

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СРЕДНЕГО ДАВЛЕНИЯ ПРОКАТКИ СПЕЧЕННЫХ СКОМПАКТИРОВАННЫХ ЗАГОТОВОК ИЗ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ

Л.С. КОХАН, *д-р техн. наук, профессор**

И.Г. РОБЕРОВ *канд. техн. наук, гл. инженер***

А.А. КОНДРАШОВ, *аспирант**

Б.Ф. БЕЛЕЛЮБСКИЙ, *аспирант**

А.В. ШУЛЬГИН, *аспирант**

*Московский государственный вечерний металлургический институт

** ГП «Опытный завод тугоплавких металлов и твердых сплавов»

Экспериментальные исследования силовых параметров прокатки проводились на скомпактированных и спеченных образцах из медного порошка марки ПМС-1. На образцах 5,65×20×60 мм, 11,5×20×60 мм и 16,5×20×60 мм при разных обжатиях и плотности полученных заготовок. Результаты исследований приведены в табл. 1.

Таблица 1

Заготовка, мм	Параметры при прокатке на стане Дуо 160							
	ρ	ε	l , мм	$h_{cp} =$ $h_0 (1-\varepsilon)$	$\frac{l}{h_{cp}}$	$\frac{b_0}{h_0}$	$\overline{\sigma_z}$	$\frac{h_0}{b_0}$
5,65×20×60	0,80	0,152	8,29	5,22	1,588	3,540	1,24	0,288
	0,87	0,152	8,29	5,22	1,588	3,540	1,28	
	0,95	0,152	8,29	5,22	1,588	3,540	1,31	
	0,80	0,454	14,32	4,367	3,279	3,540	1,9	
	0,87	0,454	14,32	4,367	3,279	3,540	1,95	
	0,95	0,454	14,32	4,367	3,279	3,540	1,95	
11,5×20×60	0,80	0,152	11,82	10,626	1,1123	1,739	1,18	0,575
	0,89	0,152	11,82	10,626	1,1123	1,739	1,22	
	0,95	0,152	11,82	10,626	1,1123	1,739	1,25	
	0,89	0,292	16,39	9,82	2,037	1,739	1,43	
	0,95	0,292	16,39	9,82	2,037	1,739	1,45	
	0,82	0,363	18,27	9,413	1,941	1,739	1,54	
16,5×20×60	0,89	0,363	18,27	9,413	1,941	1,739	1,62	0,775
	0,82	0,153	13,77	14,314	0,962	1,290	1,14	
	0,89	0,153	13,77	14,314	0,962	1,290	1,17	
	0,82	0,260	17,96	13,485	1,332	1,290	1,3	
	0,89	0,260	17,96	13,485	1,332	1,290	1,35	
	0,82	0,40	22,27	12,40	1,796	1,290	1,54	
	0,89	0,40	22,27	12,40	1,796	1,290	1,61	

Обработка полученных результатов проводилась по следующей модели: $\bar{\sigma}_z = A + B\rho + C\varepsilon + Db_0/h_0 + El/h_{cp}$

где ρ – плотность заготовки, ε – относительная деформация, l – длина дуги захвата, h_{cp} – средняя толщина заготовки.

Так для заготовки 11,5×20×60 мм была составлена следующая система из восьми уравнений. При этом использовались средние показатели для каждой группы плотности:

$$A + B \times 0,8 + C \times 0,152 + D \times 1,739 + E \times 1,1123 = 1,17; \quad (1)$$

$$A + B \times 0,87 + C \times 0,152 + D \times 1,739 + E \times 1,1123 = 1,2; \quad (2)$$

$$A + B \times 0,92 + C \times 0,152 + D \times 1,739 + E \times 1,1123 = 1,23; \quad (3)$$

$$A + B \times 0,8 + C \times 0,292 + D \times 1,739 + E \times 2,037 = 1,40; \quad (4)$$

$$A + B \times 0,87 + C \times 0,292 + D \times 1,739 + E \times 2,037 = 1,42; \quad (5)$$

$$A + B \times 0,94 + C \times 0,292 + D \times 1,739 + E \times 2,037 = 1,44; \quad (6)$$

$$A + B \times 0,8 + C \times 0,363 + D \times 1,739 + E \times 1,941 = 1,52; \quad (7)$$

$$A + B \times 0,87 + C \times 0,363 + D \times 1,739 + E \times 1,941 = 1,6. \quad (8)$$

Из данной системы уравнений алгебраически вычислялись неизвестные коэффициенты A, B, C, D. Тогда, для заготовки 11,5×20×60 мм среднее давление определяется по зависимости:

$$\bar{\sigma}_z = -0,768 + 0,40\rho + 2,22\varepsilon + 0,40 \frac{b_0}{h_0} - 0,04 \frac{l}{h_{cp}} \quad \text{при} \quad \frac{b_0}{h_0} = 0,575. \quad (9)$$

Для заготовки 5,65×20×60 мм среднее давление определяется по зависимости:

$$\bar{\sigma}_z = -0,138 + 0,42\rho + 2,22\varepsilon + 0,40 \frac{b_0}{h_0} - 0,04 \frac{l}{h_{cp}} \quad \text{при} \quad \frac{b_0}{h_0} = 0,282. \quad (10)$$

Для заготовки 16,5×20×60 мм среднее давление определяется по зависимости:

$$\bar{\sigma}_z = -0,08 + 0,42\rho + 2,22\varepsilon + 0,40 \frac{b_0}{h_0} - 0,04 \frac{l}{h_{cp}} \quad \text{при} \quad \frac{b_0}{h_0} = 0,775. \quad (11)$$

Проверка полученных зависимостей установила, что различие результатов теоретических зависимостей и экспериментальных данных не превышает 6-7%.

Полученные результаты были уточнены результатами экспериментов на другом оборудовании, в частности на стане Дуо 500. Так при прокатке заготовки 80×120×200мм на стане Дуо 500 с обжатием 30%, среднее давление $\bar{\sigma}_z$ на заготовку при ее плотности $\rho = 0,95$ составило 1,603.

Тогда для приведенной зависимости длина дуги $l = 77,46$ мм,

$h_{cp} = 80 (1 - 0,15) = 68 \text{ мм}$, $l/h_{cp} = 1,139$; $h_0/b_0 = 0,666$. Установим для данного процесса прокатки коэффициент А:

$$A + 0,95 \times 0,40 + 2,22 \times 0,3 + 0,40 \times 1,5 - 0,04 \times 1,139 = 1,603$$

$$\text{и } A = -0,134.$$

Для заготовки $7,5 \times 20 \times 60 \text{ мм}$ при прокатке с обжатием 30% на стане Дуо 160 и при плотности заготовки $\rho = 0,92$ давление $\overline{\sigma}_z$ составило 1,75.

Определяем для этого эксперимента коэффициент А при $l = 13,42 \text{ мм}$, $h_{cp} = 6,375 \text{ мм}$, $l/h_{cp} = 2,10$ и $h_0/b_0 = 0,375$, отсюда:

$$A + 0,92 \times 0,40 + 2,22 \times 0,3 + 0,46 \times 2,667 - 0,04 \times 2,1 = 1,75 \text{ и } A = -0,45.$$

На рис.1 приведен график зависимости коэффициента А от относительной толщины заготовки.

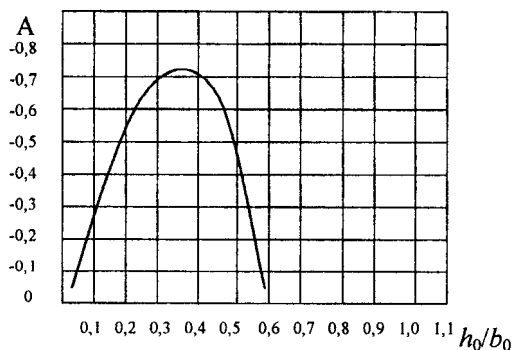


Рис.1 Зависимость коэффициента А от отношения h_0/b_0

На рис.1 виден двойственный характер влияния параметра h_0/b_0 на давление: для тонких и средних по толщине заготовок $h_0/b_0 < 0,5-0,6$, с ростом h_0/b_0 возрастает коэффициент А; для толстых заготовок, наоборот, коэффициент А уменьшается.

Воспользуемся разработанной Коханом Л.С. и Роберовым И.Г. методикой [1] и определим напряжения прокатки полосы $5,65 \times 20 \times 60 \text{ мм}$ с обжатием 30% на стане Дуо 160 из спеченной и скомпактированной полосы из медного порошка при ее плотности $\rho = 0,82$

Задаемся значениями коэффициентов в уравнении равновесия $a_1 = 0,708$, $a_0 = 0,104$ и для коэффициента трения $f = 0,3$ вычисляем параметры прокатки: угол захвата $\alpha = \sqrt{h_0/R} / \varepsilon = 0,1455 (8,34^\circ)$, $\delta = 2f\alpha = 4,122$, длина дуги захвата $l = \sqrt{5,65 \times 0,380} = 11,645 \text{ мм}$. На основании наших опытов принимаем угол нейтрального сечения $\gamma = 0,4\alpha = 3,336^\circ$. Тогда полувысота нейтрального сечения

$$y_n = R(1 - \cos \gamma) + h_0/2 (1 - \varepsilon) = 0,135 + 1,9775 = 2,1125 \text{ мм}$$

и давление в зоне торможения в нейтральном сечении:

$$\overline{\sigma_{z \text{ от}}} = \frac{1}{4,122 + 0,708 - 1} [(3,83 - 0,104)(5,65/2 \times 2,1125)^{3,83/0,708} + 0,104] = 4,659$$

Для зоны опережения:

$$\overline{\sigma_{z \text{ оп}}} = \frac{1}{4,122 + 1 - 0,708} [(4,414 - 0,104)(2 \times 2,1125 / 5,65 \times 0,7)^{4,414/0,708} -$$

$- 0,104] = 1,52$. Из-за несовпадения напряжений уменьшаем $\gamma = 5,4^\circ$, $y_n = 2,3325$ и $H_n = 2 y_n = 4,66508$ мм. Тогда напряжение равно:

$$\overline{\sigma_{z \text{ от}}} = \frac{1}{3,83} [3,726(5,65 / 4,66508)^{5,4096} + 0,104] = 2,769 \text{ и}$$

$$\overline{\sigma_{z \text{ оп}}} = \frac{1}{4,414} [4,414(4,66508 / 3,955)^{6,234} - 0,104] = 2,775.$$

Процесс итерации закончен, устанавливаем среднее давление:

$$\overline{\sigma_{z \text{ ср}}} = [(1 + 2,769) \times (11,645 - l_n) + (1 + 2,775) \times l_n] / 2 \times l_n = [3,765 \times 4,116 + 3,775 \times 7,59] / 2 \times 11,645 = 1,895, \text{ где } l_n = R \times \sin \gamma = 80 \times \sin 5,4^\circ = 7,529.$$

Чтобы воспользоваться нашими уравнениями следует определить параметры ρ , b_0/h_0 , l/h_{cp} и ε . Плотность заготовки ρ определяется условиями компактирования и составляет по заданию $\rho = 0,82$, отношение $b_0/h_0 =$

$$\frac{20}{5,65} = 3,54, \frac{l}{h_{cp}} = \frac{11,645}{5,65(1 - 0,3/2)} = 2,425 \text{ и } \varepsilon = 0,3. \text{ Для } \frac{h_0}{b_0} = \frac{5,65}{20} = 0,2825.$$

Отсюда

$$\overline{\sigma_z} = -0,138 + 0,40 \times 0,82 + 2,22 \times 0,3 + 0,40 \times 3,54 - 0,04 \times 2,425 = 2,157.$$

Отличие по двум методикам составляет

$$\Delta = (2,157 - 1,895/2,157) \times 100 = -12,0\%.$$

Переходим к более точной двуххордовой модели рекомендуемой Коханом Л.С. и Роберовым И.Г. [2]. Предлагается величина $\gamma \cong 0,65$, $\gamma_{\text{однохор.}} = 5,4 \times 0,65 = 3,52^\circ$ или $\gamma \cong 0,42\alpha$. Параметры прокатки:

$$\delta_0 = \frac{0,3}{\lg 3,52 + 8,34/2} = 2,888, \delta_1 = \frac{0,3}{\lg 3,52/2} = 9,76325; y_n = 2,128 \text{ и}$$

$$H_n = 4,25685 \text{ мм и}$$

$$\overline{\sigma_{z \text{ от}}} = \frac{1}{2,888 + 0,708 - 1} [(2,596 - 0,104)(5,65/4,25685)^{3,666} + 0,104] = 2,7503 \text{ и}$$

$$\overline{\sigma_{z \text{ оп}}} = \frac{1}{9,763 + (1 - 0,708)} [(10,055 - 0,104)(4,2568 / 3,955)^{14,202/0,708} - 0,104] = 2,8714.$$

Уменьшаем $\gamma = 3,45^\circ$, $\delta_0 = 2,9055$, $\delta_1 = 9,961$ и $H_n = 4,245$ мм и находим:

$$\overline{\sigma_z}_{от} = \frac{1}{2,6135} [2,5095(5,65 / 4,245)^{3,6914} + 0,104] = 2,7986 \text{ и}$$

$$\overline{\sigma_z}_{оп} = \frac{1}{10,253} [10,357(4,245 / 3,955)^{14,4820} - 0,104] = 2,8045.$$

Таким образом, отличие составляет 0,21%, и процесс расчета окончен. Угол $\gamma = 3,45^\circ = 0,414\alpha$, что составляет $3,45 / 5,4 \approx 0,64$ $\gamma_{однокор.}$, соответственно $x_n = \sin 13,45^\circ \times 80 = 4,814$ мм. Определим среднее давление:

$$\overline{\sigma_z}_{ср} = (1 + 2,7996)(11,645 - 4,814) + (1 + 2,8045) 4,814 / 2 \times 11,645 = 1,879$$

Таким образом, при двуххордовой модели отличие от наших расчетов составляет $\Delta = (2,157 - 1,88 / 2,19) \times 100\% = 12,8\%$. Отметим, что при высокой точности расчетов предлагаемые нами формулы (8) - (11) устанавливают строгую зависимость параметров прокатки от геометрии полосы и вала. Кроме того, сам расчет не требует достаточно многообразных итерационных подсчетов. К недостаткам предлагаемой методики следует отнести отсутствие решения нейтрального угла. Этот недостаток устанавливается соответствующей разработкой по определению среднего давления:

$$\overline{\sigma_z}_{ср} = \frac{(1 + \overline{\sigma_z}_{от})(1 - \frac{\gamma}{\alpha}) + (1 + \overline{\sigma_z}_{оп})(\frac{\gamma}{\alpha})}{2}.$$

Тогда при равенстве $\overline{\sigma_z}_{от} = \overline{\sigma_z}_{оп} = \overline{\sigma_z}$; величина $\overline{\sigma_z}_{ср} = 2\overline{\sigma_z}_{ср} - 1$. Определяется γ . Так для разобранный выше примера $\overline{\sigma_z}_{от} = \overline{\sigma_z}_{оп} = 2 \times 1,879 - 1 = 2,758$. При расчете $\overline{\sigma_z}_{от} = \overline{\sigma_z}_{оп} = 2,80$ (отличие 1,4%). Величину нейтрального угла определяет угол захвата $\alpha = 8,34^\circ$ и соотношение $\gamma \approx 0,42\alpha$. Откуда $\gamma = 8,34^\circ \times 0,42 = 3,5^\circ$.

Отметим, что по зависимости Григорьева А.А., Куликовского Д.Н., Иванова В.Н. [3] давление прокатки спеченных заготовок из железных порошков марок НМо26Ж и ЖГрДЗ оценивается зависимостью:

$$\overline{\sigma_z}_{ср} = -2,64 + 0,78 \frac{b_0}{h_0} + 0,06 \frac{R}{h_0} + 7,35\varepsilon - 9,8 \varepsilon^2.$$

Для разобранный выше примера прокатки спеченной заготовки $5,65 \times 20 \times 60$ мм из железного порошка на стане 160 среднее давление прокатки будет:

$$\overline{\sigma_z}_{ср} = -2,64 + 0,78 \frac{20}{5,65} + 0,06 \frac{80}{5,65} + 7,35 \times 0,3 - 9,8 \times 0,09 = 1,756,$$

что отличается от давления прокатки медной заготовки из порошка марки ПМС-1: $\overline{\sigma_z} = 2,157$ (отличие 18,6%).

В заключение ниже на рис.2 для различных отношений приведены экспериментальные графики давлений $\overline{\sigma_z}$.

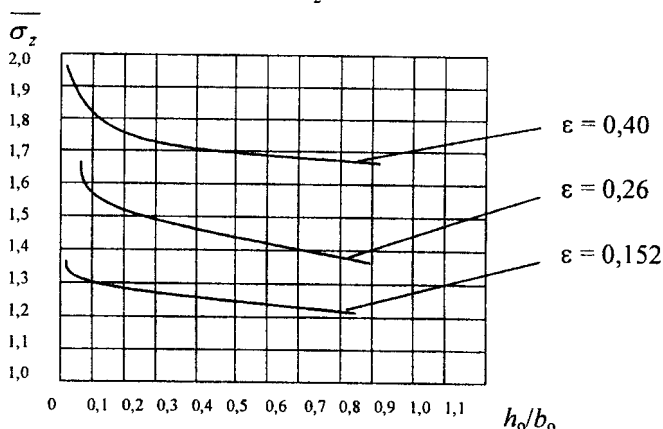


Рис.2 Зависимость давления от отношения h_0/b_0 и обжатия ϵ .

Л и т е р а т у р а

1. Лукашкин Н.Д., Кохан Л.С., Кондрашов А.А., Роберов И.Г. Уравнение пластичности в условиях сжатия заготовок из металлических порошков// Проблемы повышения качества подготовки специалистов в области художественной обработки металлов: Тезисы докладов II Всероссийской научно-практической конференции. – М.: МГВМИ, 2004. – С. 92 - 95.

2. Кохан Л.С., Лукашкин Н.Д., Роберов И.Г. Двуххордовая модель продольной прокатки спеченных заготовок// Известия ВУЗов. Черная металлургия. – 2004. – №5. – С. 42-46

3. Григорьев А.А., Куликовский Д.Н., Иванов В.Н. Теоретический анализ процесса холодной прокатки пористой спеченной заготовки// Известия ВУЗов. Черная металлургия. – 1991. – №3. – С. 52-55

DETERMINATION OF THE AVERAGE PRESSURE OF THE ROLLING BAKED PRESSED STOCKING UP FROM METALLIC POWDER

L.S. Kohan, I.G. Roberov, A.A. Kondrashov, B.F. Beleyubskiy,
and A.V. Shulgin

In accordance with experimental data, theoretical calculations of the pressures of the rolling were organized. The data show the small difference of the result in the limit 6-7%. Also, the comparisons between the results of the authors and theoretical calculation of the pressures of the rolling metallic powder described in the other source are presented and are built experimental graphs of the dependencies.