

**Расчет машиностроительных конструкций**

**ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА КАЛИБРОВКИ ПРИ ВАЛЬЦОВКЕ**

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

Г. Б. РЕМПЕЛЬ, *аспирант.*

*Московский государственный вечерний металлургический институт,  
112500, г. Москва, ул. Лефортовский вал, д. 26*

*Georgiirempel@mail.ru*

*В статье изложена методика выбора оптимальных деформационных и силовых параметров калибровки при вальцовке.*

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: вальцовка, прокатка, овал, квадрат, прямоугольник.

Из всей номенклатуры заготовок, применяемых в авиационной отрасли, свыше 40 % составляют детали удлиненной формы с резкой разницей площадей поперечных сечений вдоль оси – лопатки, закрылки, стойки и др. Перспективным способом получения такого типа заготовок является процесс вальцовки на ковочных вальцах. В зависимости от формы сечения изделия могут быть приняты несколько вариантов заготовок. Ниже предлагается методика выбора профиля заготовки на основании оптимизации кинематических и силовых параметров устойчивости процесса.

**Исследуем вначале калибровку «квадрат-овал» (рис. 1).**

Установим кинематику процесса, используя механику сплошных сред. Принимаем функцию перемещений « $U$ » в виде:  $U_x = k_1 \cdot x + k_2 \cdot y$ , где  $k_i$  – постоянные коэффициенты.

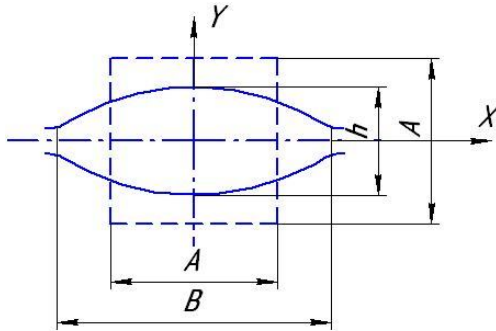


Рис. 1. Схема вальцовки с калибровкой «квадрат-овал».

При краевых условиях

$$x = 0 \text{ и } y = A/2$$

горизонтальное перемещение  $U_x = 0$ .

Тогда  $0 = k_1 \cdot 0 + k_2 \cdot h/2$  и  $k_2 = 0$ .

При  $x = B/2$  и  $y = 0$  перемещение

$$U_x = B/2 - A/2 = k_1 \cdot B/2,$$

откуда  $k_1 = 1 - A/B$ ,  $U_x = (1 - A/B)x$ ,

относительная деформация

$$\varepsilon_x = \frac{\partial U_x}{\partial x} = 1 - \frac{A}{B}. \tag{1}$$

Вертикальное перемещение  $U_y = k_1 \cdot x + k_2 \cdot y$ . При  $x = A/2$  и  $y = 0$  имеем

$$U_y = 0 = k_1 \cdot A/2 + k_2 \cdot 0 \text{ и } k_1 = 0,$$

а при  $x = 0$  и  $y = A/2$  получаем  $U_y = h/2 - A/2 = k_2 \cdot A/2$ , и  $k_2 = h/A - 1$ .

Соответственно,  $U_y = (h/A - 1) \cdot y$  и  $\varepsilon_y = \partial U_y / \partial y = h/A - 1$ . (2)

По ряду наших экспериментальных исследований определено отношение  $B/h$ :

$$\frac{B}{h} = 2,802 - 0,0056 \cdot A \text{ и } A = \frac{2,802 - B/h}{0,0056}. \tag{3}$$

Исследуем горячую калибровку изделия из стали 45 с размерами сечения  $B = 67$  мм,  $h = 26$  мм на вальцовочном стане с диаметром валков 350 мм.

Из соотношения (3) находим  $A = (2,802 - 67/26)/0,0056 = 40,18$  мм и принимаем  $A = 40$  мм. Вычисляем вытяжку:  $\mu = \frac{F_{кв}}{F_{об}} = \frac{A^2}{B \cdot h \cdot (\pi/4)} = 1,17$ .

Далее проводим проверку выбора размеров заготовки. Прежде всего, уточняется возможность осуществления уширения. Максимально возможное уширение  $\Delta B = B \cdot \varepsilon_x = 27$  мм. Среднее относительное давление:

$$\overline{\sigma_{cp}} = \frac{2}{\varepsilon_y \cdot \delta} \cdot \left( \frac{1}{(1 - \varepsilon_y)^{0,5(\delta-1)}} - 1 + 0,5 \cdot \varepsilon_y \right), \quad (4)$$

$R_k$  – катающий радиус,  $R_k = (0,9D_{вал} - h)/2 = 144,5$  мм. Тогда

$$\varepsilon_x = 1 - A/B = 1 - 40/67 = 0,4 \quad \text{и} \quad \varepsilon_y = h/A - 1 = 26/40 - 1 = -0,35;$$

$\delta$  – основной параметр прокатки,  $\delta = \frac{2 \cdot f}{\sqrt{A \cdot \varepsilon_y / R_k}} = \frac{2 \cdot 0,35}{\sqrt{40 \cdot 0,35 / 144,5}} = 2,25$ ,

$$\overline{\sigma_{cp}} = \frac{2}{0,35 \cdot 2,25} \cdot \left( \frac{1}{(1 - 0,35)^{0,5 \cdot 1,25}} - 1 + 0,5 \cdot 0,35 \right) = 1,23.$$

Затем по методике Колмогорова В. Л. [1] определяется коэффициент жесткости напряженного состояния  $K_{жс} = \overline{\sigma_{cp}} / \sqrt{3} = -1,23 / \sqrt{3} = -1,3$ . Отрицательный знак показывает напряжение сжатия. По величине  $K_{жс}$  по диаграмме пластичности [1] определяется степень деформации сдвига при разрушении  $\lambda_p$ , затем вычисляется степень деформации сдвига для процесса  $\lambda$ :

$$\lambda = 2 \cdot \sqrt{\varepsilon_x^2 + \varepsilon_y^2 - \varepsilon_x \cdot \varepsilon_y}, \quad \lambda = 2 \cdot \sqrt{0,4^2 + 0,35^2 - 0,4 \cdot 0,35}. \quad (5)$$

Определим используемый запас ресурса пластичности:

$$\psi = \lambda / \lambda_p = 0,755/4 = 0,189, \quad \text{что меньше допустимого запаса } [\psi] = 0,28 [1].$$

Усилие вальцовки рассчитывается по формуле:  $P = \overline{\sigma_{cp}} \cdot \sigma_T \cdot B \cdot l$ , (6)

где  $l$  – длина дуги захвата,  $l = \sqrt{A \cdot \varepsilon_y \cdot R_k} = \sqrt{40 \cdot 0,35 \cdot 144,5} = 44,98$  мм,  $\sigma_T$  – сопротивление пластической деформации,  $\sigma_T = \sigma_{T0} \cdot K_\varepsilon \cdot K_U \cdot K_T$ ,  $\sigma_{T0}$  – сопротивление пластической деформации при горячем процессе,  $\sigma_{T0} = 80$  МПа,  $K_\varepsilon$  – степень упрочнения, принимается по справочнику Целикова А.И., для обжатия  $\varepsilon_y = -0,35$ ;  $K_\varepsilon = 1,2$ ;  $K_U$  – скоростной коэффициент деформации, по [2]  $K_U = 1,33$ ;  $K_T$  – температурный коэффициент деформации, при  $T = 1100^\circ\text{C}$   $K_T = 0,75$  [2],  $\sigma_T = 80 \cdot 1,2 \cdot 1,33 \cdot 0,75 = 96$  МПа. Тогда усилие вальцовки

$$P = 1,23 \cdot 96 \cdot 67 \cdot 44,98 = 355853 \text{ Н.}$$

Последняя проверка устанавливает устойчивость самого профиля:

$$K_{уст} = P_{кр} / P > [K_{уст}] = 1,3;$$

где  $P_{кр}$  – критическое усилие,  $P_{кр} = \frac{J \cdot E \cdot \pi^2}{2 \cdot L_k}$ ,  $J$  – момент инерции,

$$J = 2 \cdot \int_{-B/2}^{B/2} (x^2) \cdot y \cdot dx, \quad \text{для овального сечения} \quad J = \frac{0,196h^2 B^2}{1 - (h/B)^2} = 516929,4 \text{ мм}^4,$$

$E = 1,6 \cdot 10^5$  МПа – модуль упругости,  $L_k$  – расстояние между направляющими роликами стана, для стана с диаметрами валков 350 мм  $L_k = 700$  мм, тогда

$$P_{кр} = \frac{516929,4 \cdot 1,6 \cdot 10^5 \cdot \pi^2}{2 \cdot 700} = 832134 \text{ Н.}$$

Запас устойчивости  $K_{уст} = 832134/355853 = 2,338 > [K_{уст}] = 1,3$ .

Отметим, что расход металла определяется площадью ее сечения:

$$F_{кв} = 40^2 = 1600 \text{ мм}^2.$$

Таким образом, просчитан весь режим данного варианта вальцовки.

## 2. Исследуем вариант калибровки «круг-овал» (рис. 1).

Горизонтальное перемещение в данном случае:  $U_x = k_1 \cdot x + k_2 \cdot y$ .

При краевых условиях:  $x = 0$  и  $y = B/2 - U_x = 0$ ; при  $x = B/2$  и  $y = 0 - U_x = (B-d)/2$ ,  $U_x = (1-d/B) \cdot x$  и  $\varepsilon_x = 1-d/B$ . Аналогичная по высоте модель определяет  $U_y = (h/d-1) \cdot y$ ,  $\varepsilon_y = h/d-1$ . По ряду наших экспериментальных исследований определено отношение

$$\frac{B}{h} : \frac{B}{h} = 0,53 - 0,0405 \cdot d, \text{ откуда } d = \frac{B/h - 0,53}{0,0405} = 50,54 \text{ мм.}$$

Принимаем  $d = 50$  мм, тогда  $\varepsilon_x = 1 - 50/67 = 0,254$  и  $\varepsilon_y = 26/50 - 1 = -0,48$ .

Вычисляем вытяжку:  $\mu = \frac{F_{кр}}{F_{ов}} = \frac{(\pi \cdot 4) \cdot d^2}{B \cdot h \cdot (\pi/4)} = 1,435$

Осуществляем проверку деформационного режима:  $\Delta B = B \cdot \varepsilon_x = 27$  мм.

Основной параметр прокатки:  $\delta = \frac{2 \cdot f}{\sqrt{\frac{d \cdot \varepsilon_y}{R_k}}} = \frac{2 \cdot 0,35}{\sqrt{\frac{50 \cdot 0,48}{144,5}}} = 2,382$ .

Среднее относительное давление по (4):

$$\overline{\sigma_{cp}} = \frac{2}{0,48 \cdot 2,382} \cdot \left( \frac{1}{(1-0,48)^{0,691}} - 1 + 0,5 \cdot 0,48 \right) = 1,419.$$

При  $K_{жс} = \frac{\overline{\sigma_{cp}}}{\sqrt{3}} = -\frac{1,419}{\sqrt{3}} = -0,82$   $\lambda_p = 4,1$ .

Степень деформации сдвига процесса по (5)  $\lambda = 0,832$ .

Используемый запас ресурса пластичности:

$$\psi = \frac{\lambda}{\lambda_p} = \frac{0,832}{4,1} = 0,203 < [\psi] = 0,28.$$

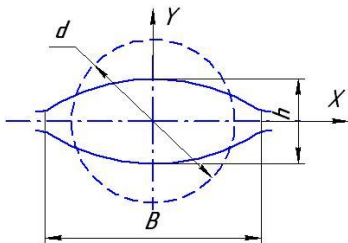


Рис. 2. Схема вальцовки с калибровкой «круг-овал».

Проверяем устойчивость изделия при заданном режиме. Сопротивление пластической деформации  $\sigma_T$  определяется коэффициентом упрочнения  $K_\varepsilon$ , скоростным коэффициентом  $K_U$ , начальным значением  $\sigma_{mo}$  и длиной дуги захвата

$$l = \sqrt{d \cdot \varepsilon_y \cdot R_k} = \sqrt{50 \cdot 0,48 \cdot 144,5} = 58,88 \text{ мм. При } \varepsilon_y = 0,48, K_\varepsilon = 1,2 \text{ по [2]}$$

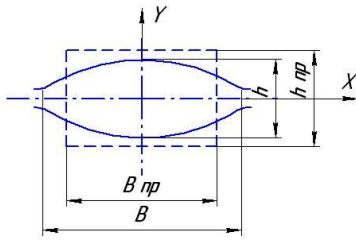


Рис. 3. Схема вальцовки с калибровкой «прямоугольник-овал».

$$K_U = 1,33; \sigma_T = 80 \cdot 1,2 \cdot 1,33 \cdot 0,75 = 96 \text{ МПа.}$$

Усилие вальцовки находим по формуле (6)  $P = 1,419 \cdot 96 \cdot 67 \cdot 58,88 = 537487 \text{ Н}$ . При неизменных в данном примере размерах овала  $P_{кр} = 832134 \text{ Н}$ . Тогда запас устойчивости

$$K_{уст} = 832134/355853 = 1,548 > [K_{уст}] = 1,3.$$

Отметим, что расход материала заготовки определяется площадью ее сечения:

$$F_{кр} = (\pi/4) \cdot 50^2 = 1962 \text{ мм}^2.$$

Таким образом, просчитан весь режим данного варианта вальцовки.

### 3. Исследуем вариант калибровки «прямоугольник – овал» (рис. 3).

По ряду наших экспериментальных исследований определено отношение  $h_{нр}$  и  $B_{нр}$  через коэффициент высотной деформации  $\eta$ :  $\eta = h_{нр}/h = 1,1 \div 1,6$ .

Принимаем  $\eta = 1,23$  и  $h_{нр} = 26 \cdot 1,23 = 32 \text{ мм}$ . Из условия вытяжки:

$$\mu = \frac{F_{нр}}{F_{ов}} = \frac{h_{нр} \cdot B_{нр}}{B \cdot h \cdot \pi/4} = 1,17;$$

$$\text{ширина прямоугольника } B_{нр} = \frac{1,17 \cdot 26 \cdot 67 \cdot \pi/4}{32} = 50 \text{ мм}.$$

Согласно формулам (1) и (2), соответственно:

$$U_x = \left( \frac{B}{B_{нр}} - 1 \right) \cdot x, \quad \varepsilon_x = \frac{B}{B_{нр}} - 1, \quad U_y = \left( \frac{h}{h_{нр}} - 1 \right) \cdot y, \quad \varepsilon_y = \frac{h}{h_{нр}} - 1,$$

$$\varepsilon_x = 67/50 - 1 = 0,34, \quad \varepsilon_y = 26/32 - 1 = -0,188.$$

$$\text{Проверка деформационного режима: } \Delta B = B_{нр} \varepsilon_x = 50(67/50 - 1) = 17 \text{ мм}.$$

$$\text{Основной параметр прокатки: } \delta = \frac{2 \cdot f}{\sqrt{h_{нр} \cdot \varepsilon_y / R_k}} = \frac{2 \cdot 0,35}{\sqrt{32 \cdot 0,188 / 144,5}} = 3,43.$$

$$\text{Среднее относительное давление по (4): } \sigma_{ср} = 1,185; K_{жс} = -1,185/\sqrt{3} = -0,684.$$

$$\text{Степень деформации сдвига при разрушении: } \lambda_p = 4,05.$$

$$\text{Степень деформации сдвига процесса вычисляем по формуле (5): } \lambda = 0,59.$$

$$\text{Используемый запас ресурса пластичности: } \psi = \frac{\lambda}{\lambda_p} = \frac{0,59}{4,05} = 0,146 < [\psi] = 0,28.$$

Проверяем устойчивость изделия при заданном режиме.

$$\text{При упрочнении имеем } \varepsilon_y = 0,188 \quad K_\varepsilon = 1,1; \sigma_T = 80 \cdot 1,15 \cdot 1,3 \cdot 0,75 = 92 \text{ МПа}.$$

$$\text{Длина дуги захвата: } l = \sqrt{h_{нр} \cdot \varepsilon_y \cdot R_k} = \sqrt{32 \cdot 0,188 \cdot 144,5} = 29,48 \text{ мм}.$$

$$\text{Усилие вальцовки по формуле (6): } P = 1,185 \cdot 92 \cdot 67 \cdot 29,48 = 215331,9 \text{ Н}.$$

$$\text{Запас устойчивости: } K_{уст} = 832134/215331,9 = 3,86 > [K_{уст}] = 1,3.$$

Отметим, что расход материала заготовки определяется площадью ее сечения:  $F_{нр} = 32 \cdot 50 = 1600 \text{ мм}^2$ . Таким образом, просчитан весь режим данного варианта вальцовки.

Ниже, в табл. 1 приведены основные параметры калибровки для изготовления заданного профиля.

Табл. 1. Параметры калибровки для изготовления профиля

Вид калибровки	Площадь сечения заготовки, мм <sup>2</sup>	Используемый запас ресурса пластичности	Запас устойчивости изделия	Усилие процесса, Н
Квадрат-овал	1600	0,189	2,34	355853
Круг-овал	1963	0,203	1,548	538847
Прямоугольник-овал	1600	0,146	3,86	215332

Анализ таблицы показывает, что оптимальным вариантом служит вальцовка с калибровкой «прямоугольник-параболический профиль», т.к. используется заготовка с наименьшей площадью сечения, процесс проводится при наименьшем усилии и обладает наибольшим запасом устойчивости.

Проведенный анализ показывает существенное повышение стабильности эксплуатационных свойств изделия, что подтверждено опытно- производственными испытаниями, проведенными на кафедре МиОМД МГВМИ. Установлено, что КИМ повышается на 15 – 20 %, силовая нагрузка снижается на 30 %, равномерность эксплуатационных свойств (распределение деформации) снижается на 25 – 30 %.

#### Л и т е р а т у р а

1. Колмогоров В. Л. Механика обработки металлов давлением. – М. Металлургия, 1986. – 688 с.
2. Целиков А. И., Томленов А. Д., Зюзин В. И. и др. Теория прокатки. – М. Металлургия, 1982. – 335 с.
3. Yang S., Kou S., Deng C. Research and application of precision roll-forging taper-leaf spring of vehicle// *Journal of Materials Processing Technology*. – Vol. 65, Number 1, March 1997. – PP. 268-271
4. Sedighi M., Mahmood M. An approach to simulate cold roll-forging of turbo-engine thin compressor blade// *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*. – 2009. – Vol. 81, Iss. 3. – PP. 191 – 198.
5. [www.americanmachinist.com/metal-forming-amp-joining/timken-installing-first-us-forge-rolling-line-mitsubishi](http://www.americanmachinist.com/metal-forming-amp-joining/timken-installing-first-us-forge-rolling-line-mitsubishi)
6. Hakan Karacaovali. Analysis of roll-forging process. – Graduate School of Natural and Applied Sciences, September 2005.

#### R e f e r e n c e s

1. Kolmogorov, V.L. (1986). *The Mechanics of Machining of Metals by Pressing*, Moscow, Metallurgiya, 688 p.
2. Tselikov, A.I., Tomlenov, A.D. (1982). *The Theory of Rolling*, Moscow, Metallurgiya, 335 p.
3. Yang, S.; Kou, S.; Deng, C. Research and application of precision roll-forging taper-leaf spring of vehicle, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 65, Number 1, March 1997, 268-271
4. Sedighi, M., Mahmood, M. (2009). An approach to simulate cold roll-forging of turbo-engine thin compressor blade, *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, Vol. 81, Iss. 3, 191 – 198.
5. [www.americanmachinist.com/metal-forming-amp-joining/timken-installing-first-us-forge-rolling-line-mitsubishi](http://www.americanmachinist.com/metal-forming-amp-joining/timken-installing-first-us-forge-rolling-line-mitsubishi)
6. Hakan Karacaovali (2005). Analysis of roll-forging process, Graduate School of Natural and Applied Sciences, September 2005.

### OPTIMIZATION OF CALIBRATION PROCESS WHEN FORGE-ROLLING

L. S. Kohan, G. B. Rempel  
 Moscow State Night Institute, Moscow

In the paper, the methodology of optimal choice of deformation and force parameters of calibration sets out when forge-rolling.

KEYWORDS: forge-rolling, rolling, oval, foursquare, rectangle.