммы напоминает холостой удар [2].

Второй тип осциллограммы характеризует процесс пластического выдавливания предварительно уплотненной смеси в зазор под действием незначительно меняющегося давления. После испытания наблюдается облой смеси в зазоре на глубине до 2 мм и более. Выдавливание в зазор можно характеризовать параметрами P_2 и t_2 . Фотодиод фиксирует воспламенение в конце процесса выдавливания (показано стрелкой на осциллограмме).

Третий тип — соответствует хрупкому разрушению уплотненной смеси и последующему выдавливанию ее в зазор при параметрах P_3 и t_3 . Воспламенение происходит при разрушении или спустя 100—200 мкс после разрушения.

Четвертый тип — наблюдается при многократном нагружении и аналогичен холостому удару. Параметры, закладываемые в расчетную модель, P_4 и t_4 . Воспламенение происходит в процессе упругой разгрузки на спадающей части кривой.

Известно, что для твердых реакционноспособных систем основной причиной воспламенения при ударе является образование очагов разогрева за счет внешнего трения [2, 4—6]. На основании этого факта и приведенных экспериментальных результатов можно предложить объяснение воспламенения рассмотренных смесей следующими источниками разогрева.

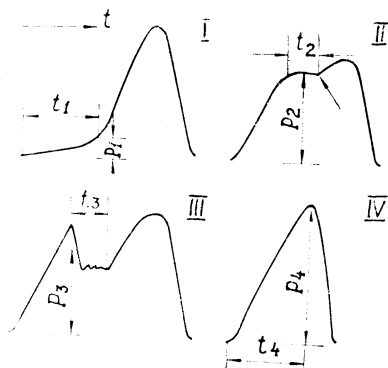
Для первого типа осциллограмм это трение боковой цилиндрической поверхности слоя смеси о матрицу при оседании слоя вместе с нижним пуансоном при упругом сжатии. Обозначим этот разогрев ΔT_1 .

Для второго типа осциллограмм — это трение смеси о матрицу в кольцевом зазоре при выдавливании облоя. Разогрев ΔT_2 . Скорость трения здесь значительно выше скорости движения пуансона:

$$v_{\text{тр}} = \frac{V}{D^2/d^2 - 1}.$$

Для третьего типа осциллограмм — это трение на поверхностях разрушения внутри слоя [8]. Разогрев ΔT_3 . Скорость трения относительного скольжения разрушенных частей [7]

$$v_{\text{тр}} = V/\sqrt{2}.$$



Типичные осциллограммы и параметры процесса деформации смесей металл-окислитель при нагружении в замкнутом объеме

Разогрев смесей при трении во всех рассмотренных случаях можно приближенно оценить по следующей простой формуле для постоянного теплового потока q_i [9]:

$$\Delta T_i = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{q_i \sqrt{t}}{\sqrt{\lambda C \rho}}, \quad (1)$$

где $i = 1, 2, 3$; t — время трения; λ — коэффициент температуропроводности; C — удельная теплоемкость; ρ — плотность смесей. Значения тепловых потоков:

$$q_1 = \alpha_{т.п} \cdot f \cdot \xi \cdot P \cdot V; \quad (2)$$

$$q_2 = \alpha_{т.п} \cdot f \cdot \xi \cdot P \cdot V / (D^2/d^2 - 1); \quad (3)$$

$$q_3 = 0,5 \tau_s \cdot V / \sqrt{2}, \quad (4)$$

где $f \cdot \xi$ — произведение коэффициентов трения и бокового давления (принимается 0,1); P — давление; V — скорость пуансона; D — диаметр канала матрицы; d — диаметр пуансона; $\alpha_{т.п}$ — коэффициент распределения тепловых потоков (равен 0,73 для пары смесь — картон); τ_s — предел прочности на сдвиг смеси. Значения указанных характеристик для использованных смесей приведены в табл. 1.

Таблица 1

Значения характеристик смесей

Смесь на основе	λ , Вт/м·К	C , Дж/кг·К	S , кг/м ³	τ_s , МПа	$\alpha_{тп}$ в паре трения со сталью	T_v , К
Магния	0,9	1100	3070	150	0,12	623
Титана	1,15	730	3220	100	0,11	673
Циркония	1,15	440	1850	185	0,10	473

В табл. 1 также приведены значения температуры воспламенения смесей T_v , определенной в стандартных условиях при 10-минутной задержке. Эта температура необходима для сопоставления с величинами разогрева смесей в рассматриваемых условиях.

Формула (1) использовалась для оценки разогрева смесей в условиях испытаний. Параметры механического воздействия брались из экспериментальных зависимостей $P(t)$. Для облегчения многократных расчетов использовалась микроЭВМ с распечаткой результатов расчетов. Некоторые результаты приведены в табл. 2. Сравнение расчетных значений со стандартными температурами воспламенения T_v исследованных смесей, несмотря на некоторую условность такого сравнения (импульсный и длительный нагрев), показывает на удовлетворительное соответствие результатов и может служить подтверждением предложенных модельных представлений.

Разработанная программа счета разогревов использовалась для прогнозирования безопасных режимов медленного нагружения. Результаты расчета показывают, что значительные разогревы возникают за счет длительности процесса трения при нагружении. Наименьшие разогревы ($\Delta T_1 = 1-100$ К) получаются на стальной матрице на первой стадии нагружения. Замена стальной матрицы на картонную трубку дает на порядок больший разогрев ΔT_1 . Значительно большие

разогревы, соизмеримые с T_v , получаются при образовании поверхности трения в смеси, что находится в соответствии с экспериментальными результатами об эффективности процесса трения внутри смеси, получаемыми в условиях копровых испытаний [9]. Существенные разогревы получаются и при выдавливании смеси в зазор. Задаваясь двухкратным коэффициентом безопасности [10], по температуре можно выделить безопасные режимы переработки, которые составляют для смеси на основе магния (нагружение в картонную трубку) — 0,17 мм/с, смеси с цирконием — 5 мм/с, смеси с титаном — 30 мм/с.

Таблица 2

Значения разогревов смесей при динамическом нагружении

Смесь на основе	Параметры механического воздействия					Значения разогревов, $\Delta T_i K$	Результат
	i	P_i , МПа	V , мм/с	t_i , с	C , мм		
Магния (картонная трубка)	1	924	3720	540	0,05	1017	Воспламенение
	2	424	3420	$2,5 \cdot 10^{-4}$	0,35	2200	Воспламенение
	1	400	3420	$2,4 \cdot 10^{-3}$	0,05	220	Отказ
Титана	1	254	4450	$1,1 \cdot 10^{-3}$	0,05	282	Отказ
	1	289	4450	$1,2 \cdot 10^{-3}$	0,05	335	Отказ
	2	500	4450	$1,1 \cdot 10^{-4}$	0,35	672	Воспламенение
Циркония	2	432	4220	$1,5 \cdot 10^{-4}$	0,35	1330	Воспламенение
	3	592	4220	$4,35 \cdot 10^{-4}$	0,35	1256	Воспламенение
	2	280	4450	$3,5 \cdot 10^{-4}$	0,35	160	Отказ
	1	504	4220	$3,4 \cdot 10^{-3}$	0,05	104	Отказ

Примечания. 1. Воспламенение смесей на основе титана и циркония происходило в зазоре, не распространяясь на весь образец из-за толщины слоя меньше критической, а смесь на основе магния сгорала после отскока груза.

2. При определении разогрева ΔT_2 время затекания в зазор принималось равным времени образования обоя высотой 2 мм при скоростях затекания в зазор $V_3 = V/(D^2/d^2 - 1)$.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Андреев К. К., Беляев А. Ф. Теория взрывчатых веществ. М.: Оборонгиз, 1960. 513 с.
2. ГОСТ 4545-88. Вещества взрывчатые. Методы определения чувствительности к удару. М.: Госстандарт, 1988.
3. Бажанов С. П., Лапшина И. А., Гидаспова Е. Х., Капцилович В. К. и др. Иницирование горения экзотермических смесей вспышкой от удара//ФГВ. 1992. 28. №3. С. 26—29.
4. Бажанов С. П., Лапшина И. А., Амосов А. П. Чувствительность и пожароопасность смесей для СВС при воздействии ударом//ФГВ. 1992. 28. №5. С. 54—58.
5. Бажанов С. П., Гидаспова Е. Х., Муратов С. М. и др. Чувствительность к удару смесей металл-окислитель//ФГВ. 1988. 24. №5. С. 106—110.
6. Муратов С. М., Бажанов С. П., Гидаспова Е. Х. и др. Деформация и возбуждение взрыва смесей металл-окислитель при воздействии ударом и трением//ФГВ. 1985. 21. №4. С. 123—126.
7. Муратов С. М., Постнов С. И., Бажанов С. П. и др.//Первый Всесоюзный симпозиум по макрокинетике и химической газодинамике; Тез. докл. Черногоровка, 1984. Т. 2. С. 128—129.
8. Афанасьев Г. Т., Боболев В. К. и др. Разрушение и инициирование тонкого слоя при ударе//ФГВ. 1975. 11. №3. С. 467—475.
9. Амосов А. П. Теория разогрева взрывчатых веществ при трении: Учеб. пособ. Куйбышев, 1984. 79 с.
10. ГОСТ 12.1.010-76. Взрывобезопасность. Общие требования.