

УДК 621.73-52

**И. Б. Покрас**, доктор технических наук, профессор, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова  
**Э. Р. Ахмедзянов**, кандидат технических наук, доцент, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова  
**А. С. Житников**, аспирант, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

## РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТОВ ВЫТЯЖКИ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЛИЧЕСТВА ПЕРЕХОДОВ ПРИ ВАЛЬЦОВКЕ С УЧЕТОМ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ

*Рассматриваются вопросы, связанные с расчетом поперечных размеров вальцованной заготовки на основе использования некоторых результатов метода Ю. Б. Бахтинова. Описана методика и приведены сравнительные результаты расчетов с работами других авторов. Предложен алгоритм для автоматизации расчета числа проходов.*

**Ключевые слова:** горячая объемная штамповка, заготовительное производство, вальцовка, методика расчета размеров.

Расчету поперечных размеров при вальцовке посвящены работы многих отечественных авторов [1, 3 и др.]. В этих работах для расчета технологии вальцовки используются номограммы, это затрудняет разработку программ расчета формоизменения заготовок для использования в системах автоматизированного проектирования (САПР).

Целью данной работы является разработка такой методики, которая лишена указанных недостатков.

В статье рассматривается методика расчета формоизменения заготовок, основанная на методе эквивалентной полосы, разработанном Ю. Б. Бахтиновым для случая прокатки в калибрах [2]. Различие метода Бахтинова Ю. Б., разработанного для прокатки в калибрах, и предлагаемого метода заключается в том, что соотношение высоты  $h$  к ширине  $b$  заготовки в первом случае значительно меньше, чем при вальцовке из-за разных условий потери устойчивости, что дает существенно различные результаты в каждом из этих случаев.

Суть методики заключается в следующем. Расчет ведется против хода вальцовки. Конечные размеры вальцуемой заготовки  $h_n$  и  $b_n$  нам известны. При расчете обозначаем их  $h_1$  и  $b_1$ . Задача состоит в определении размеров заготовки, задаваемой в последний калибр. Эти размеры обозначим  $h_0$  и  $b_0$ .

Для расчета используется чертеж поковки, по которой определяются размеры вальцованной заготовки [1, 3], затем определяется общий максимальный коэффициент вытяжки при вальцовке:

$$\lambda_{\text{общ. макс}} = \frac{F_{\text{зг}}}{F_{\text{мин}}}, \quad (1)$$

где  $F_{\text{зг}}$  – площадь исходной заготовки;  $F_{\text{мин}}$  – минимальная площадь поперечного сечения вальцуемой заготовки.

Если вальцовка происходит за несколько пропусков, то суммарный коэффициент вытяжки  $\lambda_{\Sigma}$  опре-

деляется как произведение коэффициентов вытяжки в отдельных пропусках:

$$\lambda_{\Sigma} = \lambda_1 \lambda_2 \dots \lambda_n, \quad (2)$$

где  $\lambda_1 = \frac{F_{\text{зг}}}{F_1}, \lambda_2 = \frac{F_1}{F_2}, \dots, \lambda_n = \frac{F_{n-1}}{F_n}$  – коэффициенты вытяжки при первом, втором и последующих пропусках.

Количество пропусков определяется из условия

$$\lambda_{\text{общ. макс}} \geq \lambda_{\Sigma}. \quad (3)$$

Для определения размеров заготовки, задаваемой в последний калибр, использованы следующие выражения [2].

Максимально допустимое абсолютное обжатие:

$$\Delta h_{\text{max}} = 0,9\mu^2 R_k, \quad (4)$$

где  $\mu$  – коэффициент трения;  $R_k$  – катающий радиус:

$$R_k = R_0 - 0,5h_1 \sqrt{c_{f1}}, \quad (5)$$

$R_0$  – начальный радиус вала.

Абсолютное обжатие:

$$\Delta h = c_{f0} h_0 - c_{f1} h_1, \quad (6)$$

где  $c_{f0}, c_{f1}$  – коэффициенты формы заготовки, задаваемой в калибр, и, соответственно, выходящей из калибра, которые приведены в табл. 1 [3].

Таблица 1. Коэффициенты формы  $c_{f0}, c_{f1}$

Форма заготовки и калибра	Коэффициенты формы ( $c_{f0}$ и $c_{f1}$ )
Ромб	0,62
Прямоугольник, квадрат	0,98
Круг, эллиптический овал, ребровой овал	0,785
Овал	0,735
Плоский овал	0,86
Ребровой квадрат	0,59

Для предотвращения проскальзывания нужно чтобы выполнялось равенство

$$\Delta h \leq \Delta h_{\max} \quad (7)$$

Подставляя выражение (6) в (4), найдем высоту заготовки  $h_0$ , задаваемую в последний калибр, которая обеспечивает получение высоты заготовки на выходе  $h_1$ :

$$h_0 = \frac{0,9\mu^2 R_k + c_{f1} h_1}{c_{f0}} \quad (8)$$

Коэффициент трения  $\mu$  находим из выражения [3]:

$$\mu = a^r k_1 k_2 k_3 k_4, \quad (9)$$

где  $a^r = (1,05 - 0,0005t)$  – среднее значение коэффициента трения в зависимости от температуры вальцовки;

Значения коэффициентов  $k_1, k_2, k_3, k_4$  выбираем по данным работы [2].

Значения коэффициента  $k_1$ , учитывающего влияние металла валков и качество их изготовления, приведены в табл. 2.

Таблица 2. Значения коэффициента  $k_1$

Валки стальные	$k_1$	Валки чугунные	$k_1$
Полированные	0,8	Шлифованные	0,7
Шлифованные	0,9	Обточенные	0,8
Обточенные	1,0	С сеткой разгара	1,0
С сеткой разгара	1,2		
Насеченные	1,4	–	–

Значения коэффициента  $k_2$ , учитывающего влияние скорости прокатки, берутся согласно графику на рис. 1:

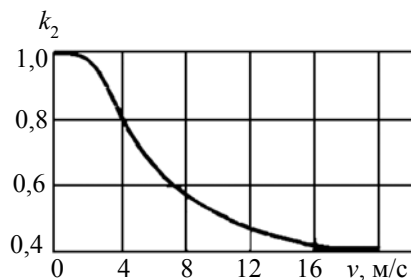


Рис. 1. Значение коэффициента  $k_2$  в формуле (9)

Сопоставление скорости вращения всех типов вальцов, применяемых для вальцовки [1, 3], показал, что максимальная скорость вращения достигает  $\approx 0,9$  м/с. В связи с этим исходя из значений, приведенных на рис. 1, коэффициент  $k_2$  можно принять равным 1.

Коэффициент  $k_3$ , учитывающий влияние пластичности металла для различных марок стали, выбирается в соответствии с табл. 3.

Таблица 3. Значения коэффициента  $k_3$

Стали или сплавы	Марка	$k_3$
Углеродистые	Ст1	1,0
Ледебуритные	P18	1,1
Перлитномартенситные	ШХ15, 4Х13	1,3
Аустенитные	1Х13НЧ19, 1Х18Н9Т	1,45
Ферритные	ЭИ341	1,55
Аустенитные с включением карбидов	X15Н60	1,6

Значения коэффициента  $k_4$ , учитывающего влияние формы заготовки и калибра на изменение коэффициента трения наиболее распространенных систем калибров, приведены в табл. 4.

Таблица 4. Значения коэффициента  $k_4$

Схема прокатки	$k_4$
Форма заготовки – форма калибра	
Прямоугольник – разрезной калибр; круг – гладкая бочка	0,89
Овал – ребровой овал; ребровой квадрат – ромб; овал – круг	0,975
Круг – эллиптический овал; эллиптический овал – круг	1,0
Ромб – квадрат; шестиугольник – шестигранник	1,025
Круг – овал; эллиптический овал – овал	1,035
Овал – квадрат; круг – ромб	1,12
Квадрат – овал	1,15
Шестиугольник – квадрат	1,22
Калибры сложной формы	$\sqrt{c_{f0} / c_{f1}}$

После определения высоты находим ширину заготовки, задаваемой в последний калибр, из выражения

$$b_0 = b_1 - \Delta b, \quad (10)$$

где  $\Delta b$  – уширение, определяемое по формуле

$$\Delta b = \left[ 1 - \frac{h_1}{h_0} \frac{\sqrt{c_{f1}}}{\sqrt{c_{f0}}} \left( \sqrt{\frac{h_0}{h_1} \frac{\sqrt{c_{f0}}}{\sqrt{c_{f1}}} + a^2} - a \right) \right] b_1, \quad (11)$$

$$a = \left( \frac{h_0}{h_1} \frac{\sqrt{c_{f0}}}{\sqrt{c_{f1}}} - 1 \right) (c_{\Delta b} - 0,5); \quad (12)$$

доля объема металла, смещенная в ширину:

$$c_{\Delta b} = \exp \left[ 1 - \left( 1 + \frac{b_1}{b_k} \right) \sqrt{\frac{h_1}{h_0} \frac{\sqrt{c_{f1}}}{\sqrt{c_{f0}}}} \right]; \quad (13)$$

критическая ширина полосы:

$$b_k = \sqrt{1 - \left( 1 - \frac{h_1}{h_0} \frac{\sqrt{c_{f1}}}{\sqrt{c_{f0}}} \right)^2 \frac{\delta^2 - 1}{\delta^2} \frac{2\delta - 1}{2\delta} l_d}, \quad (14)$$

$$\delta = \frac{2\mu l_d}{h_0 \sqrt{c_{f0}} - h_1 \sqrt{c_{f1}}} = 2\mu \sqrt{\frac{R_k}{h_0 \sqrt{c_{f0}} - h_1 \sqrt{c_{f1}}}}; \quad (15)$$

длина дуги захвата:

$$l_d = \sqrt{R_k \left( h_0 \sqrt{c_{f0}} - h_1 \sqrt{c_{f1}} \right)}. \quad (16)$$

Определив размеры  $h_0$  и  $b_0$ , находим величину вытяжки на последнем переходе:

$$\lambda_n = \frac{F_{n-1}}{F_n}.$$

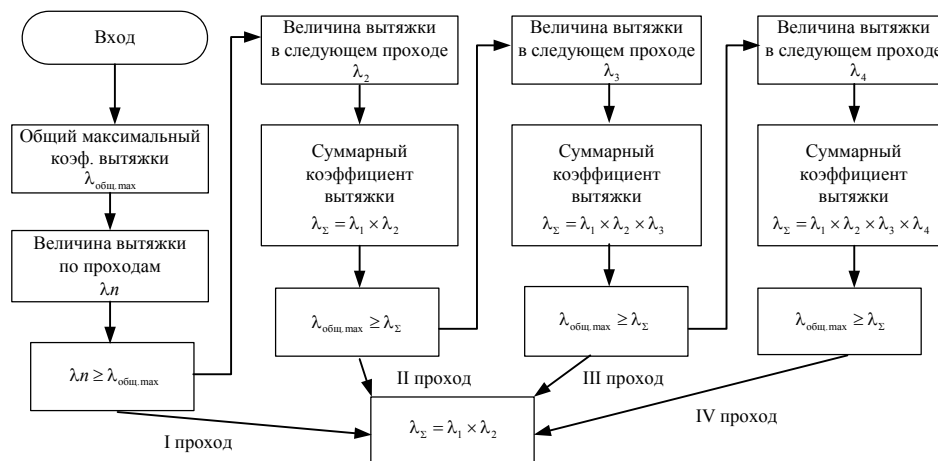


Рис. 2. Блок-схема определения числа проходов

Определив коэффициент вытяжки следующего прохода, находим суммарный коэффициент вытяжки  $\lambda_\Sigma$  и сравниваем его с  $\lambda_{общ. макс.}$ , и так до тех пор, пока не будет выполняться неравенство (3). Таким образом, количество необходимых проходов будет определяться величиной суммарной вытяжки, при которой будет выполняться неравенство (3).

После определения количества проходов необходимо добиться выполнения равенства

$$\lambda_\Sigma = \lambda_{общ. макс.} \quad (17)$$

Для этого, используя метод последовательного приближения, необходимо уменьшать величину обжатия до тех пор, пока не будет достигнуто равенство (17).

Пример. Определим поперечные размеры вальцованной заготовки по схеме «круг – овал – круг».

Расчет ведем против хода вальцовки. Определяем общий максимальный коэффициент вытяжки по формуле (1). Затем определяем суммарный коэффициент вытяжки по результатам двух проходов:

$$\lambda_\Sigma = \lambda_1 \lambda_2,$$

где  $\lambda_1 = \frac{F_{зг}}{F_{ов}}$ ,  $\lambda_2 = \frac{F_{ов}}{F_{кр}}$  – коэффициенты вытяжки в первом и втором проходах.

Подставим в выражение для коэффициента вытяжки во втором проходе  $F_{ов}$  и  $F_{кр}$ .

Площадь сечения овальной заготовки с учетом притупления определим по формуле

Если при этой величине вытяжки выполняется условие  $\lambda_n \geq \lambda_{общ. макс.}$ , то вальцовку можно осуществить за один проход, если нет, то для получения необходимых размеров вальцованной заготовки потребуется еще один или несколько проходов (см. рис. 2).

Расчет каждого последующего прохода производим в такой же последовательности, как и предыдущего.

$$F_{ов} = 0,33 \left( \frac{m}{h} + 2 \right) b_{ов} h_{ов},$$

где  $\frac{m}{h} = 0,2$ ;  $b_{ов}$ ,  $h_{ов}$  – ширина и высота овальной заготовки.

Площадь сечения круглой заготовки:

$$F_{кр} = \frac{\pi d_1^2}{4} = 0,785 d_1^2.$$

Подставляя значения  $F_{ов}$  и  $F_{кр}$  в формулу для определения  $\lambda_2$ , получим:

$$\lambda_2 = \frac{0,33 \cdot 2 \cdot 2 b_{ов} h_{ов}}{0,785 d_1^2}. \quad (18)$$

Для расчета вытяжки по этой формуле необходимо определить значения  $b_{ов}$  и  $h_{ов}$ .

Размеры овального сечения заготовки определим по формулам (8), (10), (11), (12), (13), (14), (15), (16), подставив коэффициенты формы  $c_{f0}$  и  $c_{f1}$ .

Подставляя найденные значения  $b_{ов}$  и  $h_{ов}$  в формулу (18), найдем величину коэффициента вытяжки во втором проходе  $\lambda_2$ .

Коэффициент вытяжки в первом проходе, в котором вальцуется круглая заготовка диаметром  $d_{зг}$  в овальном калибре, размеры которого  $b_{ов}$  и  $h_{ов}$  определены выше, может быть определен из следующего выражения:

$$\lambda_1 = \frac{F_{зг}}{F_{ов}} = \frac{0,785d_{зг}^2}{0,33 \cdot 2,2b_{ов}h_{ов}} = 1,08 \frac{d_{зг}^2 b_{ов}}{b_{ов}^2 h_{ов}}. \quad (20)$$

Определим суммарный коэффициент вытяжки за два прохода по формуле (2) и сравним его с общим максимальным коэффициентом вытяжки, рассчитанным по формуле (1), а также с равенством (7). Если значение суммарного коэффициента вытяжки удовлетворяет условию (3), то вальцовку можно осуществить за два прохода, если же суммарный коэффициент вытяжки меньше общего максимального, то требуется еще один или два прохода.

Если  $\lambda_{\Sigma}$  больше  $\lambda_{общ, макс}$ , то за счет уменьшения величины обжатия необходимо достигнуть равенства  $\lambda_{\Sigma} = \lambda_{общ, макс}$ .

Аналогичным образом производится расчет формоизменения и определение количества проходов при любых других схемах вальцовки.

Сравнение полученных результатов расчета поперечных размеров по предлагаемой методике при вальцовке по схеме «круг – овал – круг» с результатами расчета по методике Смирнова В. К. (рис. 3) [3], приведены в табл. 5. Из сравнения следует, что

совпадение результатов удовлетворительное и составляет по ширине ( $b_0$ ) 1,15 %, по высоте ( $h_0$ ) 1,2 %. С учетом этого данная методика может быть рекомендована к применению.

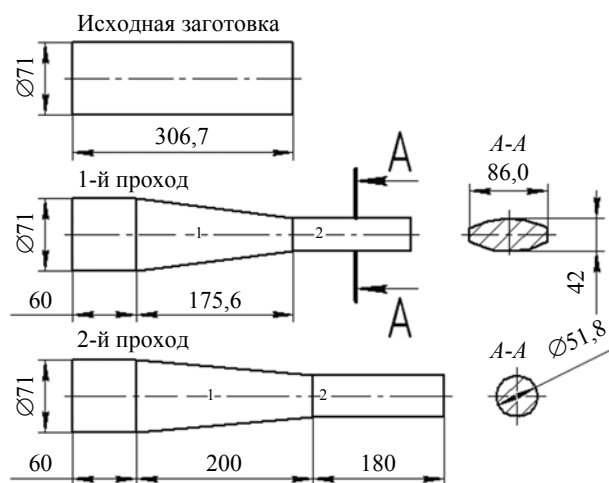


Рис. 3. Исходная заготовка и переходы вальцованной заготовки

Таблица 5. Сравнение полученных результатов

Схема вальцовки	Методика вальцовки	$F_{зг}$	$F_{мин}$	$N$	$d_0$	$b_0$	$d_1$	$h_0$	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_{\Sigma}$	$\lambda_{общ, макс}$
Круг – овал – квадрат	Предлагаемая методика	3957	2106	2	71,0	87	51,8	41,5	1,51	1,24	1,87	1,87
Круг – овал – квадрат	Методика Смирнова В. К.	3957	2106	2	71,0	86,1	51,8	42,0	1,38	1,36	1,87	1,87

#### Библиографические ссылки

1. Апрошенко А. П. Технология горячей вальцовки. – Л. : Машиностроение, 1969. – 176 с.

2. Северденко В. П., Бахтинов Ю. В., Бахтинов В. Б. Валки для профильного проката. – М. : Металлургия, 1979. – 224 с.

3. Смирнов В. К., Литвинов К. И., Харитонин С. В. Горячая вальцовка заготовок. – М. : Машиностроение, 1980. – 153 с.

I. B. Pokras, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

E. R. Akhmedzyanov, PhD in Engineering, Assistant Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

A. S. Zhitnikov, Post-graduate, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

#### Calculation of Rolling-Out Coefficients and Definition of Transitions Number at Milling with Account of Friction Constant

The paper considers questions related to calculation of milled blank cross-section dimensions applying certain results of J.B. Bakhtinov method. The calculation procedure is described and calculation results are compared with those obtained by other authors. The algorithm of automation of transitions number calculation is offered.

**Key words:** forging process, blank production, milling, dimensions calculation method.