

Л.С. Кохан¹, А.В. Алдунин², Г.Б. Ремпель¹

¹Московский государственный вечерний металлургический институт

²Московский государственный открытый университет им. В.С. Черномырдина

ВАЛЬЦОВКА ПРОФИЛЕЙ С РОМБИЧЕСКИМ СЕЧЕНИЕМ

Аннотация. Для выбора оптимальной заготовки при вальцовке профилей с ромбическим сечением предложено критерии расход металла и усилие вальцовки дополнить степенью использования запаса пластичности материала и запасом устойчивости профиля при вальцовке. Выполнены расчеты четырех вариантов калибровки. Анализ полученных результатов позволил определить оптимальный вариант калибровки «прямоугольник–ромб». Отмечено также повышение стабильности эксплуатационных свойств получаемого изделия.

Ключевые слова: вальцовка, профиль, круг, ромб, квадрат, прямоугольник.

FORGE ROLLING FOR RHOMBIC CROSS-SECTION PROFILE

Abstract. For a choice of optimum preform at rolling of profiles with rhombic section it is offered criterion expenditure of metal and effort of rolling to add with degree of use of a store of toughness of a material and a profile stability margin at rolling. Calculations of four variants of calibration are executed. The assaying of the received results has allowed to define an optimum variant of calibration “rectangle–rhombus”. Heightening of stability of operation properties of a received article is marked also.

Keywords: rolling, a profile, a circle, a rhombus, quadrate, a rectangle.

Из всей номенклатуры заготовок, применяемой в авиационной отрасли промышленности, свыше 40 % составляют детали удлиненной формы с резкой разницей площадей поперечных сечений вдоль оси – лопатки, закрылки, стойки и другие. Перспективным способом получения такого типа поковок является процесс вальцовки.

Процесс вальцовки профилей с ромбическим сечением осуществляется, как правило, из заготовки круглого сечения. В данной работе выполнен сравнительный анализ использования четырех вариантов калибровки. Традиционные критерии оптимизации процесса (расход металла и усилие вальцовки) дополнены степенью использования запаса пластичности и коэффициентом устойчивости профиля при вальцовке.

Исследуем вариант вальцовки с калибровкой «круг – ромб» (рис. 1).

При кинематическом исследовании принимаем горизонтальное перемещение материальной точки в деформируемом сечении в виде: $u_x = k_1x + k_2y$, где k_1, k_2 – коэффициенты, определяемые координатами точки сечения.

При краевых условиях $x = 0$ и $y = \frac{d}{2}$ $u_x = 0 = k_1 \cdot 0 + k_2 \frac{d}{2}$, откуда $k_2 = 0$.

При $x = \frac{d}{2}$ и $y = 0$ $u_x = \frac{B}{2} - \frac{d}{2} = k_1 \frac{d}{2}$, откуда $k_1 = \frac{B}{d} - 1$.

Соответственно, $u_x = \left(\frac{B}{d} - 1\right)x$ и

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u_x}{\partial x} = \frac{B}{d} - 1. \quad (1)$$

Вертикальное перемещение: $u_y = k'_1x + k'_2y$.

При $x = \frac{d}{2}$ и $y = 0$ $u_y = 0 = k'_1 \cdot \frac{d}{2} + k'_2 \cdot 0$, откуда $k'_1 = 0$.

При $x = 0$ и $y = \frac{d}{2}$ $u_y = \frac{h}{2} - \frac{d}{2} = k'_2 \frac{d}{2}$, откуда $k'_2 = \frac{h}{d} - 1$.

Соответственно, $u_y = \left(\frac{h}{d} - 1\right)y$ и

$$\varepsilon_y = \frac{\partial u_y}{\partial y} = \frac{h}{d} - 1. \quad (2)$$

Согласно ряду исследований вытяжка $\mu = 1,2 \div 1,6$.

Используем условие вытяжки $\mu = \frac{F_{кр}}{F_{ром}} = \frac{\frac{\pi}{4}d^2}{\frac{Bh}{2}}$, отку-

да диаметр

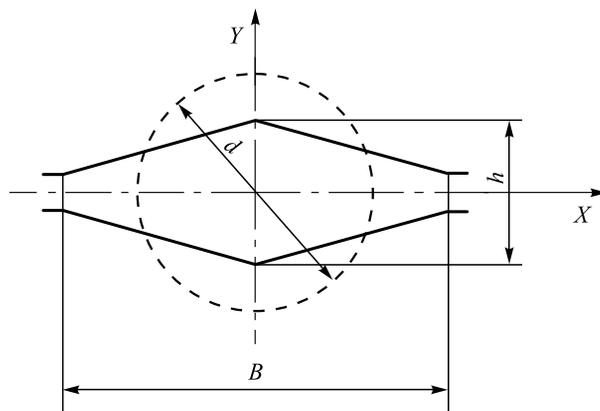


Рис. 1. Схема вальцовки с калибровкой «круг – ромб»

$$d = \sqrt{\frac{2\mu Bh}{\pi}}. \quad (3)$$

Проиллюстрируем данный вариант числовым примером при вальцовке профиля из стали 45 на стане с диаметром валков $D = 350$ мм и размерами сечения $B = 65$ мм и $h = 24$ мм.

По формуле (3) получаем $d = 37,29$ мм и принимаем ближайшее стандартное значение $d = 40$ мм.

$$\text{Тогда } \mu = \frac{\frac{\pi \cdot 40^2}{65 \cdot 24}}{2} = 1,61.$$

Далее по формулам (1) и (2) определяем $\varepsilon_x = 0,625$ и $\varepsilon_y = -0,4$.

Уширение $\Delta B = d\varepsilon_x = 40 \cdot 0,625 = 25$ мм.

Вычисляем по формуле Королева А.А. [1] среднее относительное давление:

$$\bar{\sigma}_{cp} = \left(\frac{2}{\varepsilon_y \delta} \right) \left[\frac{1}{(1 - \varepsilon_y)^{0,5(\delta - 1)}} - 1 + 0,5\varepsilon_y \right], \quad (4)$$

где δ – основной параметр вальцовки,

$$\delta = \frac{2f}{\sqrt{\frac{d\varepsilon_y}{R_k}}}, \quad (5)$$

где f – коэффициент трения, $f = 0,35$; R_k – катающий радиус, для сечения с высотой h определяем как

$$R_k = \frac{0,9D - h}{2} = 145,5 \text{ мм} \quad (6)$$

и по формуле (5) $\delta = 2,11$.

Тогда, согласно формуле (4), получаем $\bar{\sigma}_{cp} = 1,25$.

Затем по методике Колмогорова В.Л. [2] определяется коэффициент жесткости напряженного состояния $k_{ж} = \frac{\bar{\sigma}_{cp}}{\sqrt{3}} = -\frac{1,25}{\sqrt{3}} = -0,723$. Отрицательный знак показывает на действие напряжения сжатия.

По величине $k_{ж}$ из диаграммы пластичности [2] определяется степень деформации сдвига при разрушении $\lambda_p = 4,55$, затем, используя выражение

$$\lambda = 2\sqrt{\varepsilon_x^2 + \varepsilon_y^2 - \varepsilon_x \varepsilon_y}, \quad (7)$$

определяем степень деформации сдвига для процесса $\lambda = 1,096$.

Определяем степень использования запаса пластичности:

$$\psi = \frac{\lambda}{\lambda_p} = \frac{1,096}{4,55} = 0,24, \quad (8)$$

что меньше допускового значения $[\psi] = 0,28$ [21].

Далее определяем усилие вальцовки:

$$P = \bar{\sigma}_{cp} \sigma_{0д} k_\varepsilon B l, \quad (9)$$

где l – длина дуги захвата, $l = \sqrt{d\varepsilon_y R_k} = \sqrt{40 \cdot 0,4} \times \sqrt{145,5} = 48,25$ мм; $\sigma_{0д}$ – базисное значение сопротивления пластической деформации, для стали 45 при температуре 1100 °С, скорости деформации $0,1 \text{ с}^{-1}$ и относительной деформации $0,4$ $\sigma_{0д} = 80$ МПа; k_ε – коэффициент упрочнения, для $\varepsilon_y = -0,4$ $k_\varepsilon = 1,2$; k_t – температурный коэффициент, для $t = 1100$ °С $k_t = 0,75$ [3].

Скорость деформации $U = (\varepsilon_y v) / l$. Тогда при скорости вальцовки $v = 800$ мм/с получаем $U = (0,4 \cdot 800) / 48,25 = 6,63 \text{ с}^{-1}$ и скоростной коэффициент $k_u = 1,3$ [2].

Истинное сопротивление деформации $\sigma_s = \sigma_{0д} k_\varepsilon \times k_t k_u = 80 \cdot 1,2 \cdot 0,75 \cdot 1,3 = 94,3$ МПа и усилие вальцовки по формуле (8) $P = 1,25 \cdot 94,3 \cdot 65 \cdot 48,25 = 369\,763,8$ Н.

Проверяем запас устойчивости самого профиля по Эйлеру [2]:

$$K_{уст} = \frac{P_{кр}}{P} > [K_{уст}] = 1,3, \quad (10)$$

где $P_{кр}$ – критическое усилие,

$$P_{кр} = \frac{JE\pi^2}{2L_k^2}; \quad (11)$$

J – момент инерции, $J = 2 \int_{-\frac{B}{2}}^{\frac{B}{2}} (x^2) y dx$, для ромба $J = \frac{Bh^3}{2} = 449\,280 \text{ мм}^4$; E – модуль упругости, $E = 1,6 \cdot 10^5$ МПа;

L_k – расстояние между направляющими роликами стана, для стана с диаметрами валков 350 мм $L_k = 700$ мм.

Тогда критическое усилие (11) $P_{кр} = 723\,219,8$ Н и запас устойчивости (10) $K_{уст} = \frac{723\,219,8}{369\,763,8} = 1,956 > [K_{уст}] = 1,3$.

Расход материала заготовки определяется площадью ее сечения:

$$F_{кр} = \frac{\pi \cdot 40^2}{4} = 1256,6 \text{ мм}^2.$$

Исследуем вариант вальцовки с калибровкой «прямоугольник – ромб» (рис. 2).

Высота заготовки h_{np} определяется через высотный коэффициент $\eta = h_{np} / h = 1,1 \div 1,4$ [4].

Принимаем $\eta = 1,17$ и $h_{np} = \eta h = 1,17 \cdot 24 = 28,08$ мм, возьмем ближайшее стандартное значение $h_{np} = 30$ мм.

Из условия вытяжки ширина заготовки

$$B_{np} = \frac{\mu B}{h_{np}} = \frac{1,5 \cdot 65 \cdot 24}{30} = 39 \text{ мм, принимаем } B_{np} = 40 \text{ мм.}$$

Тогда получим $\mu = 1,538$.

Согласно (1) и (2) $\varepsilon_x = 0,625$ и $\varepsilon_y = -0,2$, а уширение $\Delta B = h_{np} \varepsilon_x = 40 \cdot 0,625 = 25$ мм.

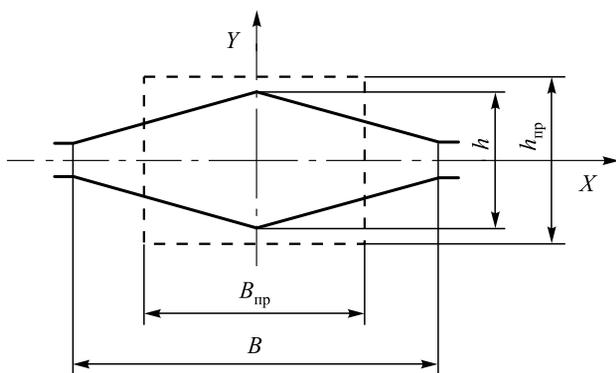


Рис. 2. Схема вальцовки с калибровкой «прямоугольник – ромб»

По выражению (5) получаем основной параметр вальцовки $\delta = 3,447$ и тогда по уравнению (4) $\bar{\sigma}_{ср} = 1,2$.

Коэффициент жесткости напряженного состояния $k_{ж} = -1,2/\sqrt{3} = -0,694$ и $\lambda_p = 4,5$.

По уравнению (7) получаем $\lambda = 1,105$ и согласно (8) степень использования запаса пластичности $\psi = 0,246 < [\psi] = 0,28$.

Критическое усилие (11) $P_{кр} = 723\,219,8$ Н, длина дуги захвата $l = 29,55$ мм.

Получаем $U = 6\text{ с}^{-1}$ и $k_u = 1,3$. Для $\epsilon_y = -0,2$ $k_\epsilon = 1,2$.

Тогда $\sigma_S = \sigma_{0д} k_\epsilon k_t k_u = 80 \cdot 1,2 \cdot 0,75 \cdot 1,3 = 86,4$ МПа.

По уравнению (9) усилие вальцовки $P = 1,2 \cdot 86,4 \times 65 \cdot 29,5 = 199\,120,3$ Н.

Запас устойчивости (10) $K_{уст} = 3,632 > [K_{уст}] = 1,3$.

Расход материала заготовки определяется площадью ее сечения:

$$F_{пр} = h_{пр} B_{пр} = 30 \cdot 40 = 1200 \text{ мм}^2.$$

Исследуем вариант вальцовки с калибровкой «повернутый квадрат – ромб» (рис. 3).

Из условия вытяжки сторона квадрата $A = \sqrt{\mu B \frac{h}{2}}$,

где $\mu = 1,4 \div 1,7$ [4].

Тогда $A = \sqrt{1,5 \cdot 65 \cdot \frac{24}{2}} = 34,2$ мм. Принимаем $A = 35$ мм.

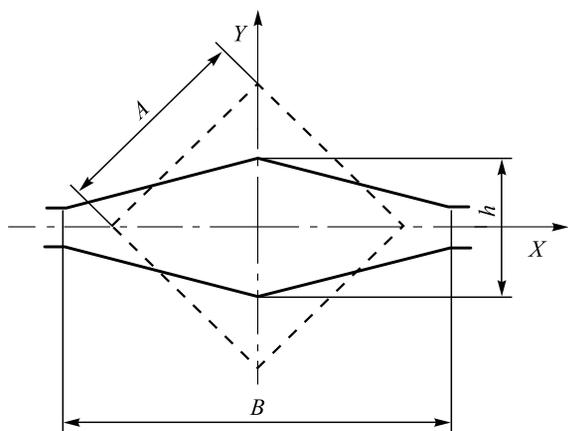


Рис. 3. Схема вальцовки с калибровкой «повернутый квадрат – ромб»

Согласно (1) и (2) соответственно $\epsilon_x = 0,313$ и $\epsilon_y = -0,515$.

Уширение $\Delta B = x_{пов} \epsilon_x = \sqrt{2} \cdot 35 \cdot 0,313 = 15,5$ мм, где $x_{пов}$ – диагональ квадрата.

Основной параметр вальцовки согласно (5) $\delta = 1,672$. Тогда по уравнению (4) $\bar{\sigma}_{ср} = 1,238$.

Коэффициент жесткости напряженного состояния $k_{ж} = -1,238/\sqrt{3} = -0,716$, $\lambda_p = 4,56$ и по выражению (7) $\lambda = 0,9$. Согласно (8) степень использования запаса пластичности $\psi = 0,2 < [\psi] = 0,28$.

Критическое усилие (11) $P_{кр} = 723\,219,8$ Н.

Длина дуги захвата $l = \sqrt{x_{пов} \epsilon_y R_k} = \sqrt{\sqrt{2} \cdot 35 \cdot 0,515} \times \sqrt{145,5} = 60,9$. Получив $U = 6,76\text{ с}^{-1}$, определяем $k_u = 1,3$. Для $\epsilon_y = -0,515$ коэффициент упрочнения $k_\epsilon = 1,33$ и

$$\sigma_S = \sigma_{0д} k_\epsilon k_t k_u = 80 \cdot 1,33 \cdot 0,75 \cdot 1,3 = 103,74 \text{ МПа}.$$

Тогда по уравнению (9) усилие вальцовки $P = 492\,759$ Н и запас устойчивости (10) $K_{уст} = 1,47 > [K_{уст}] = 1,3$.

Расход материала заготовки определяется площадью ее сечения:

$$F_{пов} = A^2 = 35^2 = 1225 \text{ мм}^2.$$

Исследуем вариант вальцовки с калибровкой «квадрат – ромб» (рис. 4).

Из условия вытяжки при $\mu = 1,85$ [4] определяем сторону квадрата заготовки: $A = \sqrt{\mu B \frac{h}{2}} = \sqrt{1,85 \cdot 65 \cdot \frac{24}{2}} = 38$ мм.

По установленным выше зависимостям: $\epsilon_x = 0,71$, $\epsilon_y = -0,37$ и $\Delta B = A \epsilon_x = 38 \cdot 0,71 = 26,98$ мм.

Основной параметр вальцовки по выражению (5) $\delta = 2,258$, по (4) $\bar{\sigma}_{ср} = 1,248$.

Коэффициент жесткости напряженного состояния $k_{ж} = -1,248/\sqrt{3} = -0,721$, $\lambda_p = 4,55$ и по уравнению (7) $\lambda = 1,23$. Степень использования запаса пластичности (8) $\psi = 0,27 < [\psi] = 0,28$.

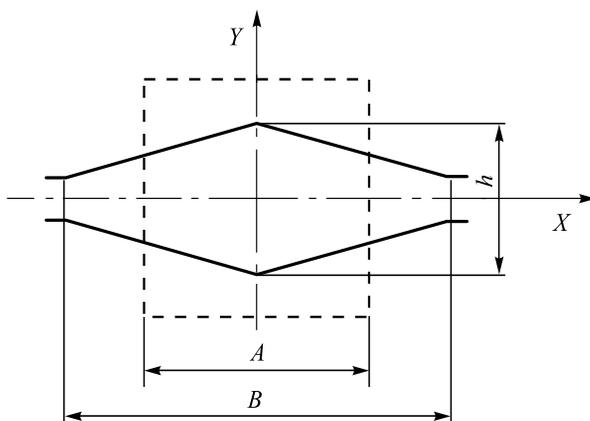


Рис. 4. Схема вальцовки с калибровкой «квадрат – ромб»

Характеристики калибровки для вальцовки ромбического профиля

Вид калибровки	Площадь сечения заготовки, мм ²	Используемый запас пластичности	Запас устойчивости	Усилие процесса, Н
Круг – ромб	1257	0,24	1,956	369 763
Прямоугольник – ромб	1200	0,246	3,63	199 120
Повернутый квадрат – ромб	1225	0,2	1,47	492 759
Квадрат – ромб	1444	0,27	2,14	337 836

Критическое усилие (11) $P_{кр} = 723\,219,8\text{ Н}$.

Длина дуги захвата $l = \sqrt{A\epsilon_y R_k} = \sqrt{38 \cdot 0,37 \cdot 145,5} = 45,23\text{ мм}$. При $U = 6,76\text{ с}^{-1}$ $k_u = 1,3$ и для $\epsilon_y = -0,37$ $k_\epsilon = 1,2$.

Тогда $\sigma_s = \sigma_{од} k_\epsilon k_t k_u = 80 \cdot 1,3 \cdot 0,75 \cdot 1,2 = 95,76\text{ МПа}$.

Усилие вальцовки (9) $P = 337\,835,5\text{ Н}$ и запас устойчивости (10) $K_{уст} = 2,14 > [K_{уст}] = 1,3$.

Расход материала заготовки определяется площадью ее сечения:

$$F_{кв} = A^2 = 38^2 = 1444\text{ мм}^2.$$

Таким образом, выполнены расчеты четырех вариантов вальцовки.

В таблице приведены основные расчетные характеристики разных вариантов калибровки для изготовления заданного профиля. Вариант калибровки «прямоугольник – ромб» выгодно отличается от других вариантов и обеспечивает повышение стабильности эксплуатационных свойств изделия. Опытно-промышленное опробование и последующие испытания показали также существенное повышение стабильности эксплуатационных свойств изделия.

Выводы. Выполненные расчеты и анализ их результатов показали, что при вальцовке профиля с ромбическим сечением оптимальным вариантом является калибровка «прямоугольник – ромб», так как при этом используется заготовка с наименьшей площадью сечения, процесс осуществляется при наименьшем усилии, обладает достаточно хорошей степенью использования запаса пластичности и наибольшим запасом устойчивости профиля. Кроме того, повышается стабильность эксплуатационных свойств готового изделия.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Королев А.А. Механическое оборудование прокатных и трубных цехов. – М.: Металлургия, 1987. – 480 с.
2. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением. – М.: Металлургия, 1986. – 688 с.
3. Теория прокатки: Справ. / А.И. Целиков, А.Д. Томленов, В.И. Зюзин и др. – М.: Металлургия, 1982. – 335 с.
4. Проектирование калибров сортовых станов и операций листовой штамповки / Л.С. Кохан, Н.Н. Лебедев, Ю.А. Морозов, Н.А. Молчанов – М.: ВИНТИ, 2007. – 340 с.

© 2013 г. Л.С. Кохан, А.В. Алдунин, Г.Б. Ремпель
Поступила 12 ноября 2012 г.