

Таким образом, при горении системы $Zr-N-H$ установлено, что во всем диапазоне соотношений давлений процесс горения не прекращается и при достижении определенных величин происходит смена режимов горения. В табл. 4 приведены характеристики процессов горения в системе $Zr-N-H$.

Поступила в редакцию 18/III 1983,
после доработки — 1/XI 1984

ЛИТЕРАТУРА

1. М. М. Антонова, А. П. Брынза, Г. П. Вакарь. Порошковая металлургия, 1973, 3.
2. А. Г. Мержанов, В. М. Шкиро, И. П. Боровинская. Бюл. изобр., 1971, 10.
3. А. Б. Авакян, А. Р. Баграмян, И. П. Боровинская. — В кн.: Процессы горения в химической технологии и металлургии. Черноголовка, 1978.
4. А. Г. Акопян, С. К. Долуханян, И. П. Боровинская. ФГВ, 1978, 14, 3.
5. Н. А. Мартиросян, С. К. Долуханян, А. Г. Мержанов. ФГВ, 1981, 17, 4.
6. Р. А. Андриевский. Кристаллография, 1967, 12, 6.
7. А. Г. Мержанов, И. П. Боровинская, Ю. Е. Володин. Горение пористых образцов металлов в газообразном азоте и синтез нитридов. Отчет ОИХФ АН СССР. Черноголовка, 1971.
8. С. К. Долуханян, М. Д. Нерсисян, А. Б. Налбандян и др. Докл. АН СССР, 1976, 231, 3.
9. С. К. Долуханян, Г. Б. Сейранян, А. Б. Налбандян. Бюл. изобр., 1983, 31.
10. И. П. Боровинская, В. Э. Лорян. Порошковая металлургия, 1978, 11.
11. С. К. Долуханян, А. Г. Акопян, А. Г. Мержанов. ФГВ, 1981, 17, 5.

ВЛИЯНИЕ ДИНАМИКИ ЗАКРЫТИЯ ПОР НА ВЫСОКОСКОРОСТНОЕ УПЛОТНЕНИЕ ПОРОШКОВОГО МАТЕРИАЛА

С. А. Баланкин, Л. П. Горбачев, Е. Г. Григорьев, В. Б. Добровольский
(Москва)

Расширяющееся практическое использование высокоэффективных импульсных методов прессования изделий из порошков металлов и сплавов обуславливает необходимость более детального исследования процесса высокоскоростного уплотнения порошковой среды.

Изучение ударного сжатия порошковых материалов [1—3] выявило существенное влияние на процесс уплотнения ряда факторов: количества содержащегося в порах воздуха, вязкопластических свойств вещества порошка, размера и формы частиц, порошкового материала, скорости приложения прессующей нагрузки. Влияние на прессование некоторых из перечисленных факторов уже исследовано в экспериментальных и теоретических работах [1—4]. Представляет интерес выявить влияние совместного воздействия указанных факторов на высокоскоростное уплотнение порошковой среды.

В настоящей работе рассматривается деформирование сферического (цилиндрического) слоя вязкопластического материала с внешним радиусом $b(t)$ под действием давления p_0 , равномерно распределенного по внешней поверхности. В центре слоя материала находится пора радиусом $a(t)$, в которой содержится газ с начальным давлением p и показателем адиабаты γ . Начальную пористость порошковой среды будем характеризовать отношением удельного объема порошковой среды к удельному объему сплошного вещества $\alpha_0 = \frac{b_0^{k+1}}{b_0^{k+1} - a_0^{k+1}}$, где a_0 — начальное значение радиуса поры; b_0 — начальный внешний радиус слоя; $k = 1, 2$ — для цилиндрической и сферической геометрии слоя соответственно. Уравнение, описывающее деформирование слоя вещества, в переменных

Эйлера имеет вид

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial r} \right) = \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + k \frac{\sigma_r - \sigma_t}{r}. \quad (4)$$

Здесь ρ — плотность; u — радиальная скорость течения вещества; σ_r , σ_t — радиальная и тангенциальная компоненты тензора внутренних напряжений. Из условия несжимаемости вещества слоя имеем

$$u(r, t) = a'(t)(a/r)^k. \quad (2)$$

Уравнение движения слоя вязкопластичного несжимаемого ($\rho = \text{const}$) материала (4) можно проинтегрировать по пространственной координате r с учетом следующих граничных условий:

$$\begin{aligned} \sigma_r(b) &= -p_0, \\ \sigma_r(a) &= -p_0(a_0/a)^{(k+1)\gamma} + k\Gamma/a. \end{aligned} \quad (3)$$

Условие на поверхности поры учитывает давление газа в поре, сжимаемого адиабатически, и поверхностное натяжение материала Γ .

Анализ задачи (1)–(3) позволяет выявить следующие безразмерные параметры, определяющие динамику схлопывания поры:

$$R = a_0/\nu \sqrt{\frac{p_0}{\rho}}, \quad \beta = \frac{Y}{p_0}, \quad s = \frac{2\Gamma}{a_0 p_0}, \quad q = \frac{p}{p_0}. \quad (4)$$

Здесь ν — кинематическая вязкость; Y — предел текучести. Вводя безразмерную скорость движения $v = a' \sqrt{\rho/p_0}$ и безразмерный радиус поры $\xi = a/a_0$, имеем уравнения движения для сферической и цилиндрической симметрии

$$\begin{aligned} \frac{dv}{d\xi} + \frac{v}{\xi} \left(2 - \frac{1}{2} \frac{1 - a^4/b^4}{1 - a/b} \right) + \frac{1 - 2\beta \ln(b/a)}{v\xi(1 - a/b)} + \frac{4}{R\xi^2} \frac{1 - a^3/b^3}{1 - a/b} + \\ + \frac{s}{v\xi^2(1 - a/b)} - \frac{q}{v\xi^{3\gamma+1}(1 - a/b)} = 0, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{dv}{d\xi} + \frac{v}{\xi} \left(1 - \frac{1}{2} \frac{1 - a^2/b^2}{\ln(b/a)} \right) + \frac{1 - \beta \ln(b/a)}{v\xi \ln(b/a)} + \frac{2}{R\xi^2} \frac{1 - a^2/b^2}{\ln(b/a)} + \\ + \frac{s}{2v\xi \ln(b/a)} - \frac{q}{v\xi^{2\gamma+1} \ln(b/a)} = 0. \end{aligned} \quad (6)$$

Здесь R — влияние вязких сил на процесс схлопывания поры; β — влияние предела текучести вещества порошка; q — противодействие газов в поре; s — поверхностное натяжение материала. Уравнения (5) и (6) имеют особую точку $v = 0$, $\xi = \xi_0$. Равновесный радиус поры находится из уравнения

$$\xi_0^{(k+1)\gamma} \left\{ 1 - \beta \frac{k}{k+1} \ln \left[1 + \xi_0^{-(k+1)} (\alpha_0 - 1)^{-1} \right] \right\} + s \xi_0^{(k+1)\gamma-1} - q = 0. \quad (7)$$

Из (7) следует, что величина R не влияет на ξ_0 . При постоянном внешнем давлении R определяет только тип особой точки уравнения (5) или (6): «фокус» или «узел». Для вязкой жидкости ($\beta = 0$) и $\varepsilon = sq^{-1/(k+1)\gamma} \ll 1$ приближенное решение (7) имеет вид

$$\xi_0 = q^{1/(k+1)\gamma} (1 - \varepsilon/(k+1)\gamma).$$

Для прессования порошков железа, меди, никеля, вольфрама, тантала при температурах, близких к температуре плавления материала, с размером частиц порошка 10–100 мкм при $p_0 \geq 1$ кбар $\varepsilon \approx 10^{-2} \div 10^{-3}$. Параметр ε характеризует вклад поверхностного натяжения материала в конечную пористость и при указанных условиях вносит не более одного процента в конечный результат.

Тип особой точки $v = 0$, $\xi = \xi_0$ определяется соотношением параметров (4). В окрестности этой точки решение уравнений (5), (6) либо мо-

нотонно стремится к этой точке ($\xi \rightarrow \xi_0$, $v \rightarrow 0$), либо возникает колебательный режим около точки ξ_0 . Монотонное стремление решений к точке ξ_0 описывает режимы захлопывания поры при устойчивом процессе высокоскоростного прессования. Колебательный характер проведения решений соответствует неустойчивым режимам захлопывания, при которых возможно образование полостей и зон с повышенной пористостью в прессовке [3]. Важно установить значения параметров, при которых происходит замена устойчивых режимов захлопывания поры на неустойчивые. Для различной геометрии поры эти условия различны и определяются из (5) и (6) для сферической и цилиндрической поры соответственно

$$R_0^2 > 4 \left\{ [3\gamma\xi_0^3 + s(3\gamma - 1)\xi_0] \left[1 + \xi_0^3(\alpha_0 - 1) - \sqrt[3]{\xi_0^3(\alpha_0 - 1)(1 + \xi_0^3(\alpha_0 - 1))^2} \right] \right\}^{-1}, \quad (8)$$

$$R_1^2 > 2 \left\{ [2\gamma\xi_0^2 + s(2\gamma - 1)\xi_0] \left[1 + \xi_0^2(\alpha_0 - 1) \right] \ln(1 + \xi_0^{-2}(\alpha_0 - 1)^{-1}) \right\}^{-1}. \quad (9)$$

При $p \approx 1$ бар, $p_0 \geq 1$ кбар ($q \approx 10^{-3}$, $\beta = 0$) из условия (8) получаем $R_0 \geq 5$. В данном случае условие на параметр R для осуществления неустойчивых режимов прессования более слабое, чем для неограниченной кумуляции: $R > 8,7$ [5]. Это зависит от влияния противодействия газов на процесс захлопывания поры в вязкой жидкости.

Анализ соотношений (8) и (9) при $q \ll 1$ показывает, что условие возникновения колебательных (неустойчивых) режимов захлопывания сферических пор достигается быстрее, чем для цилиндрических пор: $R_0 < R_1$. Для цилиндрической геометрии более существенную роль играют вязкие силы, которые, в частности, подавляют неограниченную кумуляцию [5].

Интересно отметить результат, вытекающий из анализа уравнений (5) и (6): в идеально пластическом материале (при $q = 0$) цилиндрические поры начинают захлопываться с кумулятивными эффектами при более слабых условиях, чем сферические поры, так как для захлопывания сферических пор необходимо затратить больше энергии на работу пластической деформации.

Приведенные выше результаты получены при постоянном внешнем прессующем давлении p_0 и применимы, когда время приложения давления к порошковой среде значительно меньше времени схлопывания пор в материале. Если же указанные времена сравнимы, определение условий захлопывания пор необходимо проводить с учетом влияния скорости приложения нагрузки.

Найдем условия возникновения неустойчивых режимов схлопывания пор при нарастающем внешнем давлении $p_{01}(t) = p_0 t / \tau_0$, где τ_0 — время достижения давления величины p_0 , а также минимальную скорость приложения прессующего давления, при которой возможно возникновение неустойчивых режимов прессования. Для наглядности рассмотрим задачу (1), (2) в сферической геометрии ($k = 2$) с граничным условием

$$\begin{aligned} \sigma_r(b) &= -p_0 t / \tau_0, \\ \sigma_r(a) &= 0. \end{aligned} \quad (10)$$

При этом $s = q = 0$. Решение задачи (1), (2), (10) позволяет определить минимальную скорость приложения давления, при которой возникает неустойчивый режим захлопывания пустых сферических пор в вязкопластическом материале. Для этого необходимо одновременное выполнение следующих неравенств:

$$\frac{a_0}{v} \sqrt{\frac{p_0}{\rho}} \geq R_*(\beta, \alpha_0), \quad \frac{\tau_0}{a_0} \sqrt{\frac{p_0}{\rho}} \leq \tau_*(\beta, \alpha_0). \quad (11)$$

Безразличные параметры R_* и τ_* зависят от начальной пористости α_0

α_0	$\beta=0$		$\beta=0,1$		$\beta=0,4$	
	R_*	τ_*	R_*	τ_*	R_*	τ_*
1,1	9,6	1,33	10,1	1,33	12,1	1,37
1,5	11,6	1,15	11,7	1,17	16,3	1,17
2,0	13,7	1,03	14,1	1,04	19,9	1,05

и предела текучести β . Неравенства (11) позволили сформулировать основное требование на время приложения внешнего давления τ_0 для осуществления неустойчивых режимов прессования

$$\tau_0 \leq \frac{v_0^2}{v} \left(\frac{\tau_*}{R_*} \right). \quad (12)$$

В частности, из (12) следует, что для порошка железа с размером зерен ~ 100 мкм при температуре порядка температуры плавления вещества $\tau_0 \leq 10^{-3}$ с. Результаты численного интегрирования задачи (1), (2), (10) приведены в таблице. Эти данные показывают, что для осуществления неустойчивых режимов схлопывания пор в материале необходимо с ростом начальной пористости порошкового материала увеличивать величину прикладываемого давления и сократить время достижения этого давления. Повышение предела текучести вещества порошка требует увеличения p_0 , а время достижения этого давления практически не изменяется.

В заключение отметим, что расчеты для различной геометрии поры, произвольной формы импульса давления с учетом противодействия газов и поверхностного натяжения можно выполнить аналогичным образом.

Поступила в редакцию 16/1 1984

ЛИТЕРАТУРА

1. В. Ф. Анисичкин. ФГВ, 1979, 15, 6, 126.
2. О. В. Роман, В. Ф. Нестеренко, И. М. Пикус. ФГВ, 1979, 15, 5, 102.
3. В. А. Косович, А. М. Каунов, В. С. Седых и др. ФХОМ, 1982, 1, 30.
4. А. В. Аттетков, В. В. Селиванов, В. С. Соловьев. ПМТФ, 1983, 1, 127.
5. Н. И. Матюшкин, Ю. А. Тришин. ПМТФ, 1978, 3, 99.

ВЛИЯНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НА ИЗБИРАТЕЛЬНУЮ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ВВ К ФОРМЕ ИМПУЛЬСА УДАРНО-ВОЛНОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

*С. Г. Андреев, М. М. Бойко, В. В. Лазарев, В. С. Соловьев, А. И. Чернов
(Москва)*

В настоящее время установлено, что ВВ обладают избирательной способностью по чувствительности не только к виду энергии внешнего воздействия (начального импульса), но и к распределению энергии начального импульса во времени, в частности к профилю импульса давления [1, 2]. Это свойство прежде всего связано (предположительно) с особенностями механизма трансформации энергии внешнего воздействия в тепловую на различных неоднородностях и образования первичных очагов разложения (горячих точек), а также с механизмом развития начавшегося взрывчатого превращения в форму, регистрируемую в опытах по определению чувствительности. По этой причине ряд чувствительности ВВ, например к механическому удару, в общем случае не совпадает с рядом к ударно-волновому воздействию, которое отличается наличием