

Г.Л. ПЕТРОСЯН, А.А. БАРСЕГЯН, А.Г. ПЕТРОСЯН

**МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОРИСТОСТИ ГИДРОПРЕССОВАННОЙ  
ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ СПЕЧЕННОЙ ЗАГОТОВКИ С МАЛЫМ ПРОХОДОМ**

Разработан инженерный метод определения величины пористости спеченной цилиндрической спеченной заготовки, гидропрессованной в конической матрице с малыми проходами. Задача решается на основе деформационной теории пластичности пористых материалов с использованием безразмерных параметров гидропрессования. Получены численные данные для различных величин противодействия. Показано, что при использовании малых проходов гидропрессования задача решается достаточно просто - без исследования напряженного состояния заготовки.

**Ключевые слова:** гидропрессование, противодействие, малые проходы, напряженное состояние, пористость, безразмерные параметры.

**Введение.** Известно, что эффективным методом обработки твердых материалов и брикетов из металлических порошков является гидропрессование [1, 2]. В ряде случаев внедрение данного метода наряду с высокими технико-экономическими показателями обеспечивает также улучшение параметров эксплуатации и структуры продукции [3].

Процесс гидропрессования заготовки круглого поперечного сечения представляет собой одну из основных задач обработки давлением и имеет важное практическое значение. Для правильного отбора технических характеристик оборудования процесса гидропрессования, а также усовершенствования технологического процесса получения стержня круглого сечения с заданными физико-механическими и эксплуатационными свойствами предусматривается аналитическое исследование напряженно-деформированного состояния деформируемой заготовки.

В результате анализа работ [1-3], посвященных процессу гидропрессования заготовки круглого сечения, были выявлены основные особенности гидропрессования как обычных металлов, так и изготовленных из металлического порошка составных заготовок. При изучении методов исследования напряженно-деформированного состояния процесса прессования осесимметричных заготовок выявлено, что основным инженерным методом решения задачи является метод тонких сечений [2,3]. В случае, когда не учитывается упрочнение материала, решение задачи значительно упрощается: получается одно дифференциальное уравнение первого порядка, в результате интегрирования которого выводится аналитическая формула для определения напряжений. В [2] представлена теория совместного

воздействия процесса волочения и гидропрессовки заготовок круглого сечения методом тонких сечений. В [3] методом тонких сечений исследовано напряженно-деформированное состояние деформируемой заготовки круглого сечения при ее гидропрессовании с противодавлением. Для разных значений противодействия в программной среде MS EXCEL произведены численные вычисления. Экспериментально гидропрессование с противодавлением порошковых заготовок осуществлялось их размещением в пористых оболочках.

**Целью работы** является аналитическое исследование процесса гидропрессования с противодавлением спеченной цилиндрической заготовки в конической матрице и разработка инженерного метода определения величины ее пористости в случае малых проходов технологического процесса.

**Теоретические исследования.** В [3] получена следующая формула для определения величин безразмерных осевых давлений  $\overline{p_z} = p_z / \sigma_T$  по безразмерной длине (радиуса  $r/a$ ) конической части заготовки круглого сечения:

$$\overline{p_z} = \frac{(1+B)}{B} \left[ -1 + \left( \frac{r}{a} \right)^{2B} \right] + \bar{t} \left( \frac{r}{a} \right)^{2B}, \quad (1)$$

где  $\varphi, f$  - коэффициент трения;  $\varphi$  - угол конусности матрицы;  $a$  - радиус выходного сечения заготовки (рис. 1);  $\bar{t} = t / \sigma_T$  - безразмерная величина противодействия.

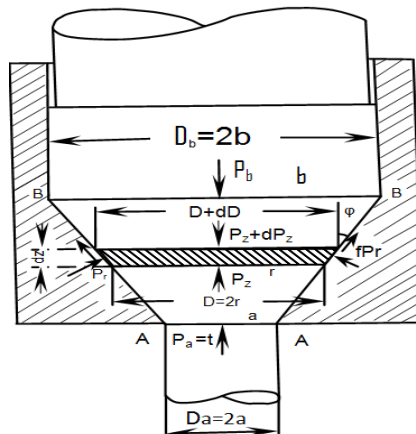


Рис. 1. Схема процесса гидропрессования с противодавлением

Отметим, что для решения поставленной задачи необходимо также знать величины остальных компонентов напряженного состояния. К ним относятся радиальное и окружное напряжения. При этом согласно [1-3] допускается, что

окружное и радиальное напряжения равны ( $\sigma_\theta = \sigma_r$ ), и для их определения используется условие пластичности материала. В данном случае при главных нормальных напряжениях ( $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ )

$$\sigma_1 = \sigma_z = -p_z, \quad \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_r = \sigma_\theta = -p_r \quad (2)$$

условие пластичности Мизеса примет следующий вид [3]:

$$p_r = p_z + \sigma_T, \quad (3)$$

где  $\sigma_T$  - предел текучести материала.

Условие пластичности (3) с безразмерными величинами  $\overline{p_r} = p_r/\sigma_T$  и  $\overline{p_z} = p_z/\sigma_T$  имеет вид

$$\overline{p_r} = \overline{p_z} + 1. \quad (4)$$

В [3] на основании формулы (1) были выполнены численные вычисления  $\overline{p_z}$  в случаях параметров технологического процесса  $f = 0,1$ ;  $\varphi = 20^\circ$ ,  $B = fctg\varphi = 0,2747$  и величин противодавления  $\bar{t} = t/\sigma_T = 0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8$  для значений конической матрицы  $r/a = 1,1; 1,2; 1,3; 1,4; 1,5$  и  $1,6$ . На рис. 2 для этих значений безразмерного противодавления построены графики  $\overline{p_z} - A/A_a$ , где  $A = \pi r^2$  и  $A_a = \pi a^2$  - площади текущих поперечных и АА (рис. 1) сечений заготовки.

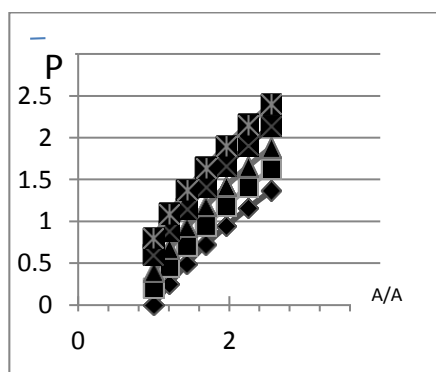


Рис. 2. Графики  $\overline{p_z} - A/A_a$  для величин  $\bar{t} = t/\sigma_T = 0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8$ .

Случаю  $\bar{t}_1 = 0$  соответствует кривая, проходящая через точку 1

Данные  $\overline{p_z}$  на рис. 2 соответствуют начальным точкам кривых (близких абсциссе 1). При этом случаю  $\bar{t}_1 = 0$  соответствует нижняя кривая.

Для определения текущей пористости  $\nu$  деформированной заготовки используем следующую формулу деформационной теории пластичности пористых материалов [4]:

$$\nu = 1 - (1 - \nu_0) \exp \left( - \frac{9\nu_0^m \sigma_0 \varepsilon_{eq}}{(1 - \nu_0)^{3n} \sigma_{eq}} \right), \quad (5)$$

где  $\varepsilon_{eq}$  и  $\sigma_{eq}$  - эквивалентные деформации и напряжения;  $\sigma_0 = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$  - среднее напряжение;  $\nu_0$  - начальная пористость материала;  $m$  и  $n$  - параметры пористости.

Для решения задачи используется метод [5]. С учетом (2) и (4) для неупрочняющего материала ( $\sigma_{eq} = \sigma_T$ ) формула определения безразмерного среднего напряжения сводится к следующему виду:

$$\overline{\sigma_0} = (\overline{\sigma_1} + \overline{\sigma_2} + \overline{\sigma_3})/3 = -(\overline{p_z} + 2)/3 = -\overline{p_z} - 0,67. \quad (6)$$

Формула для определения текущей пористости  $\nu$  (5) с учетом (6) имеет вид

$$\nu = 1 - (1 - \nu_0) \exp \left( \frac{9\nu_0^m}{(1 - \nu_0)^{3n}} \cdot (\overline{p_z} + 0,67) \cdot \varepsilon_{eq} \right). \quad (7)$$

Следует отметить, что в формуле (7), аналогично [5], имеет место произведение трех основных параметров технологического процесса: функция от начальной пористости материала  $f_1(\nu_0) = 9\nu_0^m / (1 - \nu_0)^{3n}$ , безразмерный параметр напряженного состояния (функция напряжений)  $f_2(\sigma) = (\overline{p_z} + 0,67)$  и степень деформации заготовки  $\varepsilon_{eq}$ . Из них для данной начальной пористости материала могут быть переменными второй и третий параметры. Величину степени деформации заготовки можно выбрать, а для определения функции напряжений необходимо использовать данные исследования ее напряженного состояния.

Отметим, что функция напряжений  $f_2(\sigma) = (\overline{p_z} + 0,67)$  фактически является абсолютной величиной безразмерного среднего напряжения

$$|\overline{\sigma_0}| = \overline{p_z} + 0,67,$$

и ее можно связать с безразмерной величиной противодавления:

$$|\overline{\sigma_{01}}| = \bar{t} + \overline{\Delta p_z} + 0,67, \quad (8)$$

где  $\overline{\Delta p_z}$  - приращение  $\overline{p_z}$  и соответствует концу первого малого прохода. При этом в начале этого прохода  $\overline{p_z} = \bar{t}$ .

**Численные вычисления.** Результаты численных вычислений  $\overline{p_z}$  и  $\overline{\sigma_{01}}$ , установленные по формулам (1) и (6) при малых проходах, т.е. малых значениях  $r/a$ , приведены в табл.1. На основании этих данных на рис. 3 показаны соответствующие кривые  $\overline{\sigma_{01}}$ .

Таблица 1

Данные изменения величин  $\overline{p_z}$  и  $\overline{\sigma_{01}}$  по высоте конической части матрицы при  $f = 0,1$ ;  $\varphi = 20^\circ$ ,  $B = f \operatorname{ctg} \varphi = 0,2747$  в случаях  $\bar{t}_1 = 0$  и  $\bar{t}_2 = 0,2$

r/a	A/A <sub>a</sub>	$\overline{p_z}$	$\overline{\sigma_{01}}$
1,0	1,0	0	0,67
1,025	1,051	0,06	0,73
1,05	1,103	0,12	0,79
1,075	1,156	0,18	0,85
1,10	1,210	0,25	0,92

r/a	A/A <sub>a</sub>	$\overline{p_z}$	$\overline{\sigma_{01}}$
1,0	1,0	0,20	0,87
1,025	1,051	0,26	0,93
1,05	1,103	0,32	0,99
1,075	1,156	0,38	1,05
1,10	1,210	0,46	1,13

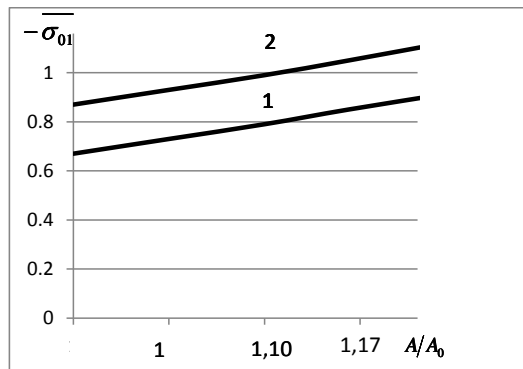


Рис. 3. Кривые  $\overline{\sigma_{01}} - A/A_a$  при малых проходах: кривая 1 соответствует  $\bar{t}_1 = 0$ , а кривая 2 -  $\bar{t}_2 = 0,2$

Анализ табл.1 и рис. 3 показывает, что при  $A/A_a = 1,05$ , т.е. при логарифмической деформации  $\overline{\varepsilon_{eq}} = \ln(A/A_a) = 0,05$  (или 5%), величина  $\overline{\Delta p_z}$  является достаточно малой, в данном случае она приблизительно равна 0,06. При этом формула (8) примет следующий вид:

$$|\overline{\sigma_{01}}| = \bar{t} + 0,73. \quad (9)$$

В случае пренебрежения величиной  $\overline{\Delta p_z}$  по сравнению с остальными членами формулы (8) имеем

$$|\overline{\sigma_{02}}| = \bar{t} + 0,67. \quad (10)$$

Следовательно, при определении по формуле (10) абсолютной величины безразмерного среднего напряжения (функции напряжений) в случае гидропрессования в конической матрице цилиндрической заготовки с малыми проходами задача решается без исследования напряженного состояния заготовки.

С использованием формул (7)-(10) были выполнены численные вычисления текущей пористости  $v$  цилиндрической заготовки, гидропрессованной в конической матрице при различных степенях деформирования ( $\varepsilon_{eq}$ ) и противодействия ( $\bar{t}$ ).

В случае  $\overline{\varepsilon_{eq}} = 0,05$ ;  $m = 1,0$ ;  $n = 0,25$  и начальных пористостей  $v_0 = 0,1; 0,2; 0,3$  и  $0,4$  сначала по формуле  $f_1(v_0) = 9v_0^m / (1 - v_0)^{3n}$  устанавливаются  $f_1(v_{01}) = 0,974$ ;  $f_1(v_{02}) = 2,128$ ;  $f_1(v_{03}) = 3,529$  и  $f_1(v_{04}) = 5,279$ . Далее по (7)-(10) для различных начальных пористостей получаются формулы определения текущих значений деформированных заготовок. При использовании формул (7) и (10) имеем

$$\begin{aligned} \text{при } v_0 = 0,1 - v_{12} &= 1 - 0,9 \exp(0,974(\bar{t} + 0,67) \overline{\varepsilon_{eq}}); \\ \text{при } v_0 = 0,2 - v_{22} &= 1 - 0,8 \exp(2,128(\bar{t} + 0,67) \overline{\varepsilon_{eq}}); \\ \text{при } v_0 = 0,3 - v_{32} &= 1 - 0,7 \exp(3,529(\bar{t} + 0,67) \overline{\varepsilon_{eq}}); \\ \text{при } v_0 = 0,4 - v_{42} &= 1 - 0,6 \exp(5,279(\bar{t} + 0,67) \overline{\varepsilon_{eq}}). \end{aligned} \quad (11)$$

При гидропрессовании в конической матрице цилиндрической заготовки с противодействиями  $\bar{t} = t/\sigma_T = 0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8$  и пористостями 10; 20; 30; 40%

и с одним малым проходом при логарифмической деформации  $\overline{\varepsilon_{eq}} = \ln (A/A_0) = 0,05 = 5\%$  по формулам с учетом и без учета величины  $\overline{\Delta p_z}$  были вычислены текущие значения пористостей, данные которых приведены в табл. 2, а графики их изменения в зависимости от величин противодействия показаны на рис. 4.

Таблица 2

Данные силовых параметров и пористостей  $v$ , вычисленные с учетом и без учета величины  $\overline{\Delta p_z}$ , в зависимости от величин противодействия  $\overline{t}$

$\overline{t}$	0	0,2	0,4	0,6	0,8
$\overline{p_z}$	0,06	0,26	0,46	0,66	0,86
$\overline{\sigma_{01}}$	0,73	0,93	1,13	1,33	1,53
$\overline{\sigma_{02}}$	0,67	0,87	1,07	1,27	1,47
$v_{11}$	0,067	0,058	0,049	0,039	0,030
$v_{12}$	0,070	0,060	0,050	0,043	0,033
$v_{21}$	0,134	0,116	0,097	0,077	0,058
$v_{22}$	0,141	0,122	0,100	0,084	0,065
$v_{31}$	0,202	0,174	0,144	0,113	0,081
$v_{32}$	0,212	0,184	0,154	0,124	0,093
$v_{41}$	0,271	0,231	0,189	0,145	0,099
$v_{42}$	0,284	0,245	0,204	0,161	0,116

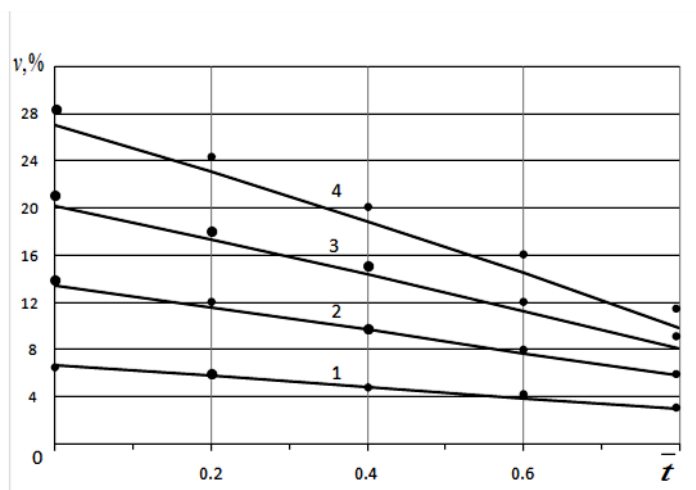


Рис. 4. Графики изменения текущих значений пористостей  $v$  деформированной заготовки, вычисленных с учетом (кривые 1-4 при  $v_0=10; 20; 30$  и  $40\%$ ) и без учета величины  $\overline{\Delta p_z}$  (точки), в зависимости от величин противодействия  $\overline{t}$

Сопоставление полученных данных показывает, что:

- при гидропрессовании с противодавлением спеченной заготовки круглого сечения в конической матрице увеличение безразмерной величины противодействия приводит к быстрому уменьшению пористости материала;
- наклон кривых больших начальных пористостей  $v_0$  значительно выше, чем малых  $v_0$ . Это означает большую эффективность уплотнения высокопористых заготовок;
- величины текущих значений пористостей  $v$  деформированной заготовки, вычисленные с учетом (кривые 1-4 при  $v_0=10; 20; 30$  и  $40\%$  соответственно) и без учета величины  $\overline{\Delta p_z}$  (точки), достаточно хорошо согласуются друг с другом. Разница между ними при малых величинах противодействия  $\bar{t}$  для всех начальных пористостей  $v_0$  не превышает  $5\%$ , а при высоких значениях  $\bar{t}$  зависит от  $v_0$ ; с ее возрастанием разность эта повышается и составляет  $9,3; 10,8; 12,9$  и  $14,7\%$  соответственно.

Отметим, что полученные формулы позволяют определить также величины безразмерного противодействия или степень деформирования (предельные их значения) цилиндрической заготовки, когда ее материал становится беспористым. В случае начальной пористости материала  $v_0 = 0,1$  предельные значения безразмерного противодействия и степень деформирования имеют следующий вид:

$$(\overline{\varepsilon_{eq}})_{пр.} = 0,108/(\bar{t} + 0,67), (\bar{t})_{пр.} = 0,108/\overline{\varepsilon_{eq}} - 0,67. \quad (12)$$

**Заключение.** Разработан инженерный метод определения величины пористости спеченной цилиндрической заготовки, гидропрессованной в конической матрице определенной начальной пористости с малыми проходами. Решение этой задачи осуществляется на основе современной деформационной теории пластичности пористых материалов. Показано, что при использовании малых проходов (что чаще используется в практике) задача решается достаточно просто - без исследования напряженного состояния заготовки.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке ГКН МОН РА в рамках научного проекта N13-2D161.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колпашников А.И., Вялов В.А., Федоров А.А., Петров А.П. Горячее гидропрессование металлических материалов. – М.: Машиностроение, 1977. – 271 с.
2. Пью Х.Л. Механические свойства материалов под высоким давлением. Выпуск 2: Применение высоких давлений в технологических процессах. - М.: Мир, 1973.- 374 с.
3. Петросян Г.Л., Петросян А.С., Барсемян А.А. Особенности моделирования процесса гидропрессования заготовки круглого сечения // Вестник ГИУА. Серия “Механика, машиноведение, машиностроение”. - 2013.- Вып. 16, N 2.- С. 30-38.



4. **Петросян Г.Л.** Пластическое деформирование порошковых материалов.- М.: Металлургия, 1988.-153с.
5. **Петросян Г.Л., Моталлеби С.Р., Саакян В.А.** Исследование реального процесса прокатки плоской полосы с учетом влияния пористости материала и числа оборотов валков // Проблемы динамики и взаимодействия деформируемых тел: Труды 7-й Международной конференции, сентябрь 19-23, 2011.- Горис-Степанакерт, 2011.- С. 333-338.

ГИУА (ПОЛИТЕХНИК). Материал поступил в редакцию 16.12.2013.

**Գ.Լ. ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ, Ա.Ա. ԲԱՐՍԵԴՅԱՆ, Հ.Գ. ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ**

**ՓՈՔՐ ԵՐԹԱՆՑՔՈՎ ՀԻՂՐՈՍՄԱՆՎԱԾ ԳԼԱՆԱԿԱՆ ԵՌԱԿԱԼՎԱԾ  
ՆԱԽԱՊԱՏՐԱՍՏՎԱԾՔԻ ԾԱԿՈՏԿԵՆՈՒԹՅԱՆ ՈՐՈՇՄԱՆ ՄԵԹՈՂ**

Մշակվել է կոնական մամլամայրում փոքր երթանցքներով հիդրոմամլված գլանական նախապատրաստվածքի ծակոտկենության որոշման ճարտարագիտական մեթոդ: Խնդիրը լուծվել է ծակոտկեն կյութերի պլաստիկության դեֆորմացիոն տեսության բանաձևով: Օգտագործվել են հիդրոմամլման չափում չունեցող պարամետրեր: Ստացվել են թվային տվյալներ հակաճնշման տարրեր մեծությունների համար: Ցույց է տրվել, որ հիդրոմամլման փոքր երթանցքների օգտագործման դեպքում խնդիրը լուծվում է բավականին պարզ՝ առանց հետազոտելու նախապատրաստվածքի լարվածային վիճակը:

**Ստանգրային բառեր.** հիդրոմամլում, հակաճնշում, փոքր երթանցքներ, լարվածային վիճակ, ծակոտկենություն, չափում չունեցող պարամետրեր:

**G.L. PETROSYAN, A.A. BARSEGHYAN, H.G. PETROSYAN**

**PECULIARITIES OF DETERMINING THE POROSITY BY A FINE PITCH OF A  
HYDROPPRESSED CYLLINDRICAL SINTERED BAR**

An engineering method for determining the porosity value of a sintered cylindrical bar hydropressed by fine pitches into the conic die is developed. The problem is solved by the formula of deformation theory of porous material plasticity. The nondimensional parameters of hydraulic pressing are used. For different values of backpressure, numerical data are obtained. It is shown that by using fine pitches of hydraulic pressing, the problem is solved quite simply without investigation of the bar stress state.

**Keywords:** hydraulic pressing, backpressure, fine pitches, deformation theory, stress state, porosity, nondimensional parameters.