

ЛИТЕРАТУРА

1. Дерibas А. А., Нестеренко В. Ф., Тесленко Т. С. Универсальная зависимость параметров упрочнения от интенсивности ударно-волнового воздействия // ФГВ.— 1982.— 18, № 6.— С. 68—74.
2. Соболенко Т. М., Тесленко Т. С. Совместное влияние ударных волн и пластической деформации на свойства металлов: Тр. X Междунар. конф. по высокоэнергетическому воздействию на материалы.— Любляна (СФРЮ), 1989.— С. 814—818.
3. Соболенко Т. М., Тесленко Т. С. Действие ударных волн на текстурированный прокат и крупнозернистые металлы // ФГВ.— 1973.— 9, № 2.— С. 315—322.
4. Курдюмов Г. В., Утевский Л. М., Энтин Р. И. Превращения в железе и стали.— М.: Наука, 1977.— С. 238.
5. Пашков П. О., Гелунова З. М. Действие ударных волн на закаленные стали.— Волгоград: Ниж.-Волж. кн. изд-во, 1969.— С. 165.
6. Дерibas А. А., Нестеренко В. Ф., Першин С. А. и др. Взрывное прессование быстроокаленных порошков хромистой стали: Тр. VI Междунар. симп. «Использование энергии взрыва для создания материалов с новыми свойствами».— Пардубице (ЧССР), 1988.— С. 402—409.
7. Рыбин В. В. Большие пластические деформации и разрушение металлов.— М.: Металлургия, 1986.— С. 224.
8. Конева Н. А., Козлов Э. В. Физическая природа стадийности пластической деформации // Изв. ВУЗов. Физика.— 1990.— № 2.— С. 89—106.
9. Губарева Н. В., Киселев А. Н., Соболенко Т. М. и др. Структура и свойства металлов после многократных ударных нагружений // Физические проблемы импульсной обработки металлов и сплавов.— Куйбышев, 1988.— С. 99—107.
10. Горшков Н. Н., Иванов Е. Ю., Пластинин А. В. и др. Взрывное компактирование аморфного порошка Cu—Sn, полученного методом механического сплавления // ФГВ.— 1989.— 25, № 2.— С. 125—129.
11. Губарева Н. В. Исследование тонкой структуры меди после многократного взрывного нагружения // Механика быстропротекающих процессов.— Новосибирск, 1984.— С. 42—46.
12. Mogilevsky M. A. Shock front in crystal: Simulation and experiment // J. de Physique.— 1988.— 49. Coll. C3, N 9.— P. 467—475.
13. Исхаков Р. С., Кирко В. И., Кузовников А. А. и др. Изменение электрических и магнитных характеристик аморфных сплавов на основе Fe и Co вследствие ударного нагружения: Тр. Междунар. семинара по высокоэнергетической обработке быстроокаленных материалов.— Новосибирск, 1989.— С. 127—131.

г. Новосибирск

Поступила в редакцию 3/II 1991,
после доработки — 23/IV 1991

УДК 532.529.5 + 541.126

Е. В. Петухова, А. В. Федоров

ВОСПЛАМЕНЕНИЕ ЧАСТИЦ МАГНИЯ ВБЛИЗИ ТОРЦА УДАРНОЙ ТРУБЫ

Методами математического моделирования изучено воспламенение частиц магния вблизи торца ударной трубы, возникающее под действием проходящей и отраженной ударных волн. Проведенное сопоставление с данными экспериментов показало необходимость учета движения частиц, зависимости теплофизических параметров системы от состояния при определении зависимости времени задержки воспламенения как функции температуры за фронтом ударной волны.

Проблема воспламенения мелких частиц металлов в динамических условиях за плоскими проходящими и отраженными ударными волнами (УВ) рассматривалась теоретически и экспериментально в [1—3], в [4, 5] — за детонационными и взрывными волнами. В [2, 3] показано, что учет движения частиц и низкотемпературного окисления металла позволяет описать имеющиеся экспериментальные данные по зависимости времени задержки воспламенения t_{ign} от числа Маха M ударной волны. В [6] для объяснения вновь полученных данных по воспламенению частиц Mg вблизи торца ударной трубы высказано предположение о растрескивании окисла до плавления. Ниже дается объяснение наблю-

даемым в [6] эффектам в рамках математической модели, близкой к [2, 3], принимающей во внимание динамику частицы.

Рассмотрим газозвесь частиц Mg, заполняющую полупространство, ограниченное жесткой стенкой. После прохождения по нему плоской УВ частицы начинают двигаться и нагреваться за счет ударно-волнового воздействия. После отражения УВ от стенки температура газа вновь возрастает, скорость газа $u_g = 0$. Таким образом, частица вблизи стенки находится в условиях изменяющихся скорости и других параметров окружающей среды. Пусть объемная доля частиц достаточно мала, тогда процесс воспламенения можно описать моделью, близкой к [2, 3]:

$$m_s \frac{du}{dt} = \frac{\pi}{4} d_s^2 C_d \rho_g \frac{(u_g - u)^2}{2} \text{sign}(u_g - u), \quad (1)$$

$$m_s c_s \frac{dT}{dt} = \pi d_s \lambda_g \text{Nu} (T_g - T) + 4\pi r_s^2 q \rho_s (k_0 c_{\text{ок}} \exp(-E/RT) - v_0 \exp(-E_1/RT)),$$

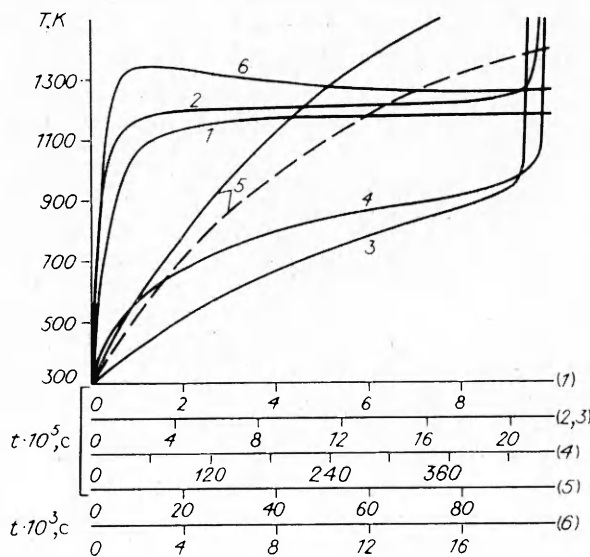
где m_s — масса; u — скорость; d_s — диаметр; c_s — теплоемкость; T — температура частицы; $r_s = d_s/2$; ρ_g — плотность; λ_g — теплопроводность; C_d — коэффициент сопротивления [2]; $c_{\text{ок}}$ — концентрация кислорода в среде; Nu — число Нуссельта; g , k_0 , v_0 , E , E_1 , R — константы физико-химической природы.

Систему уравнений (1) следует дополнить начальными данными

$$u = 0, T = T_0, t = 0, \quad (2)$$

которые отражают тот факт, что скорость и температура частиц остаются неизменными при переходе через УВ.

Основная особенность задачи (1), (2) — наличие множественности стационарных состояний при изменении некоторого бифуркационного параметра α [7]. Математически это выражается тем, что при изменении α вблизи критического значения α_- справа решение (1), (2) выходит на нижнее устойчивое стационарное состояние, при $\alpha \rightarrow \alpha_- - 0$ — на верхнее стационарное состояние. Этот момент интерпретируется как воспламенение частицы. Проиллюстрируем эти положения для (1), (2) в случае пренебрежения испарением и при постоянной скорости частицы. Здесь имеется бифуркационный параметр $\alpha = c_s \tau_3 / (q \tau_2)$, $\tau_3 = d_s / (6k_0 c_{\text{ок}})$, $\tau_2 = c_s \rho_s d_s^2 / (6\lambda_g \text{Nu})$. Для некоторых постоянных были найдены точки разворота нулевой кривой в плоскости (T, α) : $T_- = 1158$ К, $T_+ = 26960$ К, $\alpha_- = 5,946 \cdot 10^{-13}$, $\alpha_+ = 1,363 \cdot 10^{-5}$. На рисунке (кривые 1, 2) изображено поведение температуры частицы при $\alpha > \alpha_-$ ($\alpha = (1 + 0,01)\alpha_-$), $\alpha < \alpha_-$ ($\alpha = (1 - 0,01)\alpha_-$). Как видно, в первом случае воспламенение



отсутствует, во втором частица воспламеняется.

Остановимся предварительно на математическом моделировании процесса воспламенения в условиях, близких к экспериментальным [8]. Полагаем, в частности, что обдув частицы потоком газа отсутствует ($\text{Nu} = 2$, стационарные условия), но учитывается испарение с поверхности частицы. Оказалось, что времена задержки воспламенения (характерные для данных статических условий при отсутствии движения частиц относительно газа)

Таблица 1

Результаты экспериментов и расчетов для монодисперсной смеси

Вариант	M	P, атм	T, К	T ₁ , К	D, м/с	D ₁ , м/с	u _g , м/с	t _{ign} , мс	
								Эксперимент	Расчет
I	4,2	0,2	1265	2470	1351	484,5	1071	1,4±0,1	0,65 (1,3)
II	3,9	0,3	1129	2162	1255	457,6	984,6	2±0,2	1 (2,1)
III	3,4	0,3	924,8	1698	1094	414,4	839,3	—	—

Примечание. В варианте III воспламенение отсутствует. В последнем столбце в скобках стоит значение t_{ign} при уточненных значениях параметров за УВ.

Таблица 2

Результаты экспериментов и расчетов для полидисперсной смеси

Вариант	d, мкм	Эксперимент		Расчет (1)		Расчет (2)	
		T, К	t _{ign} , мс	t _{ign} , мс	d, мкм	t _{ign} , мс	d, мкм
1	1÷40	2173	0,06	0,04	20	0,014	4
				0,12	40	0,070	20
2		1470	0,11	0,065	20	0,21	40
				0,19	40	0,03	4
3	63÷100	2325	0,26	0,23	70	0,15	20
				0,44	100	0,48	40
4		1515	0,6	0,23	70	0,3	60
				0,47	70	0,6	80
				0,90	100	0,8	100
						0,9	60
						1,5	80
						2,1	100

вполне удовлетворительно коррелируют с экспериментами [8]. Линия 3 отражает распределение температуры частицы при $T_g = 1200$ К. Видно, что при малых временах нагрева T меняется с меньшей скоростью, чем в варианте без учета испарения (ср. с кривой 2), при этом отсутствует плато слабого изменения температуры перед ее срывом.

Далее исследовалось влияние движения частиц на воспламенение. Поведение температуры частиц при этом изменяется (ср. кривые 3 и 4). Время задержки воспламенения уменьшается, что вызвано увеличением конвективного теплоподвода к частице ($Nu \neq 2$).

В работе [6] представлены результаты экспериментального исследования воспламенения газозвесей порошков магния в атмосфере чистого кислорода за отраженными УВ (частицы в ударной трубе находились в начальный момент на расстоянии 1 см от стенки). Для частиц диаметром $d_s = 90$ мкм приведены значения времен задержки воспламенения t_{ign} при различных давлениях p и числах М. Вариант I: $t_{ign} = 1,4 \pm 0,1$ мс при $M = 4,2$, $p = 0,2$ атм; вариант II: $t_{ign} = 2,0 \pm 0,2$ мс при $M = 3,9$, $p = 0,3$ атм; вариант III: при $M = 3,4$, $p = 0,3$ атм воспламенение частиц не наблюдалось.

Для указанных значений M и p температура газа за падающей T и отраженной T_1 ударными волнами, скорости D и D_1 воли и скорость газа за падающей волной приведены в табл. 1.

Для каждого случая I—III проведены численные расчеты в рамках двух моделей. Без учета изменения скорости частиц во всех трех случаях воспламенения не наблюдается, температура выходит на стационарное значение. Модель с учетом изменения скорости дает следующие результаты: $t_{ign} = 0,65$ и $1,0$ мс для вариантов I и II соответственно, в последнем варианте воспламенения нет. Изменение температуры представлено на рисунке (кривые 5 — варианты I и II) и линия 6 (вариант III).

В [6] приведены также экспериментальные данные по временам за-

держки воспламенения для полидисперсных фракций порошков магния (табл. 2). В каждом из четырех указанных случаев проведены численные расчеты времени задержки воспламенения для выборочных значений диаметров частиц. Результаты приведены в табл. 2 (расчет (1)).

Как видно, выбранные значения характерного диаметра частицы в полидисперсной газовой взвеси дают верхнюю и нижнюю оценки t_{ign} . Отметим, что значения теплофизических переменных взяты теми, что и в [6]: вязкость газа $\mu = 2 \cdot 10^{-5}$ кг/(м·с), теплоемкость частиц $c_s = 1,2 \cdot 10^3$ Дж/(кг·К) (расчет (1)). Однако учет температур и давлений, возникающих за фронтами УВ, приводит к необходимости коррекции этих значений. Расчеты времени задержки воспламенения с подправленными теплофизическими данными приведены в табл. 2 (расчет (2)). Оказалось, что учет зависимости теплофизических констант от давления и температуры приводит к сближению экспериментальных и расчетных данных.

Таким образом, на основе изложенного выше видно, что результаты новых экспериментов [6] по воспламенению магния вблизи торца ударной трубы вполне удовлетворительно описываются в рамках модели [2, 3], учитывающей движение частиц, низкотемпературное окисление металла и зависимость теплофизических постоянных системы от ее состояния и не требуют для своего объяснения новых механизмов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Fox J. M., Tevelde J. A., Nicholls J. A. Shock wave ignition of metals powders // Proc. 1976 Heat Transfer and Fluid Mech. Inst., Davis, Calif., 1976.— Standford, 1976. P. 241—256.
2. Медведев А. Е., Федоров А. В., Фомин В. М. Математическое моделирование воспламенения частиц металла в высокотемпературном потоке за ударной волной // ФГВ.— 1982.— 18, № 3.— С. 5—9.
3. Boiko V. M., Fedorov A. V., Fomin V. M. et al. Ignition of small particles behind shock waves. // Shock Waves, Explosions, and Detonations/Ed. J. R. Bowen, N. Manson, A. K. Oppenheim, R. I. Soloukhin // Progr. Astron. Aeron.— 1983.— 87.— P. 71—87.
4. Афанасьева Е. А., Левин В. А. Воспламенение алюминиевых частиц за детонационными и взрывными волнами // Хим. физика.— 1984.— 3, № 9.— С. 1328—1332.
5. Федоров А. В., Тетенев Е. В., Вессьер Б. Динамика и воспламенение диспергированных в атмосфере частиц металлов при реальном взрыве.— Новосибирск, 1990.— (Препр./АН СССР. Сиб. отд-ние. ИТПМ; № 6—90).
6. Бойко В. М., Папырин А. Н. О воспламенении частиц магния за отраженными ударными волнами // Материалы VIII Всесоюз. симп. по горению и взрыву, Черногловка, 13—17 окт. 1986.— Черногловка, 1986.— С. 65—68.
7. Семенов Н. Н. Тепловая теория горения и взрыва // УФН.— 1940.— 23, № 3.— С. 251.
8. Гуревич М. А., Степанов А. М. Воспламенение металлической частицы // ФГВ.— 1968.— 4, № 3.— С. 334—342.

г. Новосибирск

Поступила в редакцию 20/XI 1990

К СВЕДЕНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ!

Авторский указатель статей, опубликованных в журнале «Физика горения и взрыва» в 1991 году, будет напечатан в № 1 1992 г.