

УДК 621.774

DOI 10.52928/2070-1616-2023-47-1-11-19

## МЕТОД РАСЧЕТА УШИРЕНИЯ ПОЛОС ПРИ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКЕ

канд. техн. наук, доц. С.В. ПИЛИПЕНКО

(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)

Рассмотрен метод расчета величины уширения полосы в ходе холодной прокатки на валках с гладкой бочкой. Приведены основные формулы, описана методика ведения расчета. Для выявления точности определения уширения полосы проведены экспериментально-расчетные исследования, которые показали адекватность предложенной к использованию авторской формулы. Определено влияние диаметра валка и величины коэффициента трения на расчетную величину уширения, определенную по различным методикам. Сделаны выводы о точности рассмотренных формул.

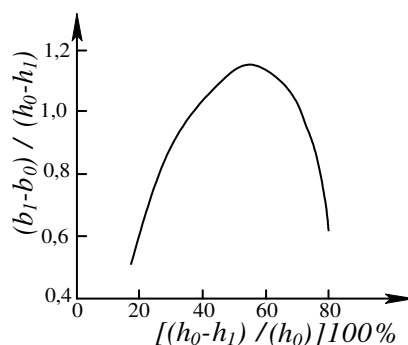
**Ключевые слова:** холодная прокатка полос, уширение, расчет, влияние факторов, точность определения.

**Введение.** Холодной прокаткой производят листовую продукцию с особыми требованиями к большинству параметров качества. Этот процесс является завершающим в длинной цепочке металлургического передела, поэтому любое повышение расходного коэффициента в значительной мере сказывается на расходах по переделу. Один из параметров листовой продукции – ширина листа. Значительное уширение, а тем более утяжка, могут привести либо к повышению обрезки, либо вообще к браку продукции, исходя из требований конкретного заказа. Очень важно оценить влияние факторов проката на величину уширения (утяжки) листа. Данная задача является серьезной проблемой. В большинстве случаев она требует решения с учетом условий каждого конкретного производства.

**Материалы и инструменты.** Для экспериментальных прокаток выбран стан  $D_{yo}$  250, валки с гладкой бочкой. Коэффициент трения определялся по максимальному обжатию при захвате полосы валками. Расчеты производились по описанным ниже методикам, изложенным в указанных источниках информации. Для удобства расчетов была разработана компьютерная программа.

**Цель статьи** – оценка точности расчета уширения различными методами при холодной прокатке полос, на валках с гладкой бочкой.

**Основная часть.** На уширение металла при прокатке влияет множество факторов. Полоса в ходе прокатки подпирается силами контактного трения и в продольном, и в поперечном направлении. Изменение величины этих сил напрямую влияет на величину уширения. Чем больше действие сил трения, тем больше величина уширения<sup>1</sup> [1–3]. Такие факторы, как увеличение скорости прокатки и ширины листа, приводят к уменьшению уширения. Увеличение диаметра валков, напротив, – к увеличению уширения. Температура деформации оказывает более сложное влияние на величину уширения. В общем, при увеличении температуры от 20 до 100 °С уширение падает, затем, примерно до 300 °С, наблюдается увеличение уширения, после 700–800 °С уширение снова уменьшается. Все это отчасти связано с влиянием температуры на коэффициент трения. Натяжение полосы также приводит к уменьшению величины уширения. На рисунке 1 показан график зависимости уширения от относительного обжатия<sup>1</sup> [1].

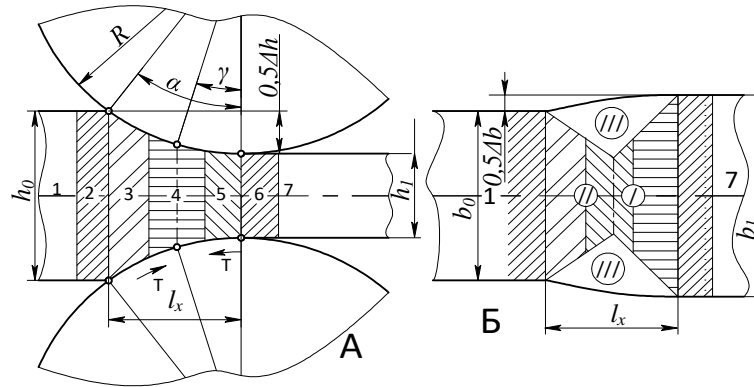


$h_0$  и  $h_1$  – толщина полосы до и после прокатки

Рисунок 1. – Зависимость уширения от относительного обжатия<sup>1</sup> [1; 2]  
(сталь: С – 0,4%; Mn – 0,68%; Si – 0,26%)

<sup>1</sup> Здесь и далее: Румянцев М.И. Расчет и анализ параметров прокатки [Электронный ресурс]: учеб. пособие. – Магнитогорск: ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2019. – 1 электрон. опт. диск (CD-R). – URL: [http://cloud.seven-sky.net.ru/tom/m.rumyantsev/Raschet\\_i\\_analiz\\_parametrov\\_prokatki.pdf](http://cloud.seven-sky.net.ru/tom/m.rumyantsev/Raschet_i_analiz_parametrov_prokatki.pdf)

На рисунке 2 показан очаг деформации при продольной прокатке полос. На схеме продольного разреза различают<sup>1</sup> [1–3]: 1 и 2 – задний жесткий конец и заднюю внеконтактную зону (зону нарастания деформации); 3 – зону отставания (вдоль нее присутствует скольжение металла); 4 – зону прилипания (контактное скольжение не наблюдается); 5 – зону опережения (скольжение металла тоже присутствует); 6 и 7 – зону затухания деформации и передний жесткий конец.



А – продольный разрез; Б – вид сверху;  
 $\gamma$  – нейтральный (критический) угол;  $\alpha$  – угол захвата;  $T$  – направление сил контактного трения;  
 $\Delta b$  и  $\Delta h$  – абсолютное уширение и абсолютное обжатие;  $R$  – радиус вала

Рисунок 2. – Схема очага деформации<sup>1</sup> [1; 2]

В общем случае соотношение продольной и поперечной деформаций зависит от соотношения продольного  $\sigma_3$  и поперечного  $\sigma_2$  напряжений<sup>1</sup> [1]:

$$\frac{\lg \lambda}{\lg \beta} = \frac{\sigma_2}{\sigma_3}, \quad (1)$$

где  $\beta = b_1/b_0$  – коэффициент уширения;  $\lambda = h_0 b_0 / h_1 b_1 = l_1/l_0$  – коэффициент вытяжки.

Истинное уширение полосы вдоль очага деформации пропорционально истинному обжатию [2]:

$$\frac{\ln b_x}{\ln b_0} = k_b \frac{\ln h_0}{\ln h_x}, \quad (2)$$

где  $b_x$  – текущее значение ширины полосы в очаге деформации;  $h_x$  – текущее значение толщины полосы в очаге деформации;  $k_b$  – истинный показатель уширения.

Среди множества формул, выведенных для расчета ширины полосы, можно выделить следующие [1].

Формула Э. Зибеля и С.Н. Петрова:

$$\Delta b = C_{зп} \frac{\Delta h}{h_0} \sqrt{R \cdot \Delta h}, \text{ мм}, \quad (3)$$

где  $C_{зп} = 0,35-0,45$  – эмпирический коэффициент (большие значения – для более прочных сталей).

В данной зависимости не рассматриваются условия контактного трения, ширина полосы и ее натяжение<sup>1</sup> [1].

Формула А.П. Чекмарева принимает некоторые параметры очага деформации, но не параметры трения:

$$\Delta b = \frac{2\Delta h \cdot b_{cp}}{(h_0 + h_1) \left( 1 + (1 + \alpha) \left( \frac{b_{cp}}{R \cdot \alpha} \right)^n \right)}, \text{ мм}, \quad (4)$$

где  $\alpha = \arccos(1 - \Delta h / 2R) \approx \sqrt{\Delta h / R}$  – угол захвата;  $\Delta$  – упругая деформация клетки;  $b_{cp}$  – средняя ширина полосы в очаге деформации; при узком очаге деформации (т.е.  $b_{cp} < R \cdot \alpha$ )  $n=1$ , при широком – (т.е.  $b_{cp} > R \cdot \alpha$ )  $n=2$ .

Данная формула определяет величину уширения исходя из неизвестной величины  $b_{cp}$ .

Формула С. И. Губкина учитывает параметры контактного трения и некоторые размеры очага деформации:

$$\Delta b = \left( 1 + \frac{\Delta h}{h_0} \right) f_y \left( \sqrt{R \Delta h} - \frac{\Delta h}{2f_y} \right) \frac{\Delta h}{h_0}, \text{ мм}, \quad (5)$$

где  $f_y$  – коэффициент контактного трения при установившемся процессе.

Данная зависимость дает хорошие результаты при  $f_y = 0,4-0,45$ .

Формула Б.П. Бахтинова дает удовлетворительные значения  $\Delta b$  при прокатке широких полос  $b_0/l_x > 1$  ( $l_x = \sqrt{\Delta h \cdot R}$  – длина очага деформации) и не считается с влиянием ширины полосы:

$$\Delta b = 1,15 \frac{\Delta h}{2h_0} \left( \sqrt{R\Delta h} - \frac{\Delta h}{2f_y} \right), \text{ мм}, \quad (6)$$

Формула В.С. Смирнова для расчета  $\Delta b$  учитывает влияние радиуса вала через  $l_x$ :

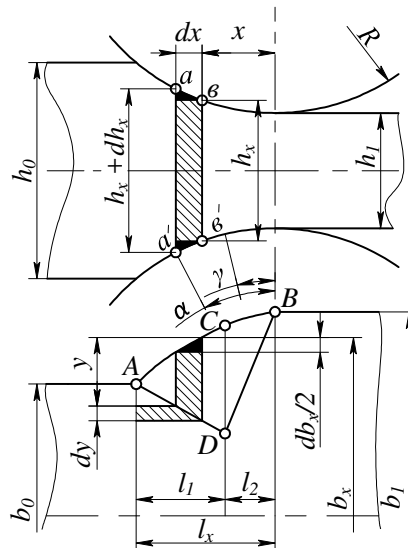
$$\Delta b = \left( 1 + \frac{\Delta h}{h_0} \right) \left( \sqrt{2} \frac{f_y l_x}{h_0} - 0,5 \frac{\Delta h}{h_0} \right), \text{ мм}, \quad (7)$$

А.И. Целиков вывел свою формулу исходя из равенства смещенных объемов (рисунок 3). Знак минус показывает, что при увеличении  $b_x$   $h_x$  уменьшается:

$$0,5 \cdot h_x \cdot d_x \cdot 0,5 \cdot db_x = -0,5 \cdot y \cdot d_x \cdot dh_x, \quad (8)$$

откуда

$$db_x = -2y \cdot \frac{dh_x}{h_x}. \quad (9)$$



$l_1$  – отставания;  $l_2$  – зона опережения;  $b_x, h_x$  – ширина и толщина полосы в сечении  $x$ ;  
 $x$  – координата рассматриваемого сечения

Рисунок 3. – К выводу формулы А.И. Целикова [2]

После ряда преобразований А.И. Целиковым была получена формула<sup>1</sup> [1–3]

$$\Delta b_x = b_0 - \frac{4}{l_d^2} \left( l_d \mp \frac{\Delta h}{2f_y} \right) \int x \ln \frac{h_1 + x \frac{\Delta h}{l_d}}{h_0} \cdot dx. \quad (10)$$

После интегрирования

$$b_x = \frac{4h_0 h_1}{\Delta h^2} \left( l_d \mp \frac{\Delta h}{2f_y} \right) g \left[ \left( \frac{h_0}{2h_1} g - 1 \right) \ln g - \frac{h_0}{4h_1} g + 1 \right] + C. \quad (11)$$

где  $g = (h_1 + x \cdot \Delta h / l_x) / h_0$ ;  $x$  – координата сечения в очаге деформации от сечения выхода металла из валков.  
Для сечения выхода, где  $x = 0$ , а  $g = h_1/h_0$ , имеем формулу А.И. Целикова<sup>1</sup> [1–3]:

$$\Delta b = 2C_b C_q \left( \sqrt{R\Delta h} - \frac{\Delta h}{2f_y} \right) \left( \left( \frac{h_1}{\Delta h} \right)^2 \ln \frac{h_0}{h_1} - \frac{h_1}{\Delta h} + \frac{1}{2} \right), \text{ мм}. \quad (12)$$

С уточнениями и упрощениями А.И. Гришкова она имеет вид<sup>1</sup> [1; 2]:

$$\Delta b = C_b C_q C_\Delta \left( \sqrt{R \Delta h} - \frac{\Delta h}{2 f_y} \right) \ln \frac{h_0}{h_1}, \text{ мм}, \quad (13)$$

где  $C_\Delta$  – коэффициент, учитывающий влияние относительного обжатия  $\varepsilon^1$  [2]:

$$C_\Delta = 0,5 + 0,48\varepsilon(1 - \varepsilon); \quad (14)$$

$C_q$  – коэффициент, учитывающий влияние заднего натяжения<sup>1</sup> [1; 2]:

$$C_q = 1 - \frac{2q_0}{\sigma_s}, \quad (15)$$

где  $\sigma_s$  – истинное сопротивление металла деформации;  $q_0$  – заднее натяжение.  $C_b$  – коэффициент, учитывающий влияние ширины полосы<sup>1</sup> [1; 2]:

$$C_b = K(1 - \varepsilon) \left( \frac{b_0}{l_x} - 0,15 \right) \exp \left( 1 - \frac{m b_0}{l_x} \right) + \varepsilon, \quad (16)$$

$$C_b = K(1 - \varepsilon) \left( \frac{b_0}{\sqrt{R \cdot \Delta h}} - 0,15 \right) e^{1,5 \left( 0,15 - \frac{b_0}{\sqrt{R \cdot \Delta h}} \right)} + \varepsilon, \quad (17)$$

где  $K = \delta^2 / (0,85 \cdot \delta^2 - 1)$ ;  $m = \delta^2 / (\delta^2 - 1)$ ;  $\delta = 2 \cdot f_y \cdot l_x / \Delta h$ .

Формула А.И. Целикова и А.И. Гришкова выведена при прокатке прямоугольной полосы гладкими валками.

Зависимость коэффициента трения от параметров холодной прокатки описывается уравнением [3]

$$\ln f = \ln a_0 + (a_1 + a_2 \cdot h_0 \cdot R^{-1} + a_3 \cdot \sigma_T + a_4 \cdot V) \ln \varepsilon + a_5 \cdot \varepsilon, \quad (18)$$

где  $V$  – скорость прокатки металла в клети;  $a_0 = 0,185$ ;  $a_1 = 0,393$ ;  $a_2 = -99,8$ ;  $a_3 = 0,00007$ ;  $a_4 = 0,0193$ ;  $a_5 = -3,55$ .

В [4] изложен метод определения величины уширения при холодной прокатке тонких полос. В зоне отставания уширение определяется исходя из относительного обжатия по ширине полосы в этой зоне:

$$\varepsilon_{b,от} = \left[ \sqrt{(1 + a_\gamma)^2 + \frac{4\varepsilon_{от} a_\gamma}{1 - \varepsilon_{от}}} - (1 + a_\gamma) \right] 0,5, \quad (19)$$

$$\Delta b_{от} = \varepsilon_{b,от} b_0, \text{ мм}, \quad (20)$$

где  $a_\gamma = (1 - \varepsilon_{от}) h_0 / b_0$ ;  $\varepsilon_{h,от} = (h_0 - h_n) / h_0$  – относительное обжатие по площади поперечного сечения в зоне отставания;  $h_n = h_0 / Z$  – толщина полосы в зоне нейтрального сечения;  $Z$  – коэффициент нейтрального сечения [4]:

$$Z = \frac{h_0}{h_n} - \left[ \frac{\sqrt{k^2 + \frac{(\delta \cdot \xi_0 - k)(\delta \cdot \xi_1 + k)}{(1 - \varepsilon_\Sigma)^\delta}} - k}{\delta \cdot \xi_0 - k} \right]^{\frac{1}{\delta}}, \quad (21)$$

где  $\varepsilon_\Sigma = (h_0 - h_1) / h_0$  – относительное обжатие по площади поперечного сечения вдоль за проход [4–7];

$\delta = 2f / \alpha$  – параметр прокатки;  $\alpha = \sqrt{h_0 \varepsilon / R}$  – угол захвата;  $\xi_0 = 1 - \sigma_0 / \sigma_T$ ,  $\xi_1 = 1 - \sigma_1 / \sigma_T$  – коэффициенты переднего ( $\sigma_1$ ) и заднего ( $\sigma_0$ ) натяжения;  $h_1 = h_0(1 - \varepsilon)$ ;  $k = 0,5(1 + (1 + \varepsilon))$ .

Величина уширения в зоне отставания определяется также [4] как

$$\varepsilon_{b,он} = \left[ \sqrt{(1 + a_{он})^2 + \frac{4\varepsilon_{он} a_{он}}{1 - \varepsilon_{он}}} - (1 + a_{он}) \right] 0,5, \quad (22)$$

$$\Delta b_{он} = \varepsilon_{b,он} (b_0 + \Delta b_{от}), \text{ мм}, \quad (23)$$

где  $a_{он} = (1 - \varepsilon_{он}) h_n / (b_0 + \Delta b_{от})$ ;  $\varepsilon_{h,он} = (h_n - h_1) / h_n$  – относительное обжатие по площади поперечного сечения в зоне опережения.

Общее уширение рассчитывается по формуле [4]

$$\Delta b_{\Sigma} = \Delta b_{om} + \Delta b_{on}, \text{ мм.} \quad (24)$$

В [5] рассмотрен метод расчета уширения. Вывод основной зависимости опирается на две формулы, выведенные для определения коэффициента  $K$  (обжатия полосы):

$$K = \left( \lg \lambda - m_h \lg \frac{1}{\eta} \right) \cdot \left( \lg \frac{1}{\eta} - n_b \lg \lambda \right)^{-1}, \quad (25)$$

$$K = c \cdot (1 + a_q \cdot f)(1 + 2a_q \cdot f)^{-1}, \quad (26)$$

где  $n_b = (1 + h_{cp} / b_{cp})^{-1}$ ;  $\eta = h_1 / h_0$ ;  $a_q = 0,5(1 + \operatorname{tg} \alpha) \cdot C_q (l_x / h_{cp})$ ;  $c = C_q^2 (l_x / h_{cp})$ ;

при  $\frac{l_x}{h_{cp}} > \frac{2}{3}$   $m_h = \frac{1}{3} \frac{b_{cp}}{l_x}$ ; при  $\frac{l_x}{h_{cp}} < \frac{2}{3}$   $m_h = 1 - 3 \cdot 4^{-1} l_x / b_{cp}$ ;

$C_q$  – для очага деформации, в котором  $l_x / b_{cp}$  значительно меньше единицы (т.е. при очень широком), определяется из выражения  $C_q = 1 + 3^{-1} (l_x / h_{cp} - 1)$ ; в котором  $l_x / b_{cp}$  принимает значения около единицы, – из выражения  $C_q = 1 + 6^{-1} (l_x / h_{cp} - 2)$ ; для длинного очага деформации ( $l_x / b_{cp} > 1$ )  $C_q = 1 + 6^{-1} (b_{cp} / h_{cp} - 2)$ .

Из (25), (26) получаем

$$\lg \lambda = \frac{m_h + K}{1 + n_b K} \lg \frac{1}{\eta}. \quad (27)$$

После несложных преобразований

$$\lg \beta = \left( 1 - \frac{m_h + K}{1 + n_b K} \right) \lg \frac{1}{\eta}. \quad (28)$$

Введем в (28) коэффициент  $k_b$ :

$$k_b = \left( 1 - \frac{m_h + K}{1 + n_b K} \right). \quad (29)$$

Представим (28) в виде

$$z_{\beta} = k_b \lg \frac{1}{\eta}. \quad (30)$$

Тогда

$$\Delta b = b_0 e^{z_{\beta}} - b_0 = b_0 (e^{z_{\beta}} - 1). \quad (31)$$

Предлагается при определении  $C_q$ ,  $m_h$  и  $n_b$  вместо  $b_{cp}$  использовать  $b_0$ .

В общем случае соотношение продольной и поперечной деформаций зависит от соотношения продольного  $\sigma_3$  и поперечного  $\sigma_2$  напряжений<sup>1</sup> [1]:

$$\lg \beta = \left( 1 + \frac{\sigma_2}{\sigma_3} \right)^{-1} \lg \frac{1}{\eta}, \quad (32)$$

где  $\beta = b_1 / b_0$  – коэффициент уширения;  $\eta = h_1 / h_0$  – коэффициент вытяжки.  
Известно, что

$$\sigma_2 = 0,5(\sigma_1 + \sigma_3). \quad (33)$$

Тогда

$$\lg \beta = \left( \frac{1}{2} + \frac{\sigma_1}{2\sigma_3} \right)^{-1} \lg \frac{1}{\eta}. \quad (34)$$

В первом приближении  $\sigma_1 \approx p$ ,  $a \sigma_3 = \sigma_x$ . Поскольку  $p - \sigma_x = \sigma_T$ ,  $p - \sigma_T = \sigma_x$ , в итоге имеем

$$\lg \beta = \left( \frac{1}{2} + \frac{p}{2(p - \sigma_T)} \right)^{-1} \lg \frac{1}{\eta}. \quad (35)$$

В формулу (35) можно подставить любую зависимость для определения  $p$  и  $\sigma_T$  в конкретных условиях прокатки. Например, для зоны отставания подставляя в (35) зависимость [2; 7]:

$$p = \left( \frac{k_1 \sigma_{T.н}}{\delta_0} \right) \left[ (\xi_0 \delta_0 - 1) \left( \frac{h_0}{h_{н.с.}} \right)^{\delta_0} + 1 \right], \quad (36)$$

где  $\sigma_{T.н}$  – истинное значение предела текучести;  $\delta_0 = 2f_y \sqrt{R / (h_0 - h_{н.с.})}$ ;  $h_{н.с.}$  – толщина полосы в нейтральном сечении;  $k_1 = 1 \dots 1,155$ .

Получаем

$$\lg \beta_1 = \frac{1}{\frac{1}{2} + \frac{1,15k_{p1} \cdot \delta_0^{-1}}{2(1,15k_{p1} \cdot \delta_0^{-1} - 1)}} \lg \frac{1}{\eta}, \quad (37)$$

где  $k_{p1} = (\xi_0 \delta_0 - 1) K_{\delta_0} + 1$ ;  $K_{\delta_0} = (h_0 / h_{н.с.})^{\delta_0}$ .

$$\Delta b_{омст.} = C_b (b_0 e^{\ln \beta_1} - b_0). \quad (38)$$

Для зоны опережения, подставляя в (35) зависимость [2; 7]:

$$p = \left( \frac{k_1 \sigma_{T.н}}{\delta_1} \right) \left[ (\xi_1 \delta_1 + 1) \left( \frac{h_x}{h_1} \right)^{\delta_1} - 1 \right], \quad (39)$$

где  $\delta_1 = 2f_y \sqrt{R / (h_{н.с.} - h_u)}$ ,

имеем

$$\lg \beta_2 = \frac{1}{\frac{1}{2} + \frac{\delta_1^{-1} \cdot 1,15k_{p3}}{2(\delta_1^{-1} \cdot 1,15k_{p3} - 1)}} \lg \frac{1}{\eta}, \quad (40)$$

где  $k_{p3} = (\xi_1 \delta_1 + 1) K_{\delta_1} - 1$ ;  $K_{\delta_1} = (h_{н.с.} / h_1)^{\delta_1}$ .

$$\Delta b_{он.} = C_b (b_0 e^{\ln \beta_2} - b_0). \quad (41)$$

$$\Delta b_{\Sigma} = \Delta b_{омст.} + \Delta b_{он.} \quad (42)$$

Подставляя в (35) известную зависимость [6] для определения среднего нормального напряжения во всей зоне контакта

$$p = \sigma_{T.н} \left( 1 + \frac{f_y l_o}{3h_{cp}} (1 + 0,5\varepsilon) \right), \quad (43)$$

получаем

$$\lg \beta_3 = \left( \frac{1}{2} + 1,5 \frac{1 + 0,333f_y \cdot l \cdot (1 + 0,5\varepsilon) \cdot h_{cp}^{-1} \cdot h_{cp}}{2(k_{p4} - 1)} \cdot \frac{h_{cp}}{1 + 0,5\varepsilon} \right)^{-1} \lg \frac{1}{\eta} + \frac{f_y l_o}{3h_{cp}} (1 + 0,5\varepsilon) \quad (44)$$

$$\Delta b = C_b (b_0 e^{\ln \beta_3} - b_0) \quad (45)$$

В зависимости от формулы, которая используется для расчета уширения, метод расчета может содержать следующие этапы: задаемся величиной радиуса вала  $R$ ; исходной величиной предела текучести  $\sigma_{T.исх.}$  и законом, позволяющим рассчитать действительное значение предела текучести  $\sigma_T$  (в зависимости от величины обжатия, температуры прокатки и пр.); исходным значением толщины полосы  $h_0$  и толщиной полосы на выходе из стана  $h_1$ ; натяжением полосы на входе  $\sigma_0$  и на выходе  $\sigma_1$  из стана; исходной шириной полосы  $b_0$ . Определяем коэффициент трения при установившемся процессе  $f$ . Затем рассчитываем:

- абсолютное  $\Delta h$  и относительное обжатие по площади поперечного сечения вдоль за проход  $\varepsilon$  (см. расшифровку значений формулы (21));
- коэффициенты переднего  $\zeta_1$  и заднего  $\zeta_0$  натяжения (см. расшифровку значений формулы (21));
- угол захвата  $\alpha$  (см. расшифровку значений формулы (21) и длину очага деформации  $l$ :

$$l_x = \sqrt{\Delta h \cdot R + 0,25\Delta h^2} \approx \sqrt{\Delta h \cdot R}; \quad (46)$$

- параметр прокатки  $\delta$  (см. расшифровку значений формулы (21));
- угол трения  $\beta = \arctan f$ ;
- коэффициент деформации упрочнения  $k$  (см. расшифровку значений формулы (21));
- величину нейтрального угла

$$\gamma = \frac{\alpha}{2} \left( 1 - \frac{\alpha}{2\beta} \right); \quad (47)$$

- коэффициент нейтрального сечения  $Z$  (см. расшифровку значений формулы (21));
- толщину полосы в нейтральном сечении  $h_n$  (см. расшифровку значений формул (19), (20));
- относительное обжатие по площади поперечного сечения в зоне опережения и отставания (см. расшифровку значений формул (19), (20), (22), (23)).

Далее идет расчет уширения по одной из вышеприведенных формул:

- Э. Зибеля и С.Н. Петрова (формула (3));
- А.П. Чекмарева (формула (4), но здесь необходимо знать  $b_{cp}$ );
- С.И. Губкина (формула (5));
- Б.П. Бахтинова (формула (6)) и В.С. Смирнова (формула (7));
- А.И. Целикова (формула (12)) и формула Целикова–Гришкова (формула (13)). Для расчета значений  $\Delta b$  по этим формулам необходимо рассчитать уточняющие коэффициенты  $C_\Delta$  (формула (14)),  $C_q$  (формула (15)),  $C_b$  (формулы (16), (17));
- по формуле из источника [5] (Л.С. Кохан, А.В. Алдунин) отдельно для зоны опережения и отставания (формулы (19), (20), (22), (23));
- по формуле из источника [6] (А.Ф. Головина) (формула (31));
- по формуле (42), но необходимо рассчитать уточняющий коэффициент  $C_b$  (формулы (16), (17)).

Все эти формулы имеют разные степени точности и дают удовлетворительные результаты в определенных случаях.

Для проверки точности расчетов  $\Delta b$  по вышеизложенным зависимостям на стане  $D_{yo}$  250 было прокатано несколько полос из стали 20 (таблица 1). Прокатка производилась при максимальном возможном обжатии в данных условиях прокатки. В таблице 2 показано сравнение опытных данных с результатами расчетов.

Таблица 1. – Геометрические параметры прокатанных полос (стан  $D_{yo}$  250, сталь 20)

$h_0$ , мм	$h_1$ , мм	$\Delta h$	$b_0$ , мм	$b_1$ , мм
5,88	4,32	1,56	28,68	29,87
5,83	4,3	1,53	28,7	29,99
5,9	4,3	1,6	28,68	30,21
5,85	4,29	1,56	28,67	30,08
5,83	4,27	1,56	28,7	30,19

Таблица 2. – Сравнение опытных данных о величине  $\Delta b$  (мм) с результатами расчетов

$\Delta b_{\text{опыт.}}$	$\Delta b_{\text{ф.19-24}}$	$\Delta b_{\text{ф.11}}$	$\Delta b_{\text{ф.13}}$	$\Delta b_{\text{ф.6}}$	$\Delta b_{\text{ф.5}}$	$\Delta b_{\text{ф.7}}$	$\Delta b_{\text{ф.31}}$	$\Delta b_{\text{ф.42}}$	$\Delta b_{\text{ф.45}}$
<b>1,19</b>	1,388	0,696	0,871	3,194	0,264	0,31	0,156	1,337	1,039
<b>1,29</b>	1,362	0,681	0,84	3,129	0,256	0,306	0,148	1,309	1,12
<b>1,43</b>	1,425	0,723	0,922	3,306	0,278	0,318	0,166	1,387	1,113
<b>1,31</b>	1,389	0,7	0,878	3,21	0,266	0,312	0,155	1,345	1,052
<b>1,33</b>	1,391	0,703	0,881	3,221	0,264	0,313	0,153	1,35	1,061

Согласно таблице 2, наиболее близкие к экспериментальным данным значения  $\Delta b$  были получены при использовании метода, описанного в источнике [4] (формулы (19)–(24)), и при использовании формулы (45). Формула (42) выдает близкие, но слегка заниженные значения  $\Delta b$ . Влияние коэффициента трения на расчетную величину  $\Delta b$  при использовании указанных формул проверялось при следующих исходных значениях:  $h_0 = 5,85$  мм;  $h_1 = 4,29$  мм;  $b_0 = 28,7$  мм;  $f_y = 0,11$ – $0,45$ . Большинство формул при увеличении  $f_y$  показывают положительное изменение (т.е. увеличение) величины  $\Delta b$  (рисунок 4). Метод с использованием формул (19)–(24) на изменения  $f_y$  не реагирует. Формула (6) демонстрирует обратную реакцию: при увеличении  $f_y$  уширение несколько уменьшается (что противоречит логике). Формулы (45) и (5) наиболее чувствительны к изменениям  $f_y$ . Формулы (7) и (31) тоже показывают неплохую динамику.

Влияние диаметра бочки валков на расчетную величину  $\Delta b$  (при использовании различных методик) определялось при следующих исходных данных:  $f = 0,112$ ,  $h_0 = 5,86^{+0,6\%}_{-0,5\%}$ ,  $h_1 = 4,3^{+0,6\%}_{-0,6\%}$ ,  $b_0 = 28,69^{+0,05\%}_{-0,06\%}$ . На рисунке 5 показаны графики изменения среднего значения  $\Delta b$  (в указанных диапазонах изменения геометрических параметров полосы) в зависимости от варьирования диаметра валка в пределах  $D = 200$ – $300$  мм. Формулы (7) и (19)–(24) на изменение величины  $D$  в указанных пределах показали самую низкую чувствительность. Метод с использо-

ванием формулы (31) показывает обратную зависимость  $\Delta b$  от  $D$  (что противоречит логике). Остальные формулы (в т.ч. и не указанная на графиках (6)) показывают адекватную реакцию изменения  $\Delta b$  под влиянием увеличения диаметра валка.

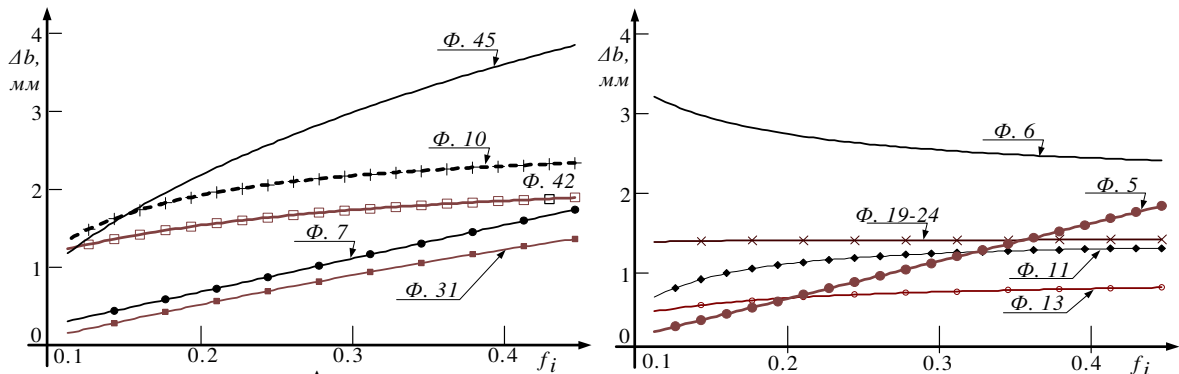


Рисунок 4. – Влияние коэффициента трения на расчетную величину уширения полосы (значения  $\Delta b$ , рассчитанные по указанным формулам при  $h_0 = 5,85$  мм;  $h_1 = 4,29$  мм;  $b_0 = 28,7$  мм;  $f_y = 0,1-0,45$ )

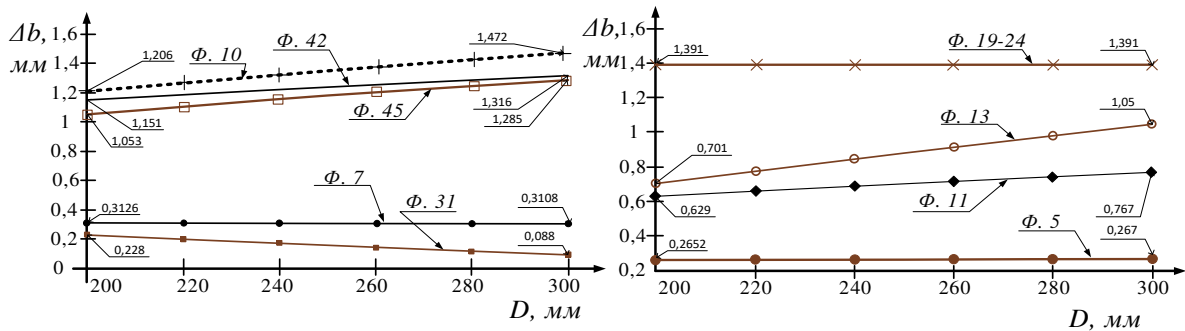


Рисунок 5. – Влияние диаметра бочки валков на расчетную величину уширения полосы (средние расчетные значения  $\Delta b$ , полученные по указанным формулам при  $f = 0,112$   $h_0 = 5,86^{+0,6\%}_{-0,5\%}$ ,  $h_1 = 4,3^{+0,6\%}_{-0,6\%}$ ,  $b_0 = 28,69^{+0,05\%}_{-0,06\%}$ , максимальный разброс полученных расчетных значений  $\Delta b_{1.р.}$  от указанных на графике:  $\Delta b_{1.р.} = \Delta b_{1.р.-9\%}^{+5\%}$ )

**Заключение.** Сравнение результатов экспериментальной холодной прокатки полос шириной от 28,67 до 28,7 мм с обжатием в диапазоне 1,53–1,6 мм (стан  $D_{yo}$  250) показало, что наиболее близкие к экспериментальной были величины уширения, рассчитанные по описанному в источнике [5] методу (формулы (19)–(24)). Метод с использованием предложенной в работе формулы (формула (45)) тоже показал удовлетворительный разброс результатов расчета. Метод с использованием формулы (42) выдает близкие, но слегка заниженные значения  $\Delta b$ .

Исследование чувствительности формул к изменениям коэффициента трения показал, что при увеличении  $f_y$  большинство формул выдает увеличенные значения  $\Delta b$ , что логично с точки зрения теории прокатки. Формула (6) показывает обратную зависимость, при увеличении  $f_y$  уширение несколько уменьшается (что противоречит логике). Метод, описанный в источнике [4], не показывает какого-либо изменения величины  $\Delta b$  при изменении  $f_y$ . В данном случае нужны дополнительные экспериментальные и расчетные исследования на другом сорimente и с другими исходными данными величины  $f_y$  при прокатке.

Влияние диаметра бочки валков на расчетную величину  $\Delta b$  показали низкую чувствительность формулы (7),  $\Delta b$  изменила свое значение в третьем знаке после запятой. Метод, описанный в источнике [4], влияние диаметра бочки валков на уширение практически не учитывает (изменения в 5–6-м знаках после запятой). Метод с использованием формулы (31) показывает обратную зависимость  $\Delta b$  от  $D$  (что противоречит логике). Остальные формулы (в т.ч. и не указанная на графиках (6)) показывают адекватную реакцию изменения  $\Delta b$  под влиянием увеличения диаметра валка.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Обработка металлов давлением / Ю.Ф. Шевакин, В.Н. Чернышев, Р.Л. Шаталов и др. – М.: Интермет Инжиниринг, 2005. – 496 с.
2. Грудев А.П. Теория прокатки. – М.: Металлургия, 1988. – 240 с.



3. Мазур В.Л., Ноговицын А.В. Теория и технология тонколистовой прокатки (численный анализ и технические приложения). – Днепропетровск: Дніпро-VAL, 2010. – 500 с.
4. Кохан Л.С., Алдунин А.В. Минимизация уширения при прокатке тонкополосового металла // Изв. высш. учеб. заведений. Чер. Metallurgy. – 2012. – № 5 – С. 29–33.
5. Головин А.Ф. Прокатка. Ч. II. Теория продольной прокатки. – Свердловск: ОНТИ, 1934. – 236 с.
6. Василев Я.Д., Минаев А.А. Теорія поздовжньої прокатки. – Донецк: УНІТЕХ, 2009. – 488 с.
7. Чекмарев А.П., Нефедов А.А., Николаев В.А. Теория продольной прокатки. – Харьков: Харьк. гос. ун-т, 1965. – 212 с.

## REFERENCES

1. Shevakin, Yu.F., Chernyshev, V.N., Shatalov, R.L. & Mochalov, H.A. (2005). *Obrabotka metallov davleniem*. Moscow: Intermet Engineering. (In Russ.)
2. Grudev, A.P. (1988). *Teoriya prokatki*. Moscow: Metallurgiya. (In Russ.)
3. Mazur, V.L. & Nogovitsyn, A.V. (2010). *Teoriya i tekhnologiya tonkolistovoi prokatki (chislennyi analiz i tekhnicheskie prilozheniya)*. Dnepropetrovsk: Dnipro-VAL. (In Russ.)
4. Kokhan, L.S. & Aldunin A.V. (2012). Minimizatsiya ushireniya pri prokatke tonkoplosovogo metalla [Minimizing broadening when rolling thin strip metal]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Chernaya metallurgiya [News of higher educational institutions. Ferrous metallurgy]*, (5), 29–33. (In Russ., abstr. in Engl.)
5. Golovin, A.F. (1934). *Prokatka. Chast' II. Teoriya prodol'noi prokatki*. Sverdlovsk: ONTI. (In Russ.)
6. Vasilev, Ya.D. & Minaev, A.A. (2009). *Teoriya pozdovzhn'oi prokatki [Theory of late rolling]*. Donetsk: UNITEKh. (In Ukrain.)
7. Chekmarev, A.P., Nefedov, A.A. & Nikolaev, V.A. (1965). *Teoriya prodol'noi prokatki*. Kharkov: Kharkov State University. (In Russ.)

Поступила 23.12.2022

**METHOD FOR CALCULATION OF BROADENING DURING COLD ROLLING OF STRIPS**

**S. PILIPENKO**

*(Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk)*

*The paper considers a method for calculating the magnitude of strip broadening during cold rolling of strips on rolls with a smooth barrel. The main formulas that can be used for this are given, the methodology for conducting the calculation is described. A formula has been proposed for use. To reveal the accuracy of determining the band broadening, experimental and computational studies were carried out. Studies have shown the adequacy of the formula proposed for use. The influence of the roll diameter and the value of the friction coefficient on the calculated value of the broadening determined by various methods is determined. Conclusions are drawn.*

**Keywords:** cold rolling of strips, broadening, calculation, influence of factors, determination accuracy.