

УДК 662.215.5

С. И. Воронков, Л. Я. Кашипов, Н. В. Обезьяев,
Ю. Е. Шелудяк, В. Н. Цалков

**ВОСПЛАМЕНЕНИЕ УДАРОМ ДВУХКОМПОНЕНТНЫХ СМЕСЕЙ
МАГНИЙ — ОКИСЛИТЕЛЬ**

Экспериментально исследовано влияние на условия воспламенения ударом толщины слоя смеси, массы груза копра, жесткости системы нагружения копра и диаметра бойка. Изучены деформационные процессы, предшествующие воспламенению слоя смеси при ударе. Определены наиболее опасные условия воспламенения ударом при различном соотношении компонентов в смесях. Полученные экспериментальные закономерности обобщены на основе анализа особенностей образования и воспламенения локального очага разогрева в слое металлизированной смеси при ударе. Обоснован новый критерий оценки чувствительности к удару металлизированных смесей.

Различая в методах определения чувствительности [1, 2] обуславливают противоречивость экспериментальных данных [3—5] о воспламенении ударом металлизированных гетерогенных конденсированных систем (МГКС) и приводит к необходимости исследования закономерностей воспламенения ударом и обоснования метода и критерия классификации МГКС по степени относительной опасности.

Характеристики чувствительности твердых ВВ определяются особенностями образования и воспламенения очагов разогрева в слое ВВ при ударе, которые зависят от физико-механических, теплофизических и химических свойств ВВ, конструкции копра и прибора [6]. По своим свойствам МГКС значительно отличаются от ВВ, что требует специального рассмотрения закономерностей их воспламенения.

Исследовался простейший и наиболее изученный класс МГКС — двухкомпонентные смеси порошка магния с окислителями, имеющими различные температуры плавления и воспламенения ($T_{пл}$, $T_{в}$) и условные температуры начала разложения ($T_{разл}$) на воздухе и в смесях с магнием (табл. 1). Использовался полидисперсный порошок Mg с частицами неправильной формы со среднеситовым размером 76 мкм. Для всех окислителей, кроме хлората калия, размер частиц окислителя примерно

Т а б л и ц а 1

Окислитель	$T_{пл}$, °С	$T_{разл}$, °С	ρ , кг/м ³	c , Дж/(кг·К)	λ , Вт/(м·К)	$T_{в}$, °С
Нитрат натрия	310	520 *	2260	1040	1,40	426
Нитрат калия	335	628 *	2110	950	0,72	510—540
Нитрат бария	595	605 *	3240	570	0,63	430
Перекись бария	450	400	5000	415	1,30	375—430
Перхлорат калия	580	619 *	2520	783	0,52	505
Хлорат калия	360	350	2320	829	0,62	505
Карбонат кальция	—	500	2710	888	1,40	700
Фторопласт-4	327	415	2250	1000	0,24	410
Гексахлорбензол	230	114	2043	670	0,3	—

П р и м е ч а н и е. ρ , c , λ — плотность, теплоемкость и теплопроводность окислителя. Звездочкой отмечена температура легкого кипения расплавов.

Таблица 2

Окислитель	α	Mg, %	λ , Вт/(м·К)	c , Дж/(кг·К)	ρ , кг/м ³	σ , МПа	$P_{кр}$, МПа	$D_{кр}$, мм	W^* , Дж
Нитрат натрия	α_H	85	63	1027	1802	255	1050	4,0	8,75
	α_u	70	39	1030	1869	240	950	4,0	4,0
	1	41	14	1034	2013	235	800	3,0	2,48
	α_B	17	3,8	1037	2151	200	660	6,0	8,61
Нитрат калия	α_H	80	46	1010	1803	175	680	6,0	9,6
	α_u	67	30	1000	1847	160	550	4,0	4,5
	1	38	9,4	978	1952	135	590	4,0	2,93
	α_B	29	5,7	972	1987	85	630	8,0	10,5
Нитрат бария	α_H	81	56	939	1908	245	1000	2,5	4,2
	1	46	21	779	2320	245	810	2,5	1,96
Перекись бария	1	14	6,7	500	3961	265	950	2,5	4,2
Перхлорат калия	α_H	81	49	979	1848	220	790	2,5	3,0
	1	41	13	882	2129	200	690	2,5	0,85
Хлорат калия	α_H	75	41	979	1856	205	750	4,0	4,79
	1	35	8,7	898	2078	145	680	3,0	1,5
Карбонат кальция	1	33	12	888	2289	260	960	6,0	11
Фторопласт-4	1	32	1,6	1008	2057	—	380	8,0	4,1
Гексахлорбензол	1	20	0,56	741	1974	—	—	25	65

Примечание. α — коэффициент избытка окислителя, α_H , α_B — соответствуют нижнему и верхнему концентрационному пределам горения соответственно, $\alpha = 1$ — стехиометрическая смесь; α_u — смесь с максимальной скоростью горения; ρ — плотность при нулевой пористости.

соответствовал размеру частиц горючего, а для хлората калия был примерно в 2—3 раза больше.

Неорганические окислители (кроме карбоната кальция) на начальных стадиях разлагаются с выделением газообразного кислорода [3, 7, 8], для карбоната кальция характерно выделение окиси углерода [9]. Разложение фторопласта-4 протекает с образованием фтора, а гексахлорбензола — хлора. Температура воспламенения порошка магния на воздухе (от 420 до 630 °С [3, 10]) ниже $T_{пл}$ (650 °С) и может быть ниже или выше $T_{пл}$ и $T_{разл}$ окислителей. В среде окиси углерода $T_v = 710$ °С [11].

Теплофизические свойства исследуемых смесей, приведенные в табл. 2, рассчитаны на основании обобщения результатов измерений теплоемкостей методом монотонного разогрева на приборе ИТ-С-400 и измерений теплопроводности на установке, в которой использованы закономерности регулярного режима первого рода [12].

Воспламенение ударом исследовали на вертикальном копре с массой груза 10 кг в приборе со свободным истечением вещества в незамкнутый объем при диаметре роликов $D = 10$ мм и толщине слоя от 0,1 до 3,0 мм (масса пробы от 30 до 500 мг). Измеряли энергию удара W , соответствующую 50%-ной частоте воспламенений, которую находили по методу «вверх — вниз» либо по методу двух и более уровней. Погрешность определения W не превышала 2 Дж. Напряжения, возникающие в роликах при ударе, измеряли тензометрическим методом [6] с погрешностью менее 7%. Момент воспламенения определяли по сигналу от фотоприемника.

Установлены зависимости (рис. 1) энергии удара W от начальной толщины h_n слоя смеси (массы пробы). По характеру зависимости $W(h_n)$ испытанные смеси могут быть разделены на две группы с одним и несколькими локальными минимумами. К первой группе относятся составы с нитратом натрия и калия, хлоратом калия, карбонатом каль-

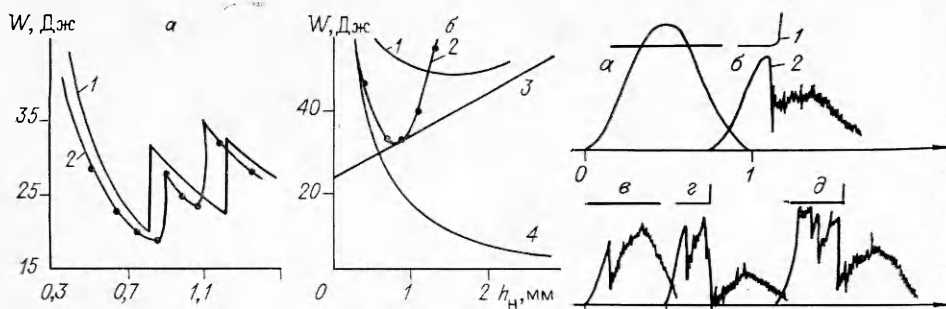


Рис. 1. Характерные экспериментальные и расчетные зависимости $W(h_n)$.

a — смесь с нитратом натрия ($\alpha = 1$); b — смесь с перхлоратом калия (α_n); 1 — расчет; 2 — эксперимент; 3 — $W_{пл}$; 4 — $W_{упр}$.

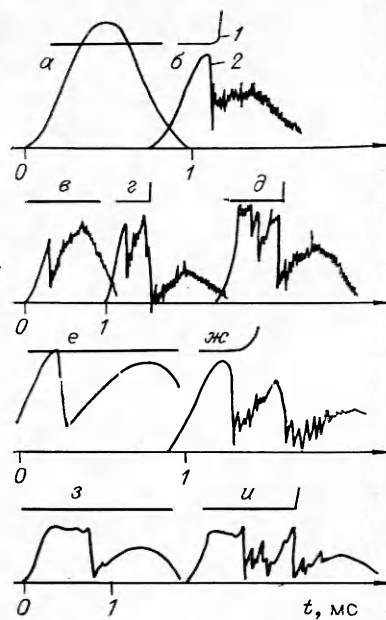


Рис. 2. Характерные тензограммы для «мокрых» смесей с нитратом натрия ($a - \partial$) и хлоратом калия ($z - u$) ($\alpha = 1$).

h_n , мм: $a, б - 0,38$, $в, г - 0,89$, $д - 1,27$, $e, ж - 0,98$, $з, и - 1,53$; W , Дж: $a, б - 37,5$, $в - 27,5$, $г, д, и - 30$, $e - 20$, $ж - 22,5$, $з - 25$; 1, 2 — сигналы с фотоприемника и тензодатчика соответственно.

ция, фторопластом, гексахлорбензолом. У наиболее легкоплавкого компонента $T_{пл} < T_v$. Эти смеси условно названы «мокрыми» (к моменту воспламенения один из компонентов частично находится в жидком состоянии). Ко второй группе относятся смеси магния с нитратом бария, перхлоратом калия и перекисью бария. В этом случае для обоих компонентов $T_{пл} > T_v$ и смеси условно названы «сухими».

Для «мокрых» составов при увеличении h_n от 0,1 мм до соответствующей первому минимуму h_1 значение W уменьшается в несколько раз. При этом ослабевает звуковой эффект и менее заметны следы горения на торцах роликов. При $h_n = h_1$ в случае воспламенения следы горения на торцах роликов обычно отсутствуют и выгорает только часть пробы, вышедшая за пределы торцов роликов, т. е. очаг воспламенения находится на краю ролика. Дальнейшее увеличение h_n на 0,05—0,1 мм до h_1 приводит к резкому ухудшению условий воспламенения и возрастанию W в 1,5—2 раза. Одновременно усиливается звуковой эффект и выгорает значительная часть смеси между роликами. Последующий рост h_n уменьшает W .

«Мокрые» смеси воспламеняются во время разрушения (рис. 2) после достижения в системе нагружения копра давления [6]

$$P_{разр} = \sigma \left(1 + \frac{D}{3\sqrt{3}h_n} \right), \quad (1)$$

где σ — предел прочности смеси.

Если энергия удара недостаточна для достижения $P_{разр}$, то смесь не воспламеняется (рис. 2, a). При увеличении толщины слоя снижается $P_{разр}$ и уменьшается энергия, достаточная для воспламенения. Однако при $h_n > h_1$ первого разрушения уже мало и необходимо повторное разрушение слоя (см. рис. 2, $в, г$). При $h_n > h_2$ слой воспламеняется в результате многократных разрушений (см. рис. 2, $д$).

Для классификации ВВ по чувствительности к удару используется критическое давление первого разрушения $P_{кр}$ [6]. Если $P_{разр} < P_{кр}$, инициирования ВВ не происходит. При воспламенении «мокрых» смесей давление повторных разрушений не превосходит критического давления первого разрушения $P_{кр}$.

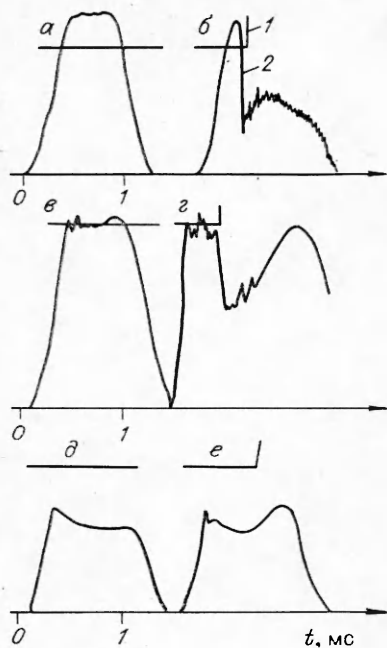


Рис. 3. Характерные тензограммы для «сухих» смесей с перхлоратом калия при $\alpha = 1$ (а—в) и α_n (д, е).

h_n , мм: а, б — 1,2, в, г — 1,5, д — 1,38; W, Дж: а — 20, б — 22,5, в — 25, г — 32,5, д — 50, е — 60.

При $h_1 < h_n < h_1$ для большинства смесей рост W обусловлен вероятностным характером процесса: в результате первого разрушения воспламенение может произойти или не произойти. Хлорат калия воспламеняется после первого разрушения с некоторым периодом индукции, уменьшающимся при увеличении W . Если энергия удара недостаточна для повторного разрушения, то период индукции стремится к бесконечности, а при $W = W(h_1)$ он составляет ~ 100 мкс (рис. 2, е, ж). У смесей с хлоратом калия первому разрушению толстого слоя предшествует достаточно длительная пластическая деформация при почти постоянном давлении, а воспламеняются они во время повторного разрушения (рис. 2, з, и).

Для «сухих» составов на зависимости $W(h_n)$ существует только один минимум при $h_n = h^*$ (см. рис. 1, б). С увеличением толщины до h^* величина W уменьшается в несколько раз, ослабевает звуковой эффект, снижается площадь следов горения на торцах роликов. Начиная с h^* следы горения практически отсутствуют, хотя воспламенение сопровождается значительным световым эффектом, а для некоторых смесей и звуком.

В случае отказа при $h_n < h^*$ конечная высота слоя практически совпадает с начальной, а при $h_n > h^*$ возможна значительная деформация слоя даже при отказе, и на тензограммах наблюдаются участки пластической деформации слоя (рис. 3, а, б). Обычно воспламенение происходит во время разрушения слоя смеси. Для состава с перхлоратом калия при $\alpha = \alpha_n$ наблюдалось воспламенение в процессе пластической деформации (рис. 3, д, е). Во всех случаях давление в системе нагружения копра может быть значительно ниже, чем критическое при $h_n = h^*$.

Следовательно, для МГКС на основе магния минимум на зависимости $W(h_n)$ обусловлен особенностями образования локальных очагов разогрева, воспламеняющихся на краю ролика, а не критическим давлением разрушения, необходимым для повышения $T_{пл}$ наиболее легкоплавкого компонента до T_v . Поэтому ряд чувствительности, формально построенный по $p_{кр}$, не соответствует опасности смесей, т. е. значение $p_{кр}$ не может быть использовано в качестве критерия оценки чувствительности исследованных смесей.

С целью обоснования критерия оценки чувствительности МГКС к удару исследовано влияние на воспламенение жесткости системы нагружения копра, массы груза и диаметра бойка. Если уменьшить высоту колонны роликов с 62 до 42 мм или использовать прибор для изучения распространения горения за пределы бойка с диаметром бойка 10 и высотой 12 мм, то характер зависимостей $W(h_n)$ сохранится для обеих групп смесей; при этом на 2—3 Дж понизятся минимумы. Уменьшение массы груза в 2 раза практически не влияет на энергию воспламенения ударом.

Наиболее сильно влияет на воспламенение диаметр бойка a . С целью изучения условий распространения горения за пределы бойка использовали прибор с диаметром опорного ролика 10 мм и диаметром бойка $a = 1,6; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0$ и 6,0 мм (высота 12 мм). При уменьшении a

характер зависимостей $W(h_n)$ сохраняется, что говорит о едином механизме воспламенения «сухих» и «мокрых» смесей при разных бояках. Однако, если значение a меньше критического, воспламенить смесь ударом не удастся, хотя при этом может наблюдаться искрение без распространения горения. При большем a и той же или даже меньшей энергии удара смесь воспламеняется. Например, для состава с нитратом натрия ($\alpha = 1$) при $a = 3$ мм $W^*(m = 30 \text{ мг}) = 2,48$ Дж, в то время как при $a = 2,5$ мм не удалось воспламенить смесь при $W = 3$ Дж.

Наименьшее значение минимума на зависимостях $W(h_n)$ получается при $a_{кр}$. Эти условия следует рассматривать как наиболее опасные, так как здесь энергия, достаточная для воспламенения, минимальна. При изготовлении, хранении и транспортировке смеси характерный размер зоны механического воздействия и энергия удара могут иметь различные значения. Если энергия удара ниже, чем $W^* = \min W(h_n, D)$, то воспламенения не будет при любом сочетании условий удара. Поэтому W^* может быть принята в качестве критерия чувствительности.

По величине W^* наиболее чувствительны стехиометрические составы (табл. 2), причем наименьшие значения W^* имеют стехиометрические смеси с перхлоратом и хлоратом калия, отличающиеся повышенной опасностью. Если же судить о чувствительности к удару по результатам измерений при фиксированных диаметре бойка и массе пробы, то всегда можно подобрать такие нестехиометрические составы, которые воспламеняются при меньшей энергии удара, чем стехиометрические.

Для объяснения полученных результатов рассмотрим условия образования и воспламенения локальных очагов разогрева. Исследованиями микроструктуры образцов установлено, что частицы магния в результате воздействия ударом приобретают оладеобразную форму и увеличивают удельную поверхность, не разрушаясь. Частицы окислителя во время удара могут разрушаться.

Трение частиц о поверхность воздействующего тела (ролика) приводит к их разогреву. За характерное время разрушения при ударе (20 мкс) в магнии образуется прогретый слой толщиной 42 мкм, что примерно соответствует размеру деформированной частицы, а в окислителе — 1—6 мкм. Поэтому гетерогенность смеси оказывает существенное влияние на условия образования и воспламенения локального очага разогрева. Очагом разогрева и воспламенения в слое МГКС при ударе является отдельная частица или совокупность мелких частиц магния, находящихся в «кармане» между крупными частицами окислителя, с прилегающим к ним тонким слоем окислителя, в котором при его прогреве начинается выделение продуктов разложения, вступающих в реакцию с металлом.

Даже при умеренных скоростях трения ($V = 10$ м/с) оценка разогрева на поверхности частицы размером d , когда удельная сила трения равна $\tau_ч$ (пределу прочности на сдвиг материала частицы), по соотношению [13]

$$\max \Delta T_s = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{\gamma \tau_ч d}{\lambda_{ст} \sqrt{Re_{ст}}}$$

дает для магния значение 685 К, а для окислителя — 400 К. Здесь $Re_{ст} = V_d/a_{ст}$ — число Пекле; $\gamma = (1 + \lambda_ч \sqrt{Re_{ст}/4\lambda_{ст}^{-1}})$ — коэффициент распределения тепловых потоков, индекс ст относится к стали. Причем, как следует из работы [13], этот разогрев достигается при перемещении частиц относительно поверхности ролика на расстояние $S > 3d$, что составляет ~200 мкм, т. е. в самом начале деформации слоя ударом на поверхности трения достигается достаточно высокая температура, на которую слабо влияет плавление соседней частицы.

При $a < a_{кр}$ наблюдается искрение — только высокой температуры на поверхности трения не достаточно для воспламенения. В случае воспламенения перемещение частиц компонентов относительно поверхности

ролика значительно больше $3d$. По-видимому, после достижения на поверхности трения максимального разогрева начинается прогрев частицы до температуры, при которой на всей или большей части поверхности частицы магния интенсивно протекают химические реакции взаимодействия с продуктами разложения окислителя. Учитывая малую толщину прогретого слоя в окислителе, прилегающем к металлической частице, ее разогрев от трения в течение 20–50 мкс в условиях интенсивной деформации слоя можно считать близким к адиабатическому:

$$\Delta T_{Mg} = \left(\frac{\gamma}{c\rho d} \right)_{Mg} \tau S, \quad (2)$$

где c и ρ — теплоемкость и плотность.

В критических условиях $\Delta T_{Mg} = T_{кр} - T_n - \Delta T_v$, $T_{кр}$ — критическая температура очага; T_n — начальная температура; ΔT_v — среднеобъемный разогрев слоя ($\Delta T_v = (\sigma/c\rho) \ln(h_n/h_k)$); h_k — конечная высота слоя [6]. Значение $T_{кр}$ соответствует точке неустойчивого теплового равновесия на диаграмме Семенова, на которой химический источник обусловлен реакциями разложения окислителя и взаимодействия горючего с продуктами разложения окислителя, а интенсивность теплоотвода от очага из-за малости толщины простойки окислителя между соседними частицами Mg может быть определена как $q_- = \lambda_{ок} \Delta T_{Mg} / h_{ок}$ ($h_{ок}$ — толщина прослойки окислителя). Особенность химического источника тепловыделения смесей с эндотермически разлагающимися окислителями заключается в том, что при низкой $T_{кр}$ значения $q_{хим} \leq 0$ до температуры начала интенсивного окисления магния, а при высокой — $q_{хим} \approx 0$ до появления продуктов разложения окислителя. По термокинетическим константам окисления магния на воздухе и в кислороде [14] получена $T_{кр} = 580 \div 780^\circ\text{C}$.

Учитывая, что $h_{ок}$ растет с увеличением содержания окислителя в смеси, величина $T_{кр}$ должна убывать, т. е. наименьшую $T_{кр}$ имеют смеси с максимальным содержанием окислителя, а наибольшую — с минимальным. Разница в температурах может составлять несколько характерных интервалов ($RT_{кр}^2/E = 20 - 50 \text{ K}$).

Для распространения горения за пределы очага необходимо, чтобы запас тепла в нем был больше избытка энтальпии в прогретом слое при стационарном горении [15]. Наименьший избыток энтальпии имеют стехиометрические смеси, поэтому у них наименьший критический путь трения. При оценке критического пути трения по (2) в качестве $T_{кр}$ может быть принята температура воспламенения слоя смеси. С одной стороны, из-за малых размеров очага она должна быть выше, а с другой — механоактивация и высокие давления, развиваемые при ударе, снижают ее. Оценки критического перемещения частиц компонентов по температуре воспламенения для $d = 75 \text{ мкм}$ дают $S_{кр} = 0,5 - 2 \text{ мм}$, что примерно вдвое меньше критического диаметра бойка.

Минимизировать энергию опасного ударного воздействия удастся на основании двух простых деформационных моделей. При осесимметричной деформации ударом условие $S \geq S_{кр}$ эквивалентно соотношению $h_k \leq h_n (1 - 2S_{кр}/D)^2$. Если пластическая деформация слоя устойчива, на нее необходимо затратить энергию

$$W_{пл} = \left[(D - S_{кр}) S_{кр} h_n - \frac{D^3}{6\sqrt{3}} \ln(1 - 2S_{кр}/D) \right] \pi \sigma.$$

Пластическая деформация слоя завершается при некотором давлении, для достижения которого в системе нагружения копра нужна энергия:

$$W_{упр} = \frac{1}{2G} \left[\frac{\pi D^2}{4} \sigma \left(1 + \frac{D}{3\sqrt{3}h_{н}} (1 - 2S_{кр}/D)^{-2} \right) \right]^2,$$

где G — жесткость копра. Металлизированные смеси обладают высоким модулем упругости, поэтому упругая энергия, запасаемая в слое, значи-

тельно меньше энергии упругой деформации копра, и ее можно не учитывать. Общая энергия удара, способного воспламенить слой, $W \geq W_{\text{упр}} + W_{\text{пл}}$.

На рис. 1, б сопоставлен расчет с экспериментом, теоретическая кривая проходит выше экспериментальной. Расхождение (в тонком слое) обусловлено неустойчивостью пластической деформации — на деформацию слоя затрачивается энергия, запасенная в системе нагружения копра к началу пластической деформации. В толстом слое, когда возможно его воспламенение без разрушения из-за увеличения длительности деформации, предшествующей воспламенению, растут потери тепла от очага, что приводит к увеличению $S_{\text{кр}}$. Несмотря на различия, всегда $W(h_{\text{н}}) \geq W_{\text{пл}}(h_{\text{н}})$, что позволяет провести анализ влияния различных факторов на условия воспламенения ударом. В наиболее опасных условиях $D_{\text{кр}} = 2,35 S_{\text{кр}}$, $\min W = 7,47 S_{\text{кр}}^3 \sigma$.

Пластическая деформация «мокрых» смесей из-за низкой температуры плавления одного из компонентов менее устойчива и в широком диапазоне высот сопровождается разрушением слоя. Рассмотрим модель деформации, в которой первое разрушение копра происходит после достижения в системе нагружения копра давления $p_{\text{разр}}$, определяемого соотношением (1). Если энергия удара достаточно высока, то повторное и последующие разрушения происходят при том же давлении. В этом случае условие $S \geq S_{\text{кр}}$ выполняется после N -го спада давления от $p_{\text{разр}}$ до нуля:

$$N = 1 + \text{INT} \left[\frac{16GS_{\text{кр}}h_{\text{н}}}{\pi D^3 \sigma} \left(1 - \frac{S_{\text{кр}}}{D}\right) \left(1 + \frac{D}{3\sqrt{3}h_{\text{н}}}\right)^{-1} \right].$$

Зависимость энергии опасного удара от толщины слоя смеси

$$W = \frac{N}{2G} \left[\frac{\pi D^2}{4} \sigma \left(1 + \frac{D}{3\sqrt{3}h_{\text{н}}}\right) \right]^2$$

практически совпадает с экспериментальной (см. рис. 1, а). В наиболее опасных условиях при $G \rightarrow \infty$ $D_{\text{кр}} = 2S_{\text{кр}}$, $\min W = 1,6S_{\text{кр}}^3 \sigma$.

Из обеих моделей следует, что в наиболее опасных условиях $W \sim S_{\text{кр}}^3 \sigma$. С учетом значащих факторов это согласуется с π -теоремой. Учитывая, что $S_{\text{кр}} \approx D_{\text{кр}}/2$, получаем

$$W^* = B\sigma D_{\text{кр}}^3, \quad (3)$$

где $B = 0,58$ для «сухих» смесей и $0,2$ для «мокрых». Оценки по соотношению (3) удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными табл. 2. Например, для смеси с нитратом натрия ($\alpha = 1$) оценка дает $1,27$ Дж, а в эксперименте $W^* = 2,48$ Дж. Критический диаметр бойка может быть оценен из соотношения (2). Так, для рассмотренной смеси $S_{\text{кр}} = 1$ мм, $D_{\text{кр}} = 2$ мм (в эксперименте $D_{\text{кр}} = 3$ мм).

Таким образом, для сравнения смесей по воспламеняемости следует использовать минимальную энергию удара, приводящую к воспламенению в наиболее благоприятных условиях. Противоречие же между экспериментальными данными объясняется тем, что в работах [3, 5] не определялись наиболее опасные условия воспламенения ударом, т. е. эти данные не могут быть использованы для сравнения смесей по чувствительности и относительной опасности. Действительно, полученные значения энергии опасного удара значительно ниже приведенных в работах [3, 5], что является следствием корректного определения наиболее опасных условий воспламенения, в которых энергия удара имеет наименьшее значение.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рекомендации по перевозке опасных грузов. Испытания и критерии.— Нью-Йорк, 1987.— 199 с.
2. ГОСТ 4545-88. Вещества взрывчатые. Метод определения чувствительности к удару.

3. Шидловский А. А. Основы пиротехники.— М.: Машиностроение, 1973.— 320 с.
4. Бажанов С. П., Гидасова Е. Х., Муратов С. М. Чувствительность к удару смесей металл-окислитель // ФГВ.— 1988.— 24, № 5.— С. 106—110.
5. Hariwing T. Quantification of the degree of hazard of pyrotechnic compositions // Proc. 7th Int. Pyrotechnics Seminar, Vail, Colorado, July 14—18, 1980.— P. 878—897.
6. Афанасьев Г. Т., Боболев В. К. Иницирование твердых взрывчатых веществ ударом.— М.: Наука, 1968.— 167 с.
7. Блинов И. Ф. Хлоратные и перхлоратные взрывчатые вещества.— М.: Оборонгиз, 1941.— 102 с.
8. Gordon S., Campbell C. Differential thermal analysis of the inorganic compounds. Nitrates and perchlorates of the alkali and alkaline earth and their subgroups // Analytical Chemistry.— 1955.— 27, N 7.— P. 1802—1409.
9. Есин О. А., Гульд П. В. Физическая химия пирометаллургических процессов.— М.: Металлургия, 1966.— Т. 2.— 703 с.
10. Брейтер А. А., Мальцев В. М., Попов Е. П. Модели воспламенения металлов // ФГВ.— 1977.— 13, № 4.— С. 558—570.
11. Горбунов В. В., Хромов В. Г., Шидловский А. А. Об окислительной активности водяного пара, СО и СО₂ по отношению к порошкам магния и алюминия // ЖПХ.— 1971.— Вып. 4.— С. 727—734.
12. Кондратьев Г. М. Тепловые измерения.— М.; Л.: Машгиз, 1957.— 610 с.
13. Амосов А. П., Бостанджиян С. А., Володин В. П. и др. Воспламенение твердых ВВ под действием тепловыделения на пятнах фактического касания при сухом трении // ФГВ.— 1978.— 14, № 5.— С. 114—120.
14. Кофстад П. Высокотемпературное окисление металлов.— М.: Мир, 1969.— 320 с.
15. Амосов А. П. Об условиях распространения горения за пределы очага воспламенения // Докл. АН СССР.— 1978.— 243, № 4.— С. 673—676.

г. Загорск

Поступила в редакцию 14/V 1990,
после доработки — 21/XII 1990

УДК 662.61 : 532.582 : 620.1931

А. Н. Вишняков

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ВРЕМЕНИ ВОЗГОРАНИЯ ЧАСТИЦ, ОБРАЗУЮЩИХСЯ ПРИ РАЗРУШЕНИИ МЕТАЛЛА В КИСЛОРОДЕ

Для оценки порядка величины времени возгорания металлических частиц с чистой (не покрытой пленкой оксида) поверхностью, образующихся при разрушении металла в атмосфере газообразного кислорода, в одном частном случае проведены измерения интервала времени от момента образования частиц до появления заметного излучения в видимой области спектра, который в данной работе рассматривается как характерное время возгорания частиц. Исследуемые частицы создавались пробиванием листовой мишени из нержавеющей стали (12Х18Н9Т) цилиндрическим ударником из того же материала, летящим со скоростью ~640 м/с. Эксперименты проводились в кислороде при комнатной температуре и атмосферном давлении. Это давление было минимальным, при котором наблюдалось возгорание исследованных частиц. Измерения показали, что в условиях проведенных экспериментов время возгорания частиц нержавеющей стали с чистой поверхностью меньше ~1 мкс.

1. При механическом разрушении металлов могут образовываться мелкие частицы разрушаемого металла. Пример такого явления представлен на рис. 1, где приведена теневая фотография, полученная в атмосферном воздухе через 64 мкс после пробивания ударником из сплава 12Х18Н9Т листовой мишени из этого же материала. Эффективное время экспозиции ~10⁻⁷ с, скорость ударника $v = 541$ м/с. При пробивании плоской мишени 1 цилиндрический ударник 4 выбивает из нее диск 3, который летит впереди ударника. Поскольку величина v больше скорости звука c , перед ударником и диском возникает головная ударная волна 2, отражение которой 6 вместе с другими возмущениями наблюдается справа от мишени. В кольцевой зоне разрушения мишени образуется большое количество мелких частиц металла, разлетающихся в обе стороны от мишени. На фотографии они наблюдаются в виде темных зон 5 с переменной плотностью почернения. В областях этих зон, где плотность почернения достаточно мала, частицы невозможно отличить друг от дру-