

## ЭНЕРГОСИЛОВЫЕ ЗАТРАТЫ ПРИ РАДИАЛЬНО-ИЗОСТАТИЧЕСКОМ ПРЕССОВАНИИ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОПРАВКУ

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Беларусь  
Луцкий государственный технический университет  
Луцк, Украина

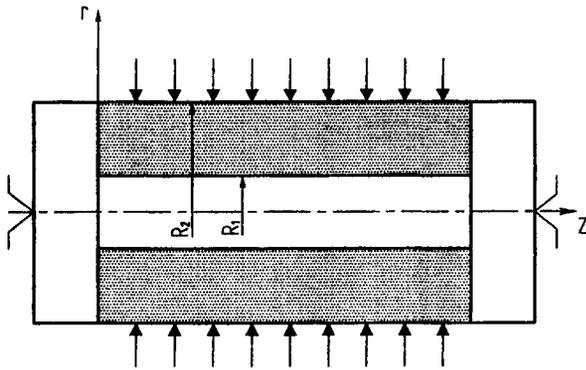


Рис.1. Схема радиального прессования труб из порошков.

Рассмотрим случай радиального прессования трубы на жесткую оправку (рис. 1). Предполагается, что продольная деформация ограничена жесткими стенками, вдоль которых отсутствует внешнее трение. Указанная схема используется при радиальном прессовании при уплотнении порошков на матрицу либо оправку и соответствует плоской осесимметричной деформации.

Компоненты тензора напряжений  $\sigma_r, \sigma_t$  и  $\sigma_z$  удовлетворяют следующим

уравнениям:

условия пластичности [1]

$$\frac{3 \left( \frac{\sigma_r + \sigma_t + \sigma_z}{3} \right)^2}{\psi^2} + \frac{[(\sigma_r - \sigma_t)^2 + (\sigma_r - \sigma_z)^2 + (\sigma_t - \sigma_z)^2]}{3\varphi^2} = 1; \quad (1)$$

уравнению равновесия

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_t}{r} = 0. \quad (2)$$

Ввиду отсутствия внешнего трения и ограничения продольной деформации

$$\tau_{rz} = 0; \quad (3)$$

$$\varepsilon_z = 0. \quad (4)$$

Условие (4) выразим через компоненты через компоненты тензора напряжений на основе ассоциированного закона течения

$$d\varepsilon_z = d\lambda \frac{\partial F(\sigma_r, \sigma_t, \sigma_z)}{\partial \sigma_z} = 0. \quad (5)$$

Из уравнений (1) и (5) получим

$$\sigma_z = a(\sigma_r + \sigma_t), \quad (6)$$

$$\text{где } a = \frac{\psi^2 - \varphi^2}{2\psi^2 + \varphi^2}. \quad (7)$$

Уравнения (1), (2) и (6) позволяют определить зависимости компонент тензора напряжений от радиуса  $r$  при определенном граничном условии. Условие жесткости оправки позволяет считать, что

$$d\varepsilon_t = 0. \quad (8)$$

$r=R_1$

Решим систему уравнений (1), (2) и (6) при граничном условии (8). Подставим

значение  $\varepsilon_z$  из (6) в (1). Получим

$$\frac{[(\sigma_r + \sigma_i)(a+1)]^2}{3\psi^2} + \frac{(\sigma_r - \sigma_i)^2 + [a\sigma_r + (a-1)\sigma_i]^2 + [a\sigma_i + (a-1)\sigma_r]^2}{3\varphi^2} = 1 \quad (9)$$

Введем обозначения:

$$K = \sigma_r - \sigma_i; \quad \sigma_i = \sigma_r - K; \quad \sigma_r + \sigma_i = 2\sigma_r - K. \quad (10)$$

С учетом (7) и (10) уравнение (9) примет вид:

$$\frac{K^2}{2\varphi^2} + \frac{6(\sigma_r - K)^2}{2\psi^2 + 2\varphi^2} = 1 \quad (11)$$

Для радиальной схемы прессования (рис. 1) с большой степенью точности можно считать, что  $\sigma_r = \sigma_i$  [2]. При этом  $K = \sigma_r - \sigma_i = 0$ . Тогда уравнение (11) примет вид

$$\sigma_r = \sqrt{\frac{\psi^2 + \varphi^2}{3}}. \quad (12)$$

$$\text{где [2]} \quad \psi = 2\sqrt{3}\sigma_{T_0} \left(\frac{\nu}{\nu_0}\right)^m \ln \frac{1-\nu}{1-\nu_0}; \quad (13)$$

$$\varphi = \frac{2\sqrt{6} \ln\left(\frac{1-\nu_0}{1-\nu}\right) \left(\frac{\nu}{\nu_0}\right)^{m+1} (1-\xi)\sigma_{T_0}}{\sqrt{9\left(\frac{\nu}{\nu_0}\right)^{2m} - (1+2\xi)^2 \left(\frac{\nu}{\nu_0}\right)^{2l}}}, \quad (14)$$

где  $\sigma_{T_0}$  - предел текучести частиц порошка;  $\nu_0$  и  $\nu$  - начальная и требуемая относительная плотности прессовок;  $m$  и  $l$  - показатели упрочнения при гидростатическом и осевом прессовании, соответственно;  $\xi$  - коэффициент бокового давления.

Условие равновесия (2) с учетом

$\sigma_r = \sigma_i$  преобразуется в  $\frac{d\sigma_r}{dr} = 0$ , т.е. радиальные напряжения по радиусу прессовки

не изменяются и поэтому плотность  $\rho_{np} = const$ . Экспериментальные исследования распределения плотности по радиусу прессовки реальной толщины  $t \leq 6$  мм показывают, что изменение плотности составляет не более 1,5% в пределах точности эксперимента [2].

С учетом (13) и (14) уравнение (12) примет вид

$$\sigma_r = \rho_{np} = 2\sigma_{T_0} \left(\frac{\nu}{\nu_0}\right)^m \cdot \ln \frac{1-\nu_0}{1-\nu} \sqrt{1 + \frac{1,5 \left(\frac{\nu}{\nu_0}\right)^{2l} (1-\xi)^2}{9 \left(\frac{\nu}{\nu_0}\right)^{2m} - (1+2\xi)^2 \left(\frac{\nu}{\nu_0}\right)^{2l}}} \quad (15)$$

Осевое напряжение  $\sigma_z$  определим из

уравнений (6) и (7) с учетом  $\sigma_r = \sigma_i$ :

$$\sigma_z = 2a\sigma_r = \frac{2(\psi^2 - \varphi^2)}{2\psi^2 + \varphi^2} \cdot \sigma_r \quad (16)$$

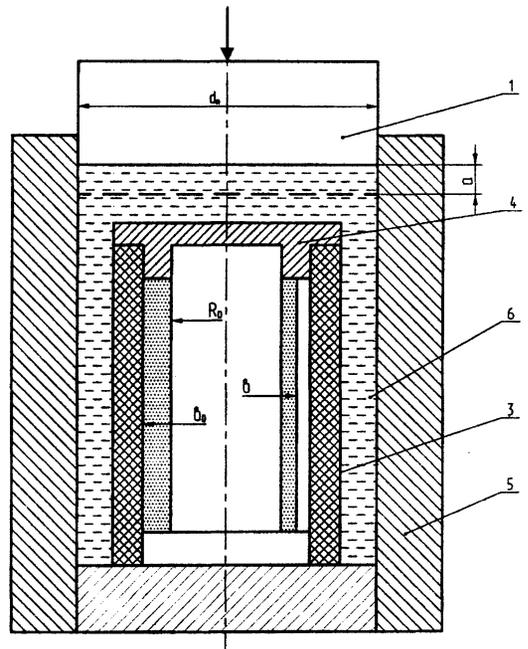


Рис.2. Принципиальная схема радиально-изостатического прессования ППМ на оправку:  
1-поршень; 2-корпус; 3-оправка; 4-упор;  
5-оболочка; 6-прессовка.

Уравнение (15) позволяет определить давление прессования при радиальном прессовании на оправку в зависимости от начальной и требуемой плотностей  $(\nu_0, \nu)$ , механических и структурных характеристик.

Осевое напряжение  $\sigma_z$  необходимо знать для расчета на прочность деталей оснастки и установки.

Уравнение (15) не учитывает силовые затраты на радиальную деформацию полиуретановых оболочек, т.к. их материал имеет иные реологические свойства. Для радиальных размеров оболочек 10-30 мм, изготовленных из полиуретана марки СКУ-7Л ( $G=10$  МПа), силовые затраты составляют 2-4% от давления прессования. Компоненты тензора напряжений в промежуточных эластичных средах (коэффициент Пуассона  $\nu \approx 0,5$ ) отличаются друг от друга на 2-4%, что позволяет считать  $\bar{\sigma}_R \approx \bar{\sigma}_t \approx \bar{\sigma}_z$ , т.е. оболочка как жидкость равномерно передает давление [2]. Вместе с тем, изменение давлений на 2-4% приведет к изменению плотности до  $0,3 \div 0,5\%$ , что гарантирует стабильность свойств прессовок.

Работа, затрачиваемая на прессование, определяется выражением (рис.2)

$$W = \int_0^{\alpha} p(\alpha) S_n d\alpha, \quad (17)$$

где  $p(\alpha)$  - давление прессования;  $S_n$  - площадь поршня,  $S = \frac{\pi d_n^2}{4}$ ;

$\alpha$  - перемещение поршня;  $d_n$  - диаметр поршня.

Воспользуемся известной зависимостью, связывающую давление и плотность [3]

$$P_s = P_{kp} \left[ \frac{\nu - \nu_0}{\nu(1 - \nu_0)} \right]^m = \frac{P_{kp}}{(1 - \nu_0)^m} \left( \frac{\epsilon_0^2 - \epsilon^2}{\epsilon_0^2 - R_0^2} \right)^m, \quad (18)$$

где  $m$  - параметр упрочнения.

Так как объем жидкости при перемещении порошка равен объему уплотнения прессовки, то

$$\frac{d_n^2 \alpha}{4} = (\epsilon_0^2 - \epsilon^2) \cdot l, \quad (19)$$

где  $l$  - длина прессовки.

Подставляя (19) в (18), получим

$$P_s = \frac{P_{kp} d_n^{2m} \alpha^m}{[4(1 - \nu_0)(\epsilon_0^2 - R_0^2) \cdot l]^m}. \quad (20)$$

Решая уравнение (17) с учетом (20) имеем:

$$W = \frac{P_{kp} \pi d_n^{2(m+1)} \alpha^{(m+1)}}{[4(1 - \nu_0)(\epsilon_0^2 - R_0^2) \cdot l]^m (m+1)}. \quad (21)$$

Так как

$$\alpha = \frac{4(\epsilon_0^2 - R_0^2) \cdot l \left(1 - \frac{\nu_0}{\nu}\right)}{d_n^2}, \quad (22)$$

то работу прессования определяем из (21)

$$W = P_{kp} \frac{\pi(\epsilon_0^2 - R_0^2) \cdot l \left(1 - \frac{\nu_0}{\nu}\right)^{m+1}}{(1 - \nu_0)^m (m+1)}. \quad (23)$$

Уравнение (23) позволяет определить энергозатраты при радиальном ИП в зависимости от плотности, геометрии прессовки и свойств порошка.

На рис. 3 показана зависимость давления от относительной плотности при ради-

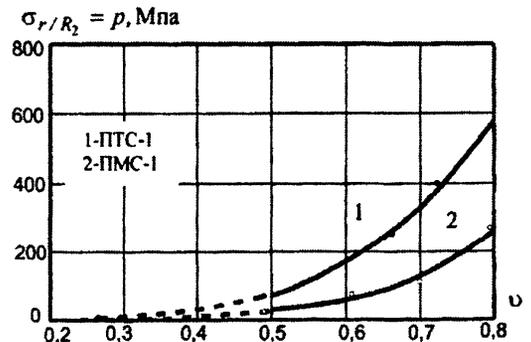


Рис.3. Зависимость давления от плотности при радиальном прессовании: 1 и 2-по уравнению (15); точки - экспериментальные данные.

альном прессовании. Результаты расчетов согласуются с экспериментальными данными. Использование радиальной схемы прессования позволяет получать трубы с равномерным распределением плотности в широком диапазоне давлений.

**Литература.** 1. Штерн М.Б. Определяющие уравнения для уплотняемых пластичных пористых тел // Порошковая металлургия. – 1981. - №4. – С.17-23. 2. Реут О.П., Богинский Л.С., Петюшик Е.Е. Сухое изостатическое прессование уплотняемых материалов. – Минск: «Дэбор», 1998, - 258 с. 3. Роман О.В. Теория и практика прессования порошков // Современные проблемы порошковой металлургии. – Киев: Наукова думка, 1970, - С.54-61.

УДК 621.762

Л.С. Богинский, Г.И. Курневич, Д.И. Божко

## ИЗГОТОВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОНАГРЕВАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ТЕРМОРАСШИРЕННОГО ГРАФИТА

*Белорусский национальный технический университет  
Белорусский государственный университет  
Минск, Беларусь*

Особенности состояния экономики РБ требует ориентации промышленного производства на выпуск конкурентоспособной продукции. На многих предприятиях имеется широкий спектр печного оборудования, рассчитанного на использование нагревательных элементов на основе сплавов Ni-Cr, SiC, MoSi<sub>2</sub> и т.д. В настоящее время объемы производства их в РБ существенно уменьшилось из-за высокой себестоимости (стоимость сырья и неэффективность используемых технологий). Создание новых материалов для нагревателей с относительно низкой стоимостью, широким диапазоном температур и надежностью является актуальной задачей.

Перспективным материалом изготовления электронагревателей является графит, обеспечивающий устойчивую работу в окислительной атмосфере до 400°С и 3000°С в защитной атмосфере.

Графитовые нагреватели в виде втулок, тиглей (графитовая печь - ГП) является

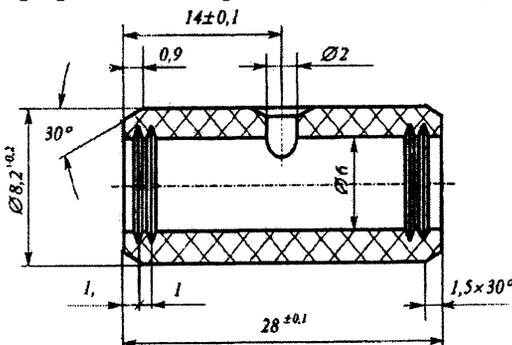


Рис.1. Схема нагревателя (графитовая печь)

принадлежностью атомно-абсорбционной спектрофотометрии и представляет собой последнее достижение технологии для обеспечения анализов на уровне РРВ. В таких печах достигаются высокие скорости атомизации, высокая температура до 3000°С в нейтральной атмосфере.

На рис. 1 показана схема импортной ГП. Исследования ее свойств показали, что при плотности  $\rho_{\text{ср}}=1,6 \text{ г/см}^3$  основной объем изделия

представляет собой пористый пирографит природного происхождения. Деталь получали из заготовки обработкой резанием (обточка, сверление, нарезание канавок и фа-