

# О расчете некоторых параметров прокатки полос

Достоверность расчета геометрических, кинематических и энергосиловых параметров прокатки в гладких валках и в калибрах обеспечивает разработку рациональных режимов деформации, установление необходимых параметров оборудования, мощности главных приводов. Например, при проектировании вытяжных калибров (ромбические, овальные, квадратные, шестиугольные и т. п.) для прокатки сортовых профилей важно предварительно определить величину уширения по оси калибра. Для теоретического расчета уширения в указанных калибрах разработаны модели, обеспечивающие получение результатов с той или иной точностью [1-9 и др.]. Наиболее ранние расчетные модели для определения осевого уширения в вытяжных калибрах разработаны М. С. Мутьевым [1].

Для вытяжной системы калибров ромб-квадрат автором [1] получены следующие зависимости:

$$\left. \begin{aligned} \text{квадрат-ромб} - \Delta b_0 &= (0,2 + 0,08l_d / B_{cp}) \frac{b}{H} \cdot \Delta h; \\ \text{ромб-квадрат} - \Delta b_0 &= (0,2 + 0,12l_d / B_{cp}) \frac{b}{H} \cdot \Delta h, \end{aligned} \right\} (1)$$

где  $\Delta b_0$  – уширение по оси калибра;  $l_d$  – средняя длина дуги контакта;  $B_{cp}$  – средняя ширина полосы в калибре;  $b$  – ширина полосы после прокатки;  $H$  и  $\Delta h$  – линейные размеры заготовки и абсолютное обжатие полосы по оси калибра.

Для иных систем калибров автор [1] предлагает для расчета осевого уширения использовать формулу Э. Зибеля

$$\Delta b_0 = C \frac{\Delta h_{cp}}{H_{cp}} \sqrt{R \cdot \Delta h_{cp}}, \quad (2)$$

где  $H_{cp}$  и  $\Delta h_{cp}$  – средняя высота и обжатие полосы;  $R$  – средний радиус валка в калибре;  $C$  – коэффициент, определяемый экспериментально и в зависимости от системы калибров, равный  $C = 0,25-0,50$ .

Формулу Э. Зибеля для расчета уширения в виде

$$\Delta b_0 = \theta \frac{\Delta h}{H} \sqrt{R \cdot \Delta h} \quad (3)$$

предлагают использовать и авторы работы [5]. Здесь коэффициент  $\theta$  учитывает форму калибра и размеры характерных зон течения металла в очаге деформации и определяется экспериментально для каждой системы калибров.

В. И. Зюзин и А. М. Кривенцов [7] для расчета

Выполнен анализ различных моделей для расчета уширения в калибрах вытяжных систем. Установлены и рекомендованы для практического использования расчетные модели, обеспечивающие сходимость расчетных данных с опытными. Представлена оценка параметров, характеризующих неплланшетность полос

уширения в калибрах предлагают формулу, полученную для гладких валков и дополненную экспериментально определенным коэффициентом  $k_\phi$ , учитывающим форму заготовки и калибра. Для гладких валков коэффициент  $k_\phi = 1$ , а для калибров  $k_\phi = 0,7-1,2$ . Регрессионные модели расчета уширения в калибрах предложены в работах [3, 6]. Теоретическая модель для расчета среднего и осевого уширений в вытяжных калибрах предложена в работах [8, 9]:

$$\Delta b = \frac{\Delta h_{cp} \cdot B_{cp} / h_{cp}}{1 + C_f (1 + \operatorname{tg} \phi / f_b) (B_{cp} / l_d)}, \quad (4)$$

где  $\phi$  – средний угол наклона стенок калибра;  $l_d$  – средняя длина очага деформации;  $B_{cp}$  – средняя ширина контактной поверхности;  $f_b$  – коэффициент трения по ширине контакта;  $C_f$  – коэффициент, учитывающий соотношение между коэффициентами трения в поперечном и продольном направлениях.

По модели (4) определение средних параметров  $\Delta h_{cp}$  и  $B_{cp}$  выполняют исходя из фактической контактной поверхности [8, 10, 11], которые, в основном, и определяют величину поперечного течения металла как при прокате в гладких валках, так и калибрах. Достоверность расчетных величин  $\Delta h_{cp}$  и  $B_{cp}$  подтверждена опытными данными [12]. Соответствующую длину дуги контакта определяют по формуле

$$l_d = \sqrt{n} \cdot \sqrt{R_1 \cdot \Delta h}, \quad (5)$$

где  $n$  – коэффициент формы контактной поверхности [8, 10, 11];  $R_1$  – радиус валка по оси калибра.

Средний угол наклона стенки калибра определяют по формулам для калибров:

$$\begin{aligned} &\text{– квадрат, ромб, шестиугольник} \\ &\operatorname{tg} \phi = h / b; \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} &\text{– овал-круг, ребровый овал-овал} \\ &\operatorname{tg} \phi = 0,075 - 0,51 [1 - 1,93(1 - 0,25b / h^{2,3})]; \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} &\text{– квадрат-овал} \\ &\operatorname{tg} \phi = \frac{h}{b} \left[ \frac{1 - (B/b)^{n_{об}}}{1 - B/b} \right], \end{aligned} \quad (8)$$

где  $h$  и  $b$  – высота и ширина вреза калибра в валки;  $B$  – ширина квадрата;  $n_{об}$  – показатель степени:

$$b/h \leq 1,5 - n_{об} = 3,0; \quad b/h = (2,0 \dots 2,5) - n_{об} = 2,30;$$

$$b/h = 1,8 - n_{об} = 2,65; \quad b/h = 2,5 - n_{об} = 2,0.$$

По экспериментальным данным уширения различных авторов [10] установлено, что при расчете уширения коэффициент  $C_f = f_b / f$  зависит от параметра  $B_{cp} / l_d$  и может быть определен из формул

$$C_f = 0,6 + 2,8(B_{cp} / l_d - 0,6)^{1,2}, \quad (9)$$

при  $B_{cp} / l_d = 0,50 - 1,15$ ;

$$C_f = 1,06 + 0,77 B_{cp} / l_d, \quad (10)$$

при  $B_{cp} / l_d > 1,15$ .

Коэффициент трения в поперечном направлении деформируемого металла равен

$$f_b = C_f f. \quad (11)$$

Коэффициент трения  $f$  в продольном направлении рассчитывают по известным моделям автора [13-16]. В этих работах даны также модели расчета напряжения течения металла  $\sigma_t$ , среднего нормального контактного напряжения  $p_{cp}$  и других параметров прокатки. Модели для расчета параметров прокатки  $f$ ,  $\sigma_t$  и  $p$ , представленные в работе Б. П. Середы [17], являются перепечаткой оригинальных моделей из работ [13, 16] без ссылки на первоисточник, что, несомненно, является нарушением научной этики и недопустимым.

Формула (4) позволяет рассчитать среднее уширение в калибрах. Для перехода к осевому уширению в работах [8, 9, 18] используют выражение

$$\Delta b_0 = \Delta b / n_n, \quad (12)$$

где  $n_n$  – коэффициент, учитывающий форму простора на уширение в калибре:  $n_n = 0,5$  (ромб, квадрат, шестиугольник);  $n_n = 0,7$  (овал, круг).

Для оперативного расчета осевого уширения в калибрах различных систем в работах [8, 9, 19] предложены регрессионные выражения, полученные путем обработки экспериментальных данных Г. Цоухара [12] ( $m = \Delta h_{cp} B_{cp} / h_{cp}$ ):

$$\left. \begin{array}{l} \text{квадрат-ромб } (m \leq 20) - \Delta b_0 = 0,52 C_n C_m (3,85 + m); \\ \text{ромб-ромб } (m \leq 20) - \Delta b_0 = 0,37 C_n C_m (4 + m); \\ \text{овал-квадрат } (m \leq 20) - \Delta b_0 = 0,8 C_n C_m (4 + m); \\ \text{квадрат-овал } (m \leq 40) - \Delta b_0 = 25 C_n C_m (1 - (1 - 0,02m)^2); \\ \text{круг-овал } (m \leq 25) \\ \text{овал-ребровой овал} \end{array} \right\} - \Delta b_0 = 0,31 C_n C_m (15,3 + m), \quad (13)$$

где  $C_m$  – коэффициент, учитывающий влияние марки стали [8];  $C_n$  – коэффициент, учитывающий влияние ширины полосы

$$\left. \begin{array}{l} C_n = 0,24 + B_{cp} / l_d, \text{ при } B_{cp} / l_d \leq 0,76; \\ C_n = e^{(0,9 - 1,2 B_{cp} / l_d)^{0,9}}, \text{ при } B_{cp} / l_d > 0,76. \end{array} \right\} \quad (14)$$

В работе [20] приведена формула для расчета уширения в калибрах (формула Б. П. Середы), которая имеет вид

$$\Delta b = k_\sigma k_f k_d k_\theta \frac{\varepsilon_h l_d}{1 + \sin \varphi / f_\mu}, \quad (15)$$

где  $k_\sigma$  – физико-механический коэффициент;  $k_f$  – коэффициент, учитывающий влияние трения;  $k_d$  – размерный коэффициент балла зерна;  $k_\theta$  – экспериментальный коэффициент, учитывающий длину участков очага уширения металла.

Данные об указанных коэффициентах в работе [20] не приводятся. Отсутствуют указания где их можно найти. Параметры  $\varepsilon_h$ ,  $l_d$ ,  $\varphi$ ,  $f_\mu$  не расшифрованы. Если предположить, что  $\varepsilon_h = \Delta h_{cp} / H_{cp}$ ,  $l_d = \sqrt{R \cdot \Delta h_{cp}}$ , то формула (15) примет вид формулы Э. Зибеля [формула (2)]

$$\Delta b = C \frac{\Delta h_{cp}}{H_{cp}} \sqrt{R \cdot \Delta h_{cp}},$$

в которой коэффициент  $C$  будет равен

$$C = \frac{k_\sigma k_f k_d k_\theta}{1 + \sin \varphi / f_\mu},$$

и значения которого нельзя определить в числовом выражении, так как параметры, входящие в числитель и знаменатель неизвестны. Тем не менее автор [20] утверждает, что формула (15) дает близкие к опытным величины уширения в калибрах различных систем. Это не соответствует действительности, так как выполнить расчеты по формуле (15) не представляется возможным в силу указанных выше причин, а сравнительный анализ показывает, что текст статьи Середы Б. П. [20] полностью перепечатан из работ [8, 9] без ссылки на фамилию автора оригинальных исследований [8, 9].

Теоретические исследования экспериментальных данных Г. Цоухара [12] по уширению показали, что по сравнению с формулами (1), (2), (5) и В. И. Зюзина и А. И. Кривенцова [7] модели (4) и (13) дают наиболее близкие к опытным [12] величины уширения (таблица).

Как следует из данных таблицы, при прокатке в первых калибрах систем квадрат-ромб и квадрат-овал по всем теоретическим моделям расчетные величины существенно отличаются от опытных значений, что, очевидно, обусловлено изменением размеров исходного квадрата и влиянием печной окалины после нагрева. Для всех остальных случаев средняя величина несоответствия  $\Delta b_{oi} / \Delta b_{оп}$  составляет соответственно по формулам

$$\begin{array}{ll} (4) - 0,87 - 1,03; & (1), (2) - 0,57 - 1,26; \\ (13) - 0,85 - 1,14; & (5) - 0,59 - 1,12; \\ & [7] - 0,46 - 1,17. \end{array}$$

Меньшая средняя ошибка в расчете получена при использовании теоретической модели (4), которая обеспечивает совпадение с опытными данными

Таблица  
Опытные и расчетные данные осевого уширения  
в калибрах различной формы (опытные данные  
Цоухара [12])

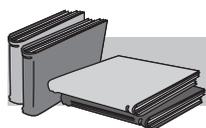
Форма калибра	Опыт $\Delta b_{оп}$ , мм [12]	Расчетные величины $\Delta b_0$ (мм) по формулам				
		(4)	(13)	(1), (2)	(5)	(7)
1	2	3	4	5	6	7
система квадрат-ромб						
Ромб	3,60	8,4	12,3	7,25	7,1	8,8
Квадрат	7,45	5,6	8,5	5,4	8,3	10,9
Ромб	8,70	8,5	8,9	5,1	5,1	7,6
Квадрат	7,35	8,8	9,0	4,8	5,9	7,8
Ромб	10,55	13,2	10,0	5,4	6,1	8,3
Квадрат	7,70	7,6	8,2	5,2	5,9	7,6
система квадрат-овал						
Овал	9,5	14,1	20,7	16,4	-	10,1
Квадрат	11,8	6,3	9,7	4,95	-	5,8
Овал	16,9	13,1	17,5	17,6	-	10,6
Квадрат	8,2	8,3	7,9	6,2	-	4,3
Овал	15,9	15,6	15,6	7,8	-	8,4
Квадрат	8,4	7,5	6,2	4,97	-	3,3
система круг-овал						
Овал	7,0	6,3	8,5	9,8	-	6,2
Круг	6,3	6,1	6,8	11,7	-	6,6
Овал	9,9	9,9	11,3	13,0	-	7,5
Круг	6,1	6,0	5,3	3,0	-	6,1
Овал	10,7	9,5	10,7	11,7	-	6,7
Круг	5,2	6,05	4,42	4,0	-	6,3

в пределах 0,87-1,03 и является вполне приемлемой для практического использования.

Каждая публикация должна представлять интерес для теории или практики производства. Однако, опубликованный в работе [21] материал вызывает определенные сомнения в его достоверности и полезности. Авторы [21] претендуют на методику определения показателя формы полосы до и после прокатки и коэффициента выравнивания полосы, которые ранее достаточно подробно рассмотрены в работе Ю. Д. Железнова [22]. В работе [21] величина непланишетности полосы оценивается известным формальным выражением

$$\phi_{л} = \frac{l_c - l_k}{bl}, \quad (16)$$

не несущим в себе физического смысла, и которое принято авторами [21] базовым для дальнейших выкладок ( $l_c$ ,  $l_k$  и  $l$  – длины неровного участка листа соответственно по середине ширины, на краю и средняя;  $b$  – ширина листа).



## ЛИТЕРАТУРА

1. Мутьев И. С. Калибровка черновых валков. – М.: Металлургиздат, 1954. – 190 с.
2. Тарновский И. Я. Формоизменение при пластической обработке металлов. – М.: Металлургиздат, 1954. – 534 с.
3. Смирнов В. К., Шилов В. А., Инатович Ю. В. Калибровка прокатных валков. – М.: Металлургия, 1987. – 368 с.
4. Минкин А. В. Расчет систем вытяжных калибров. – М.: Металлургия, 1989. – 208 с.

На стр. 118 [21] авторы приводят выражение (11)

$$\frac{l_{c1} - l_{k1}}{l_1} = \frac{l_{c0} - l_{k0}}{l_0} + \frac{\Delta\lambda_y}{\lambda}, \quad (17)$$

где  $\lambda$  – средняя вытяжка по ширине листа;  $\Delta\lambda_y$  – неравномерность вытяжки по ширине листа (очевидно неравномерность распределения коэффициентов вытяжек); «0» и «1» – индексы, соответствующие размерам листа до и после прокатки.

Возникает вопрос, чем отличаются в выражении (17) параметры  $l_{c1} - l_{k1}/l_1$  и  $\Delta\lambda_y/\lambda$  для готового листа. По существу они должны быть одинаковы.

Тогда зачем в выражении (17) дополнительный параметр  $l_{c0} - l_{k0}/l_0$  для исходной заготовки (выражение (11) в работе [21])? С учетом сказанного, непонятно выражение (14) [21] для расчета коэффициента выравнивания формы листа  $k_{в.ф.}$ , который, с учетом выражений (4) и (5) [21], будет равен; ( $B \approx b$ )

$$k_{в.ф.} = \phi_{л1}/\phi_{л0} = \frac{l_{c01} - l_{k1}}{l_0} \frac{l_0}{l_1}, \quad (18)$$

где  $B$  – ширина листа до прокатки.

Выражение (18) не имеет физического смысла, так как не учитывает влияние на непланишетность листа неравномерности распределения внешних и внутренних напряжений по ширине листа (полосы). Влияние этих напряжений на неравномерность деформации по ширине полосы отображается известным уравнением (закон Гука) [22]

$$\Delta\lambda_y = \lambda \cdot \Delta\sigma_n / E, \quad (19)$$

где  $E$  – модуль упругости материала полосы;  $\Delta\sigma_n$  – неравномерность распределения внутренних и внешних напряжений по ширине полосы.

Отметим также, что отсутствует квалифицированный анализ расчетных и опытных данных, по которым невозможно рассчитать параметры непланишетности листов. Точность измерения толщин полос, приведенных в таблице [21], недостаточна для расчета параметров  $\Delta\lambda_y$  и  $\phi_{л1}$ .

### Выводы

Выполнен анализ различных моделей для расчета уширения в калибрах вытяжных систем. Установлены и рекомендованы для практического использования модели, обеспечивающие сходимость расчетных данных с опытными в пределах 0,83-1,14. Представлена оценка параметров, характеризующих непланишетность полос.

5. Эффективность деформации сортовых профилей / С. А. Тулупов, Г. С. Гун, В. Д. Онискив и др. – М.: Металлургия, 1990. – 280 с.
6. Берковский В. С. Теоретическое исследование процесса прокатки в калибрах вытяжных систем // Теория и технология процессов пластической деформации. – М.: МИСиС, 1994. – С. 91-101.
7. Теория прокатки: Справочник / А. И. Целиков, А. Д. Томленов, В. И. Зюзин и др. – М.: Металлургия, 1982. – 335 с.
8. Николаев В. А. Деформация металла при прокатке в калибрах. – Запорожье: ЗГИА, 2006. – 196 с.
9. Николаев В. А. Оценка формул для расчета уширения в калибрах // Металлургическая и горнорудная пром-сть. – 2007. – № 1. – С. 43-46.
10. Николаев В. А. Уширение металла при прокатке // Теория и практика металлургии. – 1997. – № 3. – С. 8-11.
11. Николаев В. А. Расчет среднего обжатия при прокатке в калибрах вытяжных систем // Изв. вузов. Чер. металлургия. – 2000. – № 7. – С. 38-40.
12. Цоухар Г. Силовые воздействия при прокатке в вытяжных калибрах. – М.: Металлургиздат, 1963. – 207 с.
13. Николаев В. А. К расчету коэффициента трения при горячей прокатке // Изв. вузов. Чер. металлургия. – 1994. – № 11. – С. 21-24.
14. Николаев В. А. Расчет усилия при горячей прокатке // Изв. вузов. Там же. – 2005. – № 11. – С. 24-30.
15. Николаев В. А. Оценка точности формул для расчета среднего нормального контактного напряжения при холодной прокатке // Изв. вузов. Там же. – 2004. – № 11. – С. 32-36.
16. Николаев В. А. Теория прокатки. – Запорожье: ЗГИА, 2007. – 228 с.
17. Серета Б. П. Прокатне виробництво. Навчальний посібник. – Запоріжжя: ЗДІА, 2008. – 312 с.
18. Николаев В. А. Расчет уширения с учетом формы калибра // Изв. вузов. Чер. металлургия. – 1999. – № 9. – С. 28-32.
19. Николаев В. А. Расчет уширения металла при прокатке в калибрах // Металлургическая и горнорудная пром-сть. – 2006. – № 5. – С. 48-52.
20. Серета Б. П. Оцінка формул для розрахунку розширення в калібрах за експериментальними даними. // – Донецьк: ДонНТУ, 2008. – Вип. 10 (141). – С. 77-83.
21. Дослідження передавальних коефіцієнтів форми штаби в нерегульованій кліті / Б. П. Серета, М. Г. Прицип, І. В. Кругляк, Ю. О. Білоконь. – Донецьк: ДонНТУ, 2008. – Вип. 10 (141). – С. 116-121.
22. Железнов Ю. Д. Прокатка ровных листов и полос. – М.: Металлургия, 1971. – 200 с.

## Summary

V. Nikolayev

### About some rolling parameters calculation

In paper the assaying of various computational models of a broadening in drafting device calibers is executed. Computational models providing convergence of design data with experimental ones are fixed and recommended for practical use. The estimation of the parameters describing strips flatness presented.

## Анотація

В. О. Ніколаєв

### Про розрахунок деяких параметрів прокатки

Виконано аналіз різноманітних моделей для розрахунку розширення в калібрах витяжних систем. Встановлені та рекомендовані для практичного використання розрахункові моделі, що забезпечують збігання розрахункових даних з дослідними. Наведена оцінка параметрів, що характеризують непланшетність штаб.

## Ключевые слова

Прокатка, энергосиловые параметры, уширение, коэффициент трения, модель расчета

## ПРОДОЛЖАЕТСЯ ПОДПИСКА ЖУРНАЛА НА 2010 ГОД

Для того чтобы подписаться на журнал через редакцию, необходимо направить письмо-запрос или факс в адрес редакции. Счет-фактура согласно запросу высылается письмом или по факсу.

Стоимость одного номера журнала – 28 грн.

Годовая подписка для Украины – 336 грн.

Годовая подписка для зарубежных стран – 90 \$.

Редакция может предоставить электронную версию журнала.