

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

М. Ю. БАЛЫШИН

КОЛИЧЕСТВЕННЫЙ РАСЧЕТ СПЕКАНИЯ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

Принципы, разработанные в последнее время [1-3], позволили рассчитать консолидацию и уплотнение при холодном прессовании порошков. На основе тех же принципов можно рассчитать эти процессы при изометрическом спекании порошков в прессформах под постоянным давлением $p = \text{const}$. Прежде всего для спекания под давлением должна быть действительна такая же зависимость между контактным (критическим) сечением α и относительной плотностью θ , как и при холодном прессовании [1,3]:

$$\alpha_p = \theta^2 \Delta \theta / \Pi_0; \quad \alpha_k = (\Lambda / \Lambda_k)^2 / \theta, \quad (1)$$

где α_p — расчетное, а α_k — экспериментально определенное значение α по измерению электропроводности Λ пористого порошкового тела; Λ_k — электропроводность материала в компактном (беспористом) состоянии; $\Delta \theta = \theta - \theta_0$, где θ_0 — исходная относительная плотность порошка перед спеканием; $\Pi_0 = (1 - \theta_0)$ — исходная пористость.

Формула (1) позволяет определить контактное давление $p_k = p/\alpha$. При спекании под давлением величина p_k таким же образом связана с более низким эффективным контактным давлением $(p_k)_{\text{эфф}}$, как и при холодном прессовании [2,3]:

$$\begin{aligned} (p_k)_{\text{эфф}} &= p/\alpha_{\text{эфф}} = (1 - 2\alpha/3)p_k; \\ \alpha_{\text{эфф}} &= \alpha/(1 - 2\alpha/3) = \alpha(1 + 2\alpha_{\text{эфф}}/3). \end{aligned} \quad (2)$$

где $\alpha_{\text{эфф}}$ — эффективное контактное сечение.

Специфична для спекания под давлением связь между временем изотермической выдержки t и величиной контактного давления. Проведенные ранее работы [4,5] показали, что для ряда порошков, в том числе электролитической меди, при спекании под давлением имеет место квазивязкое течение, при котором $p_k \sim \frac{1}{t} \sqrt{t/l}$, где n несколько больше двух. Есть все основания полагать, что в этих случаях для эффективного контактного давления $(p_k)_{\text{эфф}} \sim \sqrt{t/l}$, т. е. величина n в точности равна двум. При этом должен иметь место инвариант:

$$l = (p_k)_{\text{эфф}} \sqrt{t/l} = \text{const}, \quad (3)$$

где t/l — безразмерное время изотермической выдержки (в настоящей

статье численное значение этой характеристики равно отношению времени выдержки в минутах к времени одноминутной выдержки); величина инварианта I равна значению $(\rho_1)_{\text{эф}}$ при минутной выдержке.

Таблица 1

Режим	t , мин	1	8	16	32	64	128	256
600 С, $p = 0,8$ АНМ	100%	—	52.1	56.5	60.3	65.1	69.3	—
	100%	—	91.9	77.0	65.8	53.6	44.3	—
	100 α_0	3.14	8.50	11.9	16.3	21.7	21.0	—
	100 α_p	—	8.56	12.2	15.7	21.2	26.9	—
	100 $\alpha_{\text{эф}}$	3.20	9.00	12.7	18.3	25.1	32.9	—
	ρ_1 , АНМ	25.5	9.34	6.72	4.91	3.69	2.98	—
	$(\rho_1)_{\text{эф}}$, МНМ ²	25.0	8.69	6.30	4.37	3.15	2.43	—
I , МНМ ²	25.0	25.2	25.2	24.7	25.2	24.7	—	
900 С, $p = 0,8$ АНМ	100%	—	59.6	63.9	68.0	73.6	79.2	—
	100%	—	67.8	56.5	45.8	35.9	26.3	—
	100 α_0	5.47	15.0	20.3	25.4	34.2	44.3	—
	100 α_p	—	15.0	19.7	26.0	33.8	44.1	—
	100 $\alpha_{\text{эф}}$	5.67	16.7	23.5	30.5	44.3	62.9	—
	ρ_1 , АНМ	14.7	5.33	3.91	3.15	2.31	1.81	—
	$(\rho_1)_{\text{эф}}$, МНМ ²	14.2	4.79	3.40	2.62	1.80	1.27	—
I , МНМ ²	14.2	13.7	13.6	14.9	14.4	14.2	—	
900 С, $p = 1,6$ МНМ	100%	—	66.8	71.8	77.9	82.6	88.2	94.2
	100%	—	49.7	39.3	28.4	21.1	13.4	6.2
	100 α_0	9.53	23.1	32.0	40.7	52.8	64.5	81.1
	100 α_p	—	23.6	30.8	41.5	51.5	64.5	80.8
	100 $\alpha_{\text{эф}}$	10.2	27.2	41.0	56.0	80.5	113	177
	ρ_1 , АНМ	16.8	6.19	5.00	3.91	3.03	2.48	1.97
	$(\rho_1)_{\text{эф}}$, МНМ ²	15.7	5.58	3.90	2.86	1.92	1.41	0.90
I , МНМ ²	15.7	16.6	15.6	16.2	15.3	15.8	14.5	

Табл. 1 показывает кинетику уплотнения и консолидации электролитического медного порошка ($\mu = 0.3$) при спекании под давлением. Значения характеристик α_0 , α_p , а также ρ_1 , $(\rho_1)_{\text{эф}}$, I , $\alpha_{\text{эф}}$ вычислены по формулам (1), (2), (3); четыре последних характеристики рассчитаны на основании экспериментальных значений α_0 . Значения характеристик при минутной выдержке экстраполированы. При этом за минутное значение величин I и $(\rho_1)_{\text{эф}}$ принято среднее арифметическое значение I при разных значениях t . Приведены также значения относительного объема пор $\psi = \frac{V_0}{V} - 1$, где $V_0 = 1 \text{ МНМ}$ — относительный объем спекаемого тела. Из данных табл. 1 можно сделать следующие выводы:

а) значения α_0 и α_p , рассчитанные на основании формул (1), совпали в пределах ошибок опыта;

б) имело место практическое постоянство значений инварианта I , рассчитанных на основании формул (1), (2), (3).

Таким образом, данные табл. 1 экспериментально подтвердили

возможность применения формул (1), (2), (3) для расчета уплотнения и консолидации при спекании под давлением.

Важное положение теории уплотнения под давлением [1] — равенство между приведенными (отнесенными к единице объема частиц) работой уплотнения ($-p d\psi$) и работой консолидации ($p_k d\omega$):

$$-p d\psi = p_k d\omega, \quad (4)$$

где ω — доля необратимо смещенного объема частиц.

Из формулы (4) следует, что при не слишком большом приращении $\Delta\omega = \omega_{i+1} - \omega_i$ в промежутке времени $\Delta t = t_{i+1} - t_i$ (где $t_{i+1} > t_i$):

$$-p \Delta\psi = p(\psi_i - \psi_{i+1}) \approx p_{\text{ср}} \Delta\omega \approx p_{\text{ср}}(\omega_{i+1} - \omega_i);$$

$$p_{\text{ср}} = (p_{k1} + p_{k(i+1)})/2 \approx -p \Delta\psi / \Delta\omega \approx \Delta w_n / \Delta\omega, \quad (5)$$

где ψ_i, ω_i, p_{ki} — значения соответствующих характеристик в момент времени выдержки t_i , а $\psi_{i+1}, \omega_{i+1}, p_{k(i+1)}$ — в момент времени t_{i+1} ; среднее значение контактного давления $p_{\text{ср}} = (p_{k1} + p_{k(i+1)})/2$; $\Delta w_n = -p \Delta\psi$ — приращение приведенной работы уплотнения.

Для горячего уплотнения медных порошков (см. табл. 1) имела место зависимость $\alpha = n^2 \Delta\psi / \Pi_0$ по формуле (1). В этом случае значения $\Delta\omega = \omega_{i+1} - \omega_i$ можно высчитать по формуле, приведенной в [1]:

$$\omega_i = (v_i - v_0)^2 / 2\Pi_0; \quad \omega_{i+1} = (v_{i+1} - v_0)^2 / 2\Pi_0. \quad (6)$$

Таблица 2

Режим	Интервал между t_i и t_{i+1} , мин	8—16	16—32	32—64	64—128	128—256
800 °С, $p = 0,8 \text{ Мн}\cdot\text{м}^2$	$-100 \Delta\psi$	14,9	11,2	12,2	9,3	—
	$\Delta w_n, \text{ Мн}\cdot\text{м}^2 \cdot 100$	11,9	8,96	9,76	7,44	—
	$100 \Delta\omega$	1,53	1,54	2,24	2,20	—
	$(p_{\text{ср}})_p, \text{ Мн}\cdot\text{м}^2$	7,79	5,82	4,36	3,38	—
	$(p_{\text{ср}})_\omega, \text{ Мн}\cdot\text{м}^2$	8,03	5,82	4,30	3,32	—
900 °С, $p = 0,8 \text{ Мн}\cdot\text{м}^2$	$-100 \Delta\psi$	11,3	10,7	9,9	9,6	—
	$\Delta w_n, \text{ Мн}\cdot\text{м}^2 \cdot 100$	9,04	8,56	7,92	7,68	—
	$100 \Delta\omega$	1,95	2,39	3,00	3,70	—
	$(p_{\text{ср}})_p, \text{ Мн}\cdot\text{м}^2$	4,64	3,58	2,64	2,08	—
	$(p_{\text{ср}})_\omega, \text{ Мн}\cdot\text{м}^2$	4,64	3,55	2,74	2,08	—
900 °С, $p = 1,6 \text{ Мн}\cdot\text{м}^2$	$-100 \Delta\psi$	10,4	10,9	7,3	7,7	7,2
	$\Delta w_n, \text{ Мн}\cdot\text{м}^2 \cdot 100$	16,6	17,4	11,7	11,2	11,5
	$100 \Delta\omega$	2,86	3,9	3,4	4,4	5,2
	$(p_{\text{ср}})_p, \text{ Мн}\cdot\text{м}^2$	5,81	4,46	3,44	2,80	2,21
	$(p_{\text{ср}})_\omega, \text{ Мн}\cdot\text{м}^2$	5,75	4,46	3,47	2,76	2,23

В табл. 2 приведены данные по ряду величин, характеризующих формулы (5), (6) для медных порошков табл. 1 при различных интервалах времени. Значения $t_{i+1}, t_i, -\Delta\psi, \Delta w_n = -p \Delta\psi$ взяты на основании данных табл. 1. Экспериментальное среднее значение контактного давления $(p_{\text{ср}})_\omega = (p_{k1} + p_{k(i+1)})/2$ взято по данным табл. 1, расчетное среднее значение $(p_{\text{ср}})_p = \Delta w_n / \Delta\omega$ вычислено по формулам

(5), (6). Из табл. 2 видно удовлетворительное совпадение расчетных и экспериментальных значений $\rho_{\text{ср}}$. Таким образом, экспериментально подтверждена возможность расчета при спекании под давлением работы консолидации и уплотнения, а также контактного давления по формулам (4), (5), (6).

Значение кратковременной горячей твердости компактной меди (при минутной выдержке) по [6] при 800° равно 72, при 900° — 46 Мн/м^2 . Минутные значения эффективного контактного давления ($\rho_{\text{эф}}$) (равные среднему значению l) для спекания под давлением при режимах 800° , $\rho = 0,8 \text{ Мн/м}^2$; 900° , $\rho = 0,8 \text{ Мн/м}^2$; 900° , $\rho = 1,6 \text{ Мн/м}^2$, соответственно равны 25,0; 14,2 и 15,7 Мн/м^2 (см. табл. 1). Эти же значения, выраженные в процентах от соответствующей кратковременной горячей твердости, составляют 34,7; 30,9 и 33,7%, т. е. равны величине кратковременного предела текучести при соответствующих температурах.

Поступило 6.V.1974.

И. ЯНЬ. ՈՒՇԵՐ.

ՃՆՇՐԱՆ ՏԱՎ ԵՌԱԿԱՎՐԱՆ ՔԱՆԱԿԱԿԱՆ ՀԱՇՎԱՐԿ

Ա մ փ ո փ ո ս մ

Էլեկտրոլիտիկ պղնձափոշու օրինակի վրա կատարված է փոշենյութի մի շարք բնութագրերի՝ կոնտակտային ճնշման, խտացման ու կոնսոլիդացման աշխատանքի, հարարերական խտությունից, — փոփոխման կինետիկայի վերլուծական և փորձարարական հաշվարկի՝ հաստատուն ճնշման տակ իզոթերմիկ եռակայման դեպքի համար:

ЛИТЕРАТУРА

1. Бальшин М. Ю. Научные основы порошковой металлургии и металлургии полужидкого металла. Изд. «Металлургия», 1972.
2. Бальшин М. Ю. В сб. «Тр. Всес. Науч. техн. конференции по металлокерам. материалам и изделиям». Ереван, 1973.
3. Бальшин М. Ю. «Порошковая металлургия», 1973, № 10.
4. Бальшин М. Ю. В сб.: «Исследования по жаропрочным сплавам», т. 7, 1961.
5. Бальшин М. Ю., Трофимова А. А. «Металлургия и топливо», № 6.
6. Лазинский М. Г. Высокотемпературная металлография. Изд. АН СССР, 1959.