

---

УДК 621.771.(0.75.8)

Д-р техн. наук В. А. Николаев, А. Г. Васильев, Д. А. Матюшенко  
Национальный технический университет, г. Запорожье

## **РАСЧЕТ ПРИРАЩЕНИЯ ТОЛЩИНЫ ПО ДЛИНЕ ПОЛОСЫ ПРИ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКЕ**

*Разработана теоретическая модель расчета приращения толщины по длине полосы при горячей прокатке с учетом совместного влияния действующих технологических факторов.*

**Ключевые слова:** горячая прокатка, прокатный стан, продольная разнотолщинность, полоса, задний конец полосы, утолщение.

### Введение

Доля листовой малоуглеродистой стали составляет 60...70 % от всего производимого проката [1]. Использование современного оборудования и технологий позволяет получать полосы со следующими отклонениями по толщине на 99 % длины:  $\pm 0,025$  мм при  $h \leq 12,7$  мм;  $\pm 0,05$  мм при  $h > 12,7$  мм [2]. Для станов более ранней постройки (I–II поколения) величина отклонения толщины от номинала существенна (до 0,25 мм в зависимости от толщины полосы и применяемого оборудования) и при этом длина заднего утолщенного участка достигает  $\sim 30 \dots 45$  м при прокатке тонких полос. Применение теоретических моделей для расчета изменения толщины полосы в процессе прокатки в зависимости от различных факторов дает возможность разрабатывать новые эффективные методы уменьшения концевых утолщений полос.

### Постановка задачи

На традиционных широкополосных станах горячей прокатки (ШСП) основными причинами появления продольной разнотолщинности является наличие градиента температур по длине промежуточного раската перед чистой группой и отсутствие заднего натяжения полосы после выхода полосы из каждой предыдущей клетки. Для расчета изменения приращения толщины полосы в процессе ее прокатки известны различные модели [3], в основу которых входит дифференциальное уравнение изменения толщины полосы.

*Целью работы* является разработка модели расчета толщины по длине полосы на базе проверенных практикой теоретических моделей расчета энергосиловых параметров.

### Основная часть исследований

В настоящей статье рассматривается усовершенствованная системная теоретическая модель расчета изменения толщины полосы по ее длине, включающая также расчет и модуля жесткости полосы.

*Расчет скоростей прокатки по клетям стана*  
Скорость прокатки определяли исходя из известного уравнения поступательного движения точки в соответствии с законом постоянства секундных объемов металла по клетям стана. Прокатка в чистой группе клетей осуществляется в непрерывном режиме. Максимальную скорость прокатки в чистой клетке стана выбирали при прокатке полос с минимальной толщиной. Скорость прокатки во всех остальных клетях чистой группы и скорость заднего конца полосы рассчитываем соответственно по формулам:

$$v_i = v_q \frac{h_q}{h_i}, \quad v'_i = v_i (1 + S_i) / \mu_i, \quad (1)$$

где  $v_q$  – окружная скорость валков в чистой клетке, м/с;

$h_q$  – толщина полосы на выходе из чистой клетки, мм;  
 $h_i$  – толщина полосы на выходе из  $i$ -й клетки, мм;  $v'_i$  и  $v_i$  – скорость соответственно заднего конца полосы и окружная скорость рабочих валков первой клетки чистой группы, м/с;  $S_i$  – опережение полосы;  $\mu_i$  – коэффициент вытяжки полосы в первой клетке чистой группы ( $\mu_i = H_i/h_i$ ).

### Определение температуры полосы

Охлаждение полосы (раската) за счет контакта с валками определяли по формуле Ю. Д. Железнова и Б. А. Цифриновича [4]

$$\Delta t_\theta = \frac{1,83 \cdot 10^{-2} (t_{i-1} - 60) \sqrt{(1 + S_i) / v_i}}{H_i + h_i} \times \sqrt{R_i \arccos \left( 1 - \frac{\Delta h_i}{2R_i} \right)}, \quad (2)$$

где  $t_{i-1}$  – температура полосы перед клетью, °С;  $H_i$  – толщина полосы перед клетью, мм;  $h_i$  – толщина полосы за клетью, мм;  $R_i$  – радиус рабочих валков, мм;  $\Delta h$  – абсолютное обжатие, мм;  $i$  – номер клетки.

Повышение температуры металла за счет пластической деформации определяли по формуле [4]

$$\Delta t_d = 0,428 p_{cp} \cdot \lg(H_i / h_i), \quad (3)$$

где  $p_{cp}$  – среднее нормальное контактное напряжение, Н/мм<sup>2</sup>.

Температура раската на выходе непосредственно из клетки равна

$$t_i = t_{i-1} - \Delta t_\theta + \Delta t_d, \quad (4)$$

Потери тепла на излучение между клетями определяли по формуле М. А. Зайкова (для малоуглеродистой стали) [5]

$$\Delta t_u = \frac{18 \cdot \tau_i \cdot m}{h_i} \cdot \left( \frac{t_i + 273}{1000} \right)^4, \quad (5)$$

где  $t_i$  – время прохождения раската между клетями, с;  $m = 1,08 \dots 1,1$ ;

Температура раската перед последующей клетью равна

$$t_{i+1} = t_i - \Delta t_u. \quad (6)$$

Снижение температуры от действия гидросбива перед чистой группой находим по формуле [4]

$$\Delta t_z = 500 / h_i \cdot v'_i, \quad (7)$$

где  $v'_i$  – скорость заднего конца полосы перед первой клетью чистой группы.

Исследования показывают, что при прокатке полосы толщиной  $h = 2,0$  мм (ШСП 1680) без примене-

ния ППУ (Coilbox) температурный градиент находится в пределах  $\Delta t_5 = 50 \dots 75$  °С [6], а с применением ППУ – в пределах  $\Delta t_5 = 0 \dots 30$  °С. Величина температурного градиента обусловлена главным образом толщиной промежуточного раската и временем нахождения его на промежуточном ролланге. С увеличением толщины промежуточного раската разница температур между передним и задним концом уменьшается. Следует отметить, что температурный градиент по длине промежуточного раската, как правило, изменяется нелинейно из-за неравномерного нагрева слитков в колодце и значительного охлаждения концевых участков раската [6]. Температура по длине раската (полосы) распределяется в виде «треугольника». Максимальную температуру раската имеет середина длины с плавным снижением к краям (рис. 1) ( $\Delta t_5$  – температурный градиент по длине промежуточного раската перед клетью № 5). Из рис. 1 видно, что температура переднего конца полосы выше заднего во всех случаях. По данным [6] за последнюю клетью черновой группы падение температуры от середины длины раската к его концам в среднем составляет  $15 \dots 30$  °С.

Такое распределение температуры по длине раската оказывает негативное влияние на точность продольного профиля полосы. Применение промежуточного перемоточного устройства Coilbox на стане 1680 ОАО «Запорожсталь» позволило в определенной степени выровнять температуру по длине промежуточного раската и повысить, таким образом, качество продольного профиля готовой полосы, однако по-прежнему задний конец полосы прокатывают без натяжения.

#### Расчет энергосиловых параметров прокатки

Деформация частей рабочей клетки происходит под действием силы, с которой металл давит на валки, а также силы уравнивания валков или их противоизгиба.

Силу прокатки определяли по известной формуле

$$P = p_{cp} \cdot l_c \cdot B,$$

Точность определения силы прокатки главным образом зависит от точности определения нормального контактного напряжения  $p_{cp}$ . Среднее нормальное напряжение  $p_{cp}$  зависит от коэффициента трения, напря-

жения течения металла, геометрических параметров очага деформации, а также величины внеконтактной деформации.

В работе [7] выполнено сравнение опытных и расчетных данных среднего контактного нормального напряжения по различным моделям. Сравнение расчетных моделей выполняли при одинаковых значениях коэффициента трения и напряжении течения металла. Данные расчета свидетельствуют о том, что почти все исследованные модели показывают достаточную для практики сходимость с опытными данными. Однако наименьшие ошибки показывают формулы В. М. Луговского и В. А. Николаева.

В связи с этим для расчета была принята модель В. А. Николаева [7] ( $l_d/h_{cp} \geq 1$ ):

$$p_{cp} = \sigma_{\phi} \left( 1 + C_n f_n \frac{l_d}{h_{cp}} \right), \quad (8)$$

где  $\sigma_{\phi}$  – сопротивление металла деформации, Н/мм<sup>2</sup>;  $C_n$  – коэффициент, зависящий от показателя трения  $f_n$  ( $C_n = 0,48$  при  $f_n > 0,12$ ;  $C_n = 0,17(1+14,7f_n)$  при  $f_n \leq 0,12$ );  $l_d$  – длина дуги контакта, мм (при значениях  $p_{cp} > 300$  Н/мм<sup>2</sup>  $l_d$  необходимо заменять на  $l_c$  – длину дуги контакта с учетом упругой деформации валков и учитывать влияние натяжения концов полосы);  $h_{cp}$  – средняя толщина полосы в очаге деформации ( $\sigma_{\phi} = 1,15 \cdot \sigma_T$ );  $\sigma_T$  – напряжение течения металла.

При определении *коэффициента трения* воспользовались моделью [8], полученной на основании лабораторных и промышленных исследований и подтвержденной опытными данными

$$f = f_0 \cdot k_e \cdot k_m \cdot k_M \cdot k_v \cdot k_e \cdot k_{cm} \cdot k_{ок};$$

$$f_{II} = f(0,92 + 1,27\varepsilon), \quad (9)$$

где  $f_0$  – базовый показатель трения;  $k_e, k_m, k_M, k_v, k_e, k_{cm}, k_{ок}$  – поправочные коэффициенты, учитывающие соответственно: состояние поверхности валков, твердость поверхности валков, материал полосы, окружную скорость валков, относительное обжатие, тип применяемой смазки и состояние окалины на поверхности полосы.

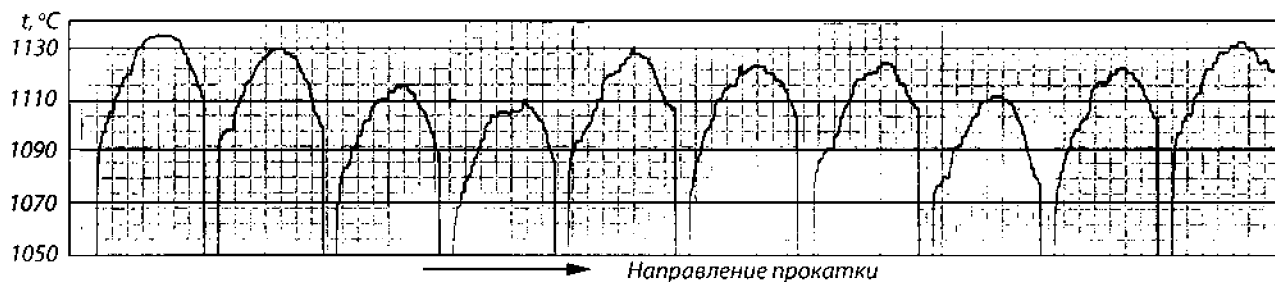


Рис. 1. Температура прокатываемого металла за последней клетью черновой группы при прокатке раскатов двойной массы ( $H_p = 23$  мм) (данные ОАО «Запорожсталь»)

Коефіцієнти  $f_0$ ,  $k_m$  і  $k_v$  розраховують так:

$$\left. \begin{aligned} f_0 &= 0,27 - 0,1[(t/400) - 2]^2; & k_r &= 1 + 0,43(1 - HSD/65)^2; \\ k_v &= 0,76 + 0,82(1,02 - 0,102v)^2 & \text{при } v < 10 \text{ м/с;} \\ k_v &= 0,76 & \text{при } v \geq 10 \text{ м/с} \end{aligned} \right\}$$

де  $t$  – температура металу,  $^{\circ}\text{C}$ ; HSD – твердість валків по Шору;  $v$  – окружна швидкість валків, м/с.

Значення поправочного коефіцієнта  $k_e$  приймаються в залежності ступеня деформації  $\varepsilon$ :

$$k_e = 0,85 + 0,5\varepsilon.$$

Поправочні коефіцієнти  $k_e$ ,  $k_{cm}$ ,  $k_m$ ,  $k_u$  визначають по таблицях з роботи [8, 9].

Як видно з вираження (9), модель для визначення коефіцієнта тертя враховує основні технологічні фактори і по даним [8] показує хороше співпадіння з опытними величинами.

**Напруження течія металу** можна визначити по моделі [9] в якій використовують вираження

$$\sigma_T = \sigma_{T0} \cdot k_t \cdot k_e \cdot k_u, \quad (10)$$

де  $\sigma_{T0}$  – базове напруження течія металу;  $k_r$ ,  $k_e$ ,  $k_u$  – поправочні коефіцієнти, враховують відповідно температуру полоси, ступінь і швидкість деформації, отримані на основі обробки експериментальних досліджень.

Базове напруження течія в залежності від хімічного складу сталі визначають по формулам:

для  $N_1 \leq 5$  (углеродисті, конструкційні, низколегіровані сталі)

$$\sigma_{T0} = 80 + 25 \left\{ 1 - [(5 - N_1) / 4,5]^{1,8} \right\}, \quad (11)$$

для  $N_2 > 5$  (легіровані, високолегіровані сталі)

$$\sigma_{T0} = 110 + 38[(N_2 - 2) / 32]^{0,25 N_2}, \quad (12)$$

де  $N_1$  і  $N_2$  – вміст хімічних елементів в сталі, % (крім заліза, сірки і фосфору);

$$k_t = 1,66 - 1,1[(t/400) - 2]^{0,7},$$

де  $t$  – температура металу.

Якщо  $N_1 < 5$ , а базове напруження  $\sigma_{T0} > 108$  Н/мм<sup>2</sup> то величину  $\sigma_{T0}$  розраховують по вираженню (12) для  $N_2 > 5$ . Формули для визначення коефіцієнтів  $k_e$ ,  $k_u$  в залежності від марки сталі, величин обжаття і швидкості деформації вибирають по таблицях [7, 9]. Для углеродистих марок сталей, наприклад, при обжатті  $\varepsilon > 0,1$  і швидкості деформації  $u \geq 10$  с<sup>-1</sup> маємо:

$$k_e = 0,8 + 0,2 \left[ 1 - 178(0,1 - \varepsilon)^2 \right];$$

$$k_u = 1,03 + 0,1(\ln u - 2,3)^{1,5}.$$

Модель (10)–(12) дозволяє визначити напружен-

ня течія для будь-якої марки сталі (по її хімічному складу), а також має просту форму розрахунку і показує високу збіжність з опытними даними. Порівняння опытних величин середнього нормального напруження з розрахованими по різним моделям для визначення  $p_{cp}$  і  $\sigma_T$  представлено в роботі [7].

В процесі прокатки під дією сили робочі валки еластично деформуються, що призводить до збільшенню довжини дуги контакту і, відповідно, площі контакту металу і валків. Для розрахунку була прийнята модель, що дозволяє визначити  $l_c$  без застосування ітераційного процесу [9]. При  $p_{cp} > 300$  Н/мм<sup>2</sup> довжину дуги контакту розраховували з урахуванням впливу еластичних деформацій валків:

$$\left. \begin{aligned} l_c &= \frac{c + \sqrt{c^2 + 4R\Delta h(1 - cf_n/2h_{cp})}}{2(1 - cf_n/2h_{cp})}; \\ c &= n_{cp} \sigma_{\phi} R / 47500; \quad n_{cp} = 1 - \frac{\sigma_n}{\sigma_{\phi}} - \frac{\sigma_3}{\sigma_{\phi}} \end{aligned} \right\}, \quad (13)$$

де  $\sigma_n$  і  $\sigma_3$  – напруження переднього і заднього натягів.

Коефіцієнт  $n_{cp}$  враховує вплив натягів полоси на середнє нормальне напруження.

Момент прокатки на двох валках з урахуванням переднього і заднього натягів згідно відомих рекомендацій дорівнює ( $B = \text{const}$ )

$$M = 2\psi_c \cdot P \cdot l_c + H \cdot B \cdot R \cdot \sigma_3 \cdot 10^{-6} \left( 1 - \frac{h}{H} \cdot \frac{\sigma_n}{\sigma_3} \right), \quad (14)$$

де  $\psi_c$  – коефіцієнт положення рівнодійствующої з урахуванням еластичного сплюснення валків;  $H$  і  $h$  – товщина полоси до і після прокатки.

Коефіцієнт плеча моменту визначили по формулі [9]

$$\psi_c = \psi(l_d/l_c)^2. \quad (15)$$

Коефіцієнт положення рівнодійствующої  $\psi$  (плеча моменту) при прокатці в жорстких валках (без урахування сплюснення валків) розраховували по формулам [9]:

$$\left. \begin{aligned} \psi &= 0,51(l_d/h_{cp})^{-0,1} - \text{при } l/h_{cp} = 1 \dots 3,5; \\ \psi &= 0,5(l_d/h_{cp})^{-0,092} - \text{при } l_d/h_{cp} > 3,5 \end{aligned} \right\}.$$

Мощність прокатки визначили по формулі

$$N = 960 \cdot M \cdot v/R, \quad (16)$$

де  $M$  – крутячий момент власне пластичної деформації на двох валках з урахуванням натягів полоси, МН·м;  $v$  – окружна швидкість валків в даній клітці, м/с;  $R$  – радіус робочих валків, м.

**Розрахунок товщини полоси.** При теоретичному

определении толщины полосы необходимо учитывать, что по ее длине одновременно изменяются толщина, сила прокатки и модуль жесткости полосы.

Определение расчетных значений параметров прокатки по длине полосы осуществляется путем использования итерационного процесса относительно минимальной толщины на участке переднего конца полосы [10].

Изменение толщины полосы на любом участке длины определяется по выражению [10]

$$\delta h_i = \frac{P_i - P_2}{M_k + \delta M_n}, \quad (17)$$

где  $\delta h_i$  – приращение толщины полосы;  $\delta M_n$  – разность модулей жесткости полосы на исследуемом участке и на участке с минимальной толщиной:

$$\delta M_n = M_{ni} - M_{n2}; M_{ni} = \frac{\varphi_i \cdot P_i}{\Delta h_i};$$

$$\varphi_i = (0,57 + 0,62 \cdot \varepsilon_i) \left[ 1 + 0,023 \cdot \left( \frac{R_i}{H_i} \right)^{0,5} \right],$$

где  $P_2$  и  $P_i$  – силы прокатки на участке с минимальной толщиной и на любом другом участке длины;  $M_{n2}$  и  $M_{ni}$  – модули жесткости полосы на участке с минимальной толщиной и на любом другом участке;  $\Delta h_i$  – текущее обжатие;  $\varphi_i$  – коэффициент, учитывающий нелинейность изменения модуля жесткости полосы при изменении параметров прокатки.

Коэффициент  $\varphi$  получен из графических данных работы [11].

Сила прокатки на участке 2 ниже, чем на участке 4 из-за меньшей температуры и отсутствия заднего натяжения (участок 4 – задний конец полосы,  $P_2 < P_4$ ). Числитель выражения (17) положительный, а модуль жесткости полосы на участке 2 ниже, чем на участке 4. Известно [3, 11], что при установленном межвалковом зазоре, увеличение модуля жесткости полосы приводит к уменьшению обжатия в клети и увеличению выходящей толщины. Помимо того, большая величина силы прокатки вызывает большую деформацию клети. Таким образом, толщина полосы будет увеличиваться ( $h_2 < h_4$ ). В случае, если сила  $P_2 > P_4$ , например, за счет увеличения температуры при прокатке с ускорением полосы, числитель выражения (17) стано-

вится отрицательным, модуль жесткости полосы на участке 4 будет ниже, чем на участке 2 толщина полосы на участке 4 будет меньше чем на втором ( $h_2 > h_4$ ).

Представленная выше модель реализована в табличном редакторе. Наилучшим образом подходит редактор Microsoft® Excel®, однако могут использоваться и любые табличные редакторы с поддержкой простых математических функций и процедуры итерирования.

## Выводы

Представленная модель расчета приращений толщины по длине полосы, позволяет проанализировать теоретическим путем влияние на искомый параметр одновременно изменяющихся всех технологических факторов.

## Список литературы

1. Матвеев Б. Н. Новое в производстве горячекатаной рулонной стали // Сталь, 1995. – № 11. – С. 34–40.
2. Николаев В. О. Виробництво плоского прокату / В. О. Николаев, В. Л. Мазур. – Запоріжжя : ЗДА, 2010. – 320 с.
3. Ткалич К. Н. Точная прокатка тонких полос / К. Н. Ткалич, Ю. В. Коновалов. – М. : Металлургия, 1972. – 176 с.
4. Железнов Ю. Д. Статистические исследования точности тонколистовой прокатки / Ю. Д. Железнов, С. Л. Кочарь, А. Г. Абнев. – М. : Металлургия, 1974. – 240 с.
5. Процесс прокатки / [М. А. Зайков, В. П. Полухин, А. М. Зайков, Л. Н. Смирнов]. – М. : МИСИС, 2004. – 640 с.
6. Исследование и разработка математической модели управления толщиной полос при транзитной прокатке / [Молчанов А. И., Солтан С. Л., Танцюра И. А. и др.] // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 1999. – № 4. – С. 57–60.
7. Николаев В. А. Расчет усилия при горячей прокатке / В. А. Николаев // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2005. – № 11. – С. 24–30.
8. Николаев В. А. К расчету коэффициента трения при горячей прокатке стали / В. А. Николаев // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1994. – № 11. – С. 21–24.
9. Николаев В. А. Теория прокатки / В. А. Николаев. – Запорожье, ЗГИА, 2007. – 228 с.
10. Николаев В. А. Продольная разнотолщинность горячекатаных полос, вызванная изменением толщины промежуточного раската / Николаев В. А., Матюшенко Д. А. // Металлургия. Сб. научн. трудов. – Запорожье : ЗГИА, 2008. – № 18. – С. 151–157.
11. Повышение точности листового проката / [Меерович И. М., Герцев А. И., Горелик В. С., Классен Э. Я.]. – М. : Металлургия, 1969. – 264 с.

Одержано 18.11.2010

## Ніколаєв В.О., Васильєв О.Г., Матюшенко Д.О. Розрахунок збільшення товщини по довжині штаби під час гарячого прокатування

*Розроблено теоретичну модель розрахунку збільшення товщини по довжині штаби під час гарячого прокатування з урахуванням сукупного впливу діючих технологічних факторів.*

**Ключові слова:** гаряче прокатування, прокатний стан, поздовжня різнотовщинність, штаба, задній кінець штаби, стовщення.

## Nikolaev V., Vasiliev A., Matyushenko D. The calculation of strips thickness increasing during hot rolling in its length

*The theoretical calculation model of a strips thickness increasing on its length, considering joint influence of technological in hot rolling is developed.*

**Key words:** factors hot rolling, rolling mill, gage interference, strip, strip back-end, thickness increase.