

**СПОСОБ ИЗГОТОВЛЕНИЯ БЕСПОРИСТЫХ  
ДЛИННОМЕРНЫХ ЗАГОТОВОК ГОРЯЧЕЙ ЭКСТРУЗИЕЙ**

**Туманян Г.А., Петросян А.С.**

**Ключевые слова:** горячая экструзия, коэффициент вытяжки, давление, предел текучести материала, угол матрицы, начальная пористость.

**Keywords:** Hot extrusion, stretching coefficient, pressure, material yield point, matrix angle, initial porosity.

**Գ.Հ. Թումանյան, Հ.Ս. Պետրոսյան**

**Տար արտամղումով անծակոտկեն երկարաչափ շինվածքների պատրաստման մեթոդ**

Տրված է ծակոտկենության կախումը արտամղման ռեժիմներից՝ արտամղման գործակցից ( $\lambda$ ), ճնշումից ( $p$ ), հոսունության սահմանի լարումից ( $\sigma_T$ ), մայրակի անկյունից ( $\alpha$ ) և սկզբնական ծակոտկենությունից ( $\theta_0$ ): Հեղինակների կողմից նախկինում ստացված բանաձևերի համապատասխան ձևափոխությունները, ինչպես նաև թվային հաշվարկները հնարավորություն են տալիս որոշել անծակոտկեն երկարաչափ շինվածքներ պատրաստելու արտամղման պարամետրերը:

**G.H. Tumanyan, H.S. Petrosyan**

**Way of Producing Porous-Free Long-Measured Blanks of Hot Extrusion**

The blank porosity dependence on extrusion conditions is established: coefficient of drawing ( $\lambda$ ), pressure ( $P$ ), yield point ( $C$ ), angle of the die ( $\alpha$ ) and initial porosity ( $\theta_0$ ). Appropriate transformations of formulas obtained by the authors, as well as numerical calculations allow to get extrusion parameters for manufacturing porous-free long-measured blanks.

Установлена зависимость пористости заготовки от режимов экструзии: коэффициента вытяжки  $\lambda$ , давления  $p$ , предела текучести  $\sigma_T$ , угла матрицы  $\alpha$  и начальной пористости  $\theta_0$ .

Соответственные преобразования формул, полученные ранее авторами, а также численные расчеты позволяют получить параметры экструзии для изготовления беспористых длинномерных заготовок.

В последнее время в промышленности для получения изделий с теоретической плотностью из различных порошковых и керамических материалов все большее распространение получает процесс горячего прессования (выдавливания). Для расширения номенклатуры обрабатываемых материалов важное значение имеет рациональный выбор цикла горячего выдавливания – закономерности изменения давления  $p$  и температуры  $T$  в зависимости от времени протекания процесса  $\tau$ . Теоретической основой такого выбора должны служить дифференциальные соотношения, связывающие указанные параметры со скоростью изменения пористости  $v$  порошкового композиционного материала.

Вопросам горячей обработки давлением порошковых материалов посвящены работы [1,2], в которых исследуются различные вопросы горячего деформирования порошковых тел.

Одним из основополагающих направлений в порошковой металлургии является создание материалов и изделий с беспористой структурой. Пористость является концентратором напряжений, резко снижает физико-механические свойства и износостойкость материала, вызывает ускоренную коррозию.

Сложность теоретического исследования процесса деформирования порошковых тел, обусловленная переменным объемом тела, вызвала необходимость изучения и создания расчетной модели. Для этого необходимо исследовать напряженно-деформированное состояние пористой заготовки в процессе горячей экструзии. До настоящего времени эти вопросы теоретически мало изучены.

На основе анализа литературных источников и большого количества экспериментальных данных в [3,4] представлено обобщенное аналитическое выражение, позволяющее приближенно оценить изменение пористости тел в процессе горячей экструзии. Однако в литературе отсутствуют комплексные исследования этого процесса.

Целью настоящей работы является определение начальной пористости заготовки и величины давления экструзии для изготовления беспористых длинномерных заготовок на основании технологического, экспериментального и теоретического исследований работ [3,4].

В программе исследования применяется порошковый композиционный материал следующего состава: <Fe-Cr+K<sup>0</sup>>, где K<sup>0</sup> – остальные компоненты в шихте: углерод, никель, молибден, медь.

Процентные содержания компонентов приведены в таблице.

Легирование медью (Cu), углеродом (C), дисульфидом молибдена (MoS<sub>2</sub>) произведено путем механического смешивания, т.е. изготовлением шихты ( $\tau_{\text{смеш.}} = 6...8$  час).

Таблица

Исходный состав порошковых композиций							
M	Cr	Fe	C	Ni	Mo	Cu	MoS <sub>2</sub>
1	0,8	97,5	0,2	1,5	-	-	-
2	-	97,3	0,2	1,5	1	-	-
3	1	96,7	0,25	1,5	0,5	-	-
4	1	94,5	0,5	1,5	0,5	2	-
5	1	92	0,5	1,5	-	3	2

Для расчетного исследования выбран композиционный материал состава 2 (см. табл.).

Из литературы [3] известна формула

$$\ln\left(\frac{1-\theta}{1-\theta_0}\right) = \frac{\left|1 - \frac{2}{1 + \cos \alpha}\right| (\lambda\sqrt{\lambda} - 1)e^A}{\lambda\sqrt{\lambda}(e^A - \sin^3 \alpha)} \quad (1)$$

где  $A = 3 \left\{ \left[ \frac{2n}{\sqrt{3}} \frac{\sigma_T}{p} \left[ \ln(\sin \alpha) + \frac{C_1}{2n} \right]^{\frac{C_1 - C_2}{n}} \right]^{C_1 - C_2 - n} - \frac{C_1}{2n} \right\}$ ;  $C_1, C_2$  – расчетные

величины;  $\Theta_0, \Theta$  – начальная и текущая пористость в %;  $\alpha$  – угол наклона матрицы, град;  $\lambda$  – коэффициент вытяжки;  $p$  – давление при экструзии, МПа;  $\sigma_T$  – предел текучести композиции, МПа.

Оптимальные режимы горячей экструзии образцов размерами ( $\varnothing 24 \times 40$ ) следующие:  $T_{\text{экс.}} = 1000 \pm 15^\circ\text{C}$ ,  $\tau_{\text{выд.}} = 2...2,5$  ч,  $\lambda = 2$ ,  $\alpha_n = 55^\circ$ ,  $\sigma_T = 27$  МПа [5].

После преобразования формулы (1) определяем величину ( $e^A$ ):

$$e^A = \frac{\lambda\sqrt{\lambda} \cdot \sin^3 \alpha \cdot \ln\left(\frac{1-\theta}{1-\theta_0}\right)}{\lambda\sqrt{\lambda} \ln\left(\frac{1-\theta}{1-\theta_0}\right) - \left| \left(1 - \frac{2}{1+\cos\alpha}\right) \right| (\lambda\sqrt{\lambda} - 1)} \quad (2)$$

где

$$A = \ln \frac{\lambda\sqrt{\lambda} \cdot \sin^3 \alpha \cdot \ln\left(\frac{1-\theta}{1-\theta_0}\right)}{\lambda\sqrt{\lambda} \ln\left(\frac{1-\theta}{1-\theta_0}\right) - \left| \left(1 - \frac{2}{1+\cos\alpha}\right) \right| (\lambda\sqrt{\lambda} - 1)}$$

Таким образом,

$$3 \left\{ \left[ \frac{2n}{\sqrt{3}} \frac{\sigma_T}{p} \left[ \ln(\sin \alpha) + \frac{C_1}{2n} \right]^{\frac{C_1-C_2}{n}} \right]^{\frac{n}{C_1-C_2-n}} - \frac{C_1}{2n} \right\} =$$

$$= \ln \frac{\lambda\sqrt{\lambda} \sin^3 \alpha \cdot \ln\left(\frac{1-\theta}{1-\theta_0}\right)}{\lambda\sqrt{\lambda} \ln\left(\frac{1-\theta}{1-\theta_0}\right) - \left| \left(1 - \frac{2}{1+\cos\alpha}\right) \right| (\lambda\sqrt{\lambda} - 1)}.$$

Необходимое условие для получения беспористого материала при горячей экструзии представлено формулой

$$\left[ \frac{2n}{\sqrt{3}} \frac{\sigma_T}{p} \left[ \ln(\sin \alpha) + \frac{C_1}{2n} \right]^{\frac{C_1-C_2}{n}} \right]^{\frac{n}{C_1-C_2-n}} =$$

$$= \frac{1}{3} \ln \frac{\lambda\sqrt{\lambda} \sin^3 \alpha \cdot \ln\left(\frac{1}{1-\theta_0}\right)}{\lambda\sqrt{\lambda} \ln\left(\frac{1}{1-\theta_0}\right) - \left| \left(1 - \frac{2}{1+\cos\alpha}\right) \right| (\lambda\sqrt{\lambda} - 1)} + \frac{C_1}{2n} > 0 \quad (3)$$

Сначала до холодной прессовки заготовки из металлического порошка и горячей экструзии, заранее расчетным путем определяем величину начальной пористости ( $\theta_0$ ). Причем  $\theta_0$  необходимо рассчитать таким образом, чтобы она удовлетворяла необходимым требованиям формулы (3). Для получения беспористого материала при горячей экструзии величину окончательной пористости принимаем равной  $\theta = 0$ .

Величина начальной пористости образца до прессовки, определенная расчетным путем по (3), равна  $\theta_0 = 16,6\%$ .

Из формулы (1) имеем

$$\ln\left(\frac{1-\theta}{1-\theta_0}\right) = \ln\left(\frac{1}{1-\theta_0}\right) = \ln\left(\frac{1}{1-0,166}\right) = \ln\left(\frac{1}{0,834}\right) = \\ = \ln(1,1990) = 0,1815$$

Для определения давления при горячей экструзии  $p$  заранее определяем расчетные коэффициенты  $n$ ,  $c_1$ ,  $c_2$ :

$$n = 0,941; C_1 = -1,404; C_2 = -3,171$$

$$C_1 = -\frac{6}{\sqrt{11}} \ln \left| \sqrt{13-11\cos\alpha} + 11\sqrt{1-\cos\alpha} \right| + 2\sqrt{\frac{1-\cos\alpha}{13-11\cos\alpha}} + \\ + 0,612 + \frac{1}{\sqrt{3}} + 4\sqrt{\frac{1-\cos\alpha}{13-11\cos\alpha}},$$

где

$$C_2 = -\frac{6}{\sqrt{11}} \ln \left| \sqrt{13-11\cos\alpha} + 11\sqrt{1-\cos\alpha} \right| + 2\sqrt{\frac{1-\cos\alpha}{13-11\cos\alpha}} + \\ + 0,612 + \frac{1}{\sqrt{3}} - 3\sqrt{\frac{1-\cos\alpha}{13-11\cos\alpha}} \\ n = \frac{\sqrt{3}\alpha - \frac{1}{2} \arctg\sqrt{12} \left( \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \right) - \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{\operatorname{tg} 2} - \frac{1}{2\sqrt{3}} \arctg \left( \frac{\alpha}{2} \right)}{\frac{1}{2\sqrt{3}} \ln \frac{\sqrt{12\operatorname{tg}^2 \left( \frac{\alpha}{2} \right) + 1} - 1}{\sqrt{12\operatorname{tg}^2 \left( \frac{\alpha}{2} \right) + 1} + 1} + \sqrt{\frac{11}{3}} \arctg \sqrt{\frac{12\operatorname{tg}^2 \left( \frac{\alpha}{2} \right) + 1}{11}}}$$

Подставляя в (3) результаты значений, полученных в вышестоящих выражениях, определяем давление  $p$  при горячей экструзии, которое обеспечивает получение беспористой заготовки:

$$\left[ \frac{2n\sigma_T}{\sqrt{3}p} \left( \ln \sin \alpha + \frac{C_1}{2n} \right)^{\frac{C_1-C_2}{n}} \right]^{\frac{n}{C_1-C_2-n}} = [26,414/p]^{1,138} = \\ = \ln \frac{\lambda\sqrt{\lambda} \sin^3 \alpha \cdot \ln \left( \frac{1}{1-\theta_0} \right)}{\lambda\sqrt{\lambda} \ln \left( \frac{1}{1-\theta_0} \right) - \left| \left( 1 - \frac{2}{1+\cos\alpha} \right) \right| (\lambda\sqrt{\lambda} - 1)} = \ln(15,753) = 2,757 \\ \ln \left( \frac{1}{1-\theta_0} \right) = 0,1815; \sin^3 \alpha = \sin^3(55^\circ) = (0,8192)^3 = 0,55 \\ (26,414/p)^{1,138} = \frac{2,757}{3} - 0,746 = 0,173$$

Из последнего уравнения определяем давление экструзии:  $p = e^{4,8} = 123,5$  МПа. Для сравнения приведем экспериментальное значение давления экструзии,

которое изменяется в пределах  $P=120...140$  МПа. Расхождение составляет от 2,8...11,8%, так как учет температурного фактора осуществляется только снижением предела текучести материала. Для расчетного исследования выбран композиционный материал состава 2 (см. таблицу), для чего экспериментальное значение давления составляет  $P=120$  МПа. Расчетное значение давления для конкретного состава 2 равняется  $P=123,5$  МПа. Расхождение при этом составляет 2,8%.

Пористость при горячей экструзии определяем по формуле (1). После преобразования формулы (1) определяем величину текучей пористости:

$$\theta = 1 - (1 - \theta_0) e^{\frac{\left(1 - \frac{2}{1 + \cos \alpha}\right) (\lambda \sqrt{\lambda} - 1) e^A}{\lambda \sqrt{\lambda} (e^A - \sin^3 \alpha)}} \quad (4)$$

Подставляя в (2) окончательную пористость  $\theta = 0$ , получим

$$e^A = \frac{\lambda \sqrt{\lambda} \sin^3 \alpha \cdot \ln\left(\frac{1}{1 - \theta_0}\right)}{\lambda \sqrt{\lambda} \cdot \ln\left(\frac{1}{1 - \theta_0}\right) - 1 \left(1 - \frac{2}{1 + \cos a}\right) | (\lambda \sqrt{\lambda} - 1)} \quad (5)$$

Подставляя в (4) результаты значений, полученных в указанных выражениях, определяем окончательную пористость  $\theta$  заготовки, полученной при горячей экструзии ( $\theta = 0,0064$ ).

Таким образом, установлено что представленные формулы позволяют выбором значений исходной пористости материала  $\theta_0$  и других технологических параметров получить после экструзии беспористое изделие ( $\theta = 0$ ). При этом теоретическое и экспериментальное расхождение значений давления экструзии составляет 2,8%.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Петросян Г.Л. Теория кратковременной ползучести пористых материалов // Межвуз. сб. научн. тр. ЕГУ. Механика. Вып.8. Вопросы механики деформируемого твердого тела. Ереван. 1991. С. 150-153.
2. Лаптев А.М., Самаров В.Н., Подлесный С.В. Параметры горячего изостатического прессования пористых материалов //Изв. АН СССР. Металлы. М.: 1988. С. 92-99.
3. Туманян Г.А. Закономерности напряженно-деформированного состояния пористых тел при экструзии // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 2003. Т.56. '2. С. 263-271.
4. Քումանյան Գ., Պետրոսյան Հ. Մետաղափոշուց երկարաչափ մետաղա արտադրանքի պարամետրերի որոշումը եղանակ. - Գյուտի արտոնագիր N 1571A2. – Երևան: 2005. – 9 էջ:
5. Манукян Н.В. Технология порошковой металлургии. Ереван: Айастан, 1986. 232 с.

Ереванский государственный инженерный  
Университет Армении

Поступила в редакцию  
7.07.2006