

## Теория пластичности

### ИССЛЕДОВАНИЯ МЕХАНИЗМА НАТЯЖЕНИЯ ПОЛОС ПРИ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКЕ

КОХАН Л.С., *д-р техн. наук, профессор*

БЕЛЕЛЮБСКИЙ Б.Ф., *канд. техн. наук, доцент*

*Московский Государственный вечерний металлургический институт,*

*111250, Москва, Лефортовский вал, 26; т. 361-14-80, факс 361-16-19*

[nis\\_mgyvi@mail.ru](mailto:nis_mgyvi@mail.ru)

*В работе рассмотрен механизм натяжения полос при прокатке на многоклетевых прокатных станах. Представлен расчет параметров прокатки с учётом переднего и заднего натяжения в зависимости от угла наклона петледержателя.*

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** холодная прокатка, натяжение, петледержатель, разнотолщинность, нейтральное сечение.

При прокатке тонких листов и полос применение натяжения обеспечивает минимальную разнотолщинность по длине полосы за счет стабилизации ее положения между валами по всей ширине. При этом основным критерием выбора натяжения является не превышение напряжения в полосе выше предела текучести и относительной деформации  $\epsilon_s$ , не превышающей значение упругой величины  $\epsilon_f < 0,02$ . С данным требованием рассмотрим типовую конструкцию петледержателя между клетями непрерывных станов холодной прокатки (рис. 1).

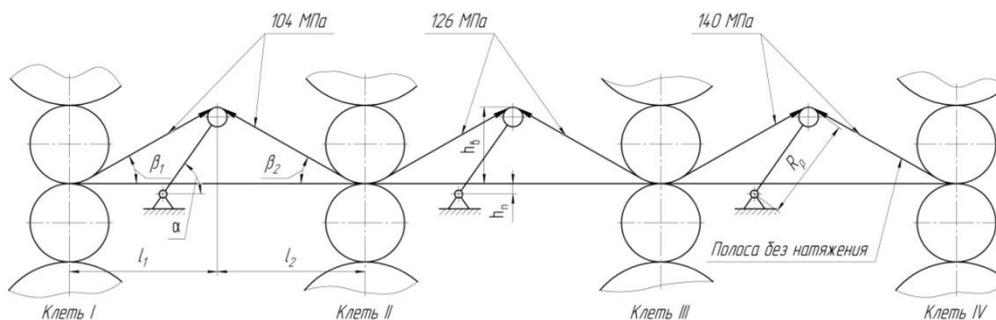


Рис. 1. Схема воздействия рычага петледержателя  $R_p$  на полосу

Для изменения натяжения под действием привода рычаг поворачивается на угол  $\alpha$ , упруго растягивая полосу между клетями III, IIII и т.д.

Длина упругорастянутой полосы  $L_{\text{пол}}$  становится равной

$$L_{\text{пол}} = \sqrt{(l_1 + R_p \cos \alpha)^2 + h_B^2} + \sqrt{(l_2 - R_p \cos \alpha)^2 + h_B^2}, \quad (1)$$

где  $l_1, l_2$  – расстояние привода от клеток I и II,  $h_B$  – вертикальное расстояние от верхней контактной поверхности рычага петледержателя до горизонтального положения полосы между прокатными клетями,  $h_B = R_p \sin \alpha - h_i$ ,  $h_n$  – вертикальное расстояние от поворотной оси рычага до горизонтального положения полосы между прокатными клетями.

Окончательно:

$$L_{\text{пол}} = \sqrt{(l_1 + R_p \cos \alpha)^2 + (R_p \sin \alpha - h_n)^2} + \sqrt{(l_2 - R_p \cos \alpha)^2 + (R_p \sin \alpha - h_n)^2}, \quad (2)$$

Для станов холодной прокатки полос толщиной 1–3 мм, например, для стана НСХП 1680, расстояние  $l_1 = 2150$  мм,  $l_2 = 3690$  мм,  $R_p = 770$  мм,  $h_n = 190$

мм. Для этих размеров сначала был определен начальный угол  $\alpha_{нач}$ , при котором не происходит отклонения полосы  $R_p \sin \alpha = h_r$ , откуда  $\alpha_0 = \arcsin(h_r/R_p) = 14,28^\circ$ . Начиная от данного угла, в табл. 1 приведены длины полосы через каждый градус, абсолютное  $\Delta L$ , относительная деформация удлинения полосы  $\varepsilon_l$ , высота подъема рычага  $h_B$ . Так же в таблице приведен расчет напряжения при упругом удлинении полосы:

$$\sigma_{нат} = \sigma_l = \varepsilon_l E, \quad (3)$$

где  $\varepsilon_l = [L_{пол} - (l_1 + l_2)] / (l_1 + l_2)$  – относительная деформация удлинения;  $E$  – модуль упругости, для сталей  $E = 2 \cdot 10^5$  МПа.

Таблица 1

Геометрические и силовые параметры работы механизма натяжения

$\alpha$ , град	15°	16°	17°	18°	19°	20°	21°	22°	23°
$L_{пол}$ , мм	5 840,07	5 840,17	5 840,42	5 840,79	5 841,26	5 841,84	5 842,52	5 843,32	5 844,21
$\Delta L$ , мм	0,07	0,17	0,42	0,79	1,26	1,84	2,52	3,32	4,21
$\varepsilon_l$	0,000012	0,0000289	0,000072	0,00013	0,0002157	0,0003159	0,00043	0,000568	0,00072
$\sigma_{нат}$ , МПа	2,6	5,8	14,46	26,95	43,2	63,1	86,5	113,7	144,1
$h_B$ , мм	9,26	22,2	35,1	47,9	60,6	73,3	85,9	98,4	110,9

Анализ таблицы показывает, что при изменении углового положения рычага от 15° до 23° относительная упругая деформация полосы не превышает упругой деформации с запасом  $K_{зап} = 0,002/0,00126 = 1,587$ .

Таким образом, довольно значительные величины напряжения натяжения не приводят к повышению пластических деформаций, что объясняется прежде всего размерами межклетевых расстояний во много раз больше перемещений рычага петледержателя:  $h_B \ll l_1 + l_2$  ( $h_{Bmax} = 147,5 < 584$  мм).

Экспериментальные исследования подтверждают данные исследования. Так, в работе Клименко В.М., Онищенко А.М., Минаев А.А., Горелик В.С. «Технология прокатного производства», на стадии режима обжатия листа из стали Ст3пс толщиной 1 мм на стане НСХП 1680 применяются экспериментальные величины переднего и заднего натяжений, достигающие 140 МПа.

Для определения значения относительной величины натяжения используем величины сопротивлений пластической деформации из приведенного выше источника, для первой клетки  $\sigma_T = 520$  МПа, для второй – 630 МПа, для третьей – 700 МПа, для четвертой клетки 720 МПа. Тогда на выходе из первой клетки переднее натяжение при  $\sigma_{нат} = 144,1$  МПа ( $\alpha = 23^\circ$ ) составит примерно

$$\xi_0 = 1 - \frac{\sigma_1}{\sigma_2} = 1 - \frac{144,1}{520} = 0,722$$

Величины натяжения определяют углы  $\beta_1$  и  $\beta_2$  (рис. 1):

$$\beta_1 = \arctg \frac{R_p \sin \alpha - h_n}{l_1 + R_p \cos \alpha}, \quad \beta_2 = \arctg \frac{R_p \sin \alpha - h_n}{l_2 + R_p \cos \alpha}. \quad (4)$$

Для принятых выше геометрических размеров петледержателя в табл.2 приведены величины углов  $\beta_1$  и  $\beta_2$ , а также коэффициент натяжения  $\xi_1$ .

Таблица 2. Углы поворота полосы

Угол поворота петледержателя	15°	16°	17°	18°	19°	20°	21°	22°	23°
Угол $\beta_1$ , град	0,19	0,44	0,7	0,953	1,21	1,46	1,72	1,97	2,22
Угол $\beta_2$ , град	0,18	0,43	0,68	0,94	1,17	1,42	1,66	1,84	2,13
$\xi = 1 - \sigma_{нат} / \sigma_T$	0,995	0,989	0,972	0,948	0,917	0,879	0,834	0,781	0,723

На рис. 2 показан график коэффициентов натяжения в зависимости от самих натяжений.

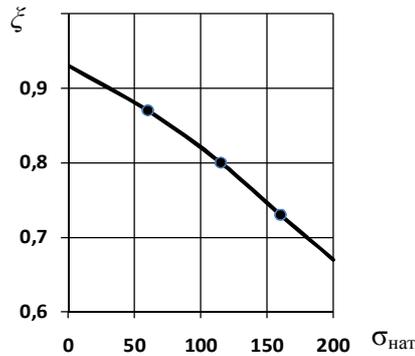


Рис. 2. Зависимость коэффициентов натяжений от их величин

Анализ полученных данных показывает, что углы подъема полосы  $\beta_1$  и  $\beta_2$  равны, поэтому на всем диапазоне изменения угла  $\alpha$  будут равны переднее и заднее натяжения между соседними клетями (см. тал. 2). Это же подтверждается данными табл. 3 для экспериментально отработанного режима обжатий при прокатке полосы  $1 \times 1400$  мм на стане НСХП 1680 [1].

Из таблицы также видно, что практически равенство у данных конструкций станов углов отклонения полосы  $\beta_1 = \beta_2$  приводит к равенству натяжений между соседними клетями (рис. 3).

Для подтверждения полученных результатов исследуем силовой режим прокатки рассматриваемой полосы  $1 \times 1400$  мм на 3-й и 4 клетях.

Таблица 3

Режим обжатий листа  $1 \times 1400$  мм из стаи Ст ЗПК на стане НСХП 1680

№ клетки	$\varepsilon$ , %	$\varepsilon_{общ.}$ , %	$h_0$ , мм	$\sigma_{зад}$ , МПа	$\sigma_{пер}$ , МПа	$\sigma_{ср}$ , МПа	$\sigma_T$ , МПа	скорость $V$ , м/с	$h_1$ , мм
1	23,2	23,2	2,8	76	104	460	520	6,05	2,15
2	27,8	44,6	2,15	104	126	640	630	8,38	1,55
3	23,9	57,8	1,55	126	140	775	650	11	1,18
4	15,3	64,2	1,18	140	108	825	720	13	1,0

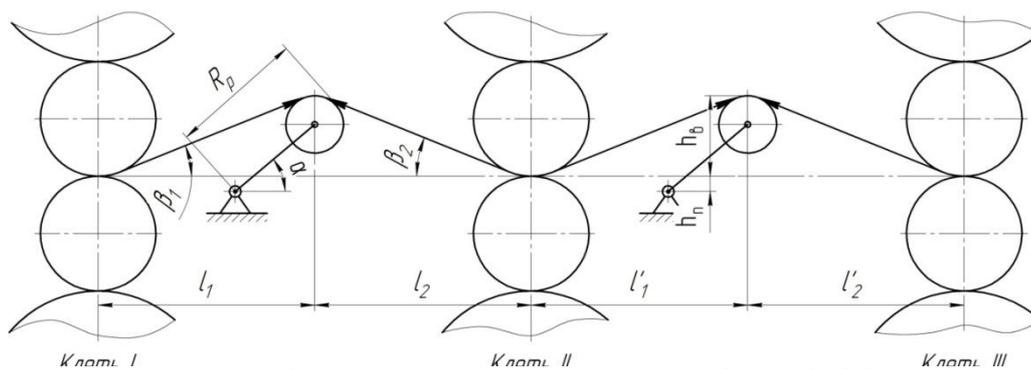


Рис. 3. Натяжение между клетями стана НСХП 1680 [1]

В третьей клетке  $\xi_0 = 1 - 126/650 = 0,806$  и  $\xi_1 = 1 - 140/650 = 0,785$ . При угле захвата  $\alpha = \sqrt{1,55 \cdot 0,239 / 270} \cdot 57,3 = 2,12^\circ$ , основной параметр  $\delta = 2 \cdot 0,1 / \operatorname{tg} 2,12 = 5,5$  и коэффициент упрочнения  $K = 1,1$ ; коэффициент нейтрализации  $= 1,172$  и  $H_n = 1,3225$  мм. Проверяем давление в нейтральном сечении:

$$\bar{\sigma}_{om.n} = \frac{1}{5,4} \left[ (5,4 \cdot 0,806 - 1,1) \cdot 1,172^{5,4} + 1,1 \right] = 1,623;$$

$$\bar{\sigma}_{on.n} = \frac{1}{5,4} \left[ (5,4 \cdot 0,785 + 1,1) \cdot \left( \frac{1,3225}{1,18} \right)^{5,4} - 1,1 \right] = 1,626.$$

Отличие напряжений менее 1%, поэтому  $z$  выбрано правильно. Далее определяем координату в середине зоны отставания  $x_{cep.om} = (x_n + l) / 2$ , где

$$\gamma = \arccos[1 - (H_n - H_1) / D] = 1,226^\circ, \quad x_\gamma = R \sin \gamma = 270 \sin 1,226 = 5,777,$$

$x_{cep.or} = 8,22$  мм,  $l = \sqrt{1,55 \cdot 0,239 \cdot 270} = 10$  мм. Толщина полосы в этом сечении

$$H_{cep.om} = 2 \left( 270 - \sqrt{270^2 - x_{cep.om}^2} \right) + H_1 = 1,43 \text{ мм};$$

$$\bar{\sigma}_{cep.om} = \frac{1}{5,4} \left[ (5,4 \cdot 0,806 - 1,1) \left( \frac{8,55}{1,43} \right)^{5,4} + 1,1 \right] = 1,134 \text{ и } \bar{\sigma}_{cp.om} = \frac{1 + 2\sigma_{cep.om} + \sigma_{om.n}}{4} = 1,251.$$

В середине зоны опережения  $x_{cep.on} = x_n / 2 = 2,89$  мм, высота  $H_{cep.on} = 1,211$  мм,  $\bar{\sigma}_{cep.on} = 0,95$ ;  $\bar{\sigma}_{cp.on} = (2 \cdot 0,95 + 1,1 + 1,626) / 4 = 1,156$ . При отношении  $x_n / l = 0,577$  среднее давление  $\bar{\sigma}_{cp} = (1 - 0,577) \cdot 1,251 + 0,577 \cdot 1,156 = 1,196$  и в абсолютном измерении  $\sigma_{cp} = \bar{\sigma}_{cp} \cdot \sigma_T = 1,196 \cdot 650 \approx 777,4$  МПа. По эксперименту  $\sigma_{cp} = 775$  МПа.

При прокатке на четвертой клетке  $H_0 = 1,18$  мм,  $H_1 = 1$  мм,  $\xi_0 = 0,8$  и  $\xi_1 = 0,85$ . Принимаем  $z = 1,102$  и  $H_n = 1,0708$  мм. При радиусе вала  $R = 270$  мм, обжатии  $\epsilon = 0,153$  угол  $\alpha = 1,48^\circ$  и основной параметр  $\delta = 2 \cdot 0,1 / \operatorname{tg} 1,48 = 7,74$ . По справочникам коэффициент упрочнения  $K = 1,03$ .

Проверяем напряжение в нейтральном сечении:

$$\bar{\sigma}_{om.n} = \left[ (7,74 \cdot 0,8 - 1,03) \cdot 1,102^{7,74} + 1,03 \right] / 7,74 = 1,547 \text{ и}$$

$$\bar{\sigma}_{on.n} = \left[ (7,74 \cdot 0,85 + 1,03) \cdot (1,0708 / 1)^{7,74} - 1,03 \right] / 7,74 = 1,536.$$

Отличие менее 1%, поэтому вычисляем  $H_n = 1,0708$  мм,  $x_n = 4,37$  мм  $\gamma = \arccos[1 - (1,0708 - 1) / 540] = 0,927^\circ$ . При  $x_{cep.om} = (x_n + l) / 2 = 5,68$  мм,  $H_{cep.or} =$

1,12 мм,  $\bar{\sigma}_{cep.om} = 1,128$  и  $\bar{\sigma}_{cp.om} = 1,198$ . При  $x_{cep.on} = x_n / 2 = 2,185$  мм,  $H_{cep.on} = 1,017$  мм,  $\bar{\sigma}_{cep.on} = 0,993$  и  $\bar{\sigma}_{cp.on} = 1,14$ .

Далее при  $x_n / l = 0,624$  среднее относительное давление  $\bar{\sigma}_{cp} = 1,16$  и абсолютное  $\sigma_{cp} = 1,16 \cdot 720 = 836$  МПа.

По экспериментам [1]  $\sigma_{cp} = 825$  МПа – отличие 1,3 %, что подтверждает методику расчета механизма петлеобразователя.

Еще раз отметим, что силовые условия образования натяжений, устанавливаются угловым положением рычага петледержателя, позволяющего в очень коротком интервале от  $\xi = 0,7$  до 1 осуществить регулирование процесса, обеспечивая качественные параметры прокатываемой полосы.

Оценим изменение силовых характеристик прокатки полосы 1×1400 мм при отсутствии натяжения на 4-ой клетки.

Принимаем  $\xi_0 = \xi_1 = 1$ ,  $z = 1,095$  и  $K = 1,03$ . Проверяем напряжение в нейтральном сечении:

$$\bar{\sigma}_{om.n} = [6,71 \cdot 1,095^{7,74} + 1,03] / 7,74 = 1,883 \text{ и}$$

$$\bar{\sigma}_{on.n} = [8,77 \cdot (1,0776 / 1)^{7,74} - 1,03] / 7,74 = 1,888$$

Отличие менее 1 %, поэтому вычисляем  $\gamma = 0,9715^\circ$ ,  $x_n = 4,578$  мм,  $l = 7$  мм,  $x_{cep.om} = 5,789$  мм,  $H_{cep.om} = 1,124$  мм,  $\bar{\sigma}_{cep.om} = 1,395$ ;  $\bar{\sigma}_{cp.om} = 1,418$ .

При  $x_{cep.on} = 2,289$  мм,  $H_{cep.on} = 1,0195$  мм,  $\bar{\sigma}_{cep.on} = 1,183$  и  $\bar{\sigma}_{cp.on} = 1,321$ .

Наконец, при  $x_n / l = 0,654$   $\bar{\sigma}_{cp} = 0,49 + 0,864 = 1,354$  и  $\sigma_{cp} = 975$  МПа. По сравнению с прокаткой с применением натяжения и, соответственно, усилие увеличилось на

$$\Delta = \frac{975 - 836}{836} \cdot 100 = 14,25\% .$$

Однако, для создания необходимого относительного натяжения  $\xi = 0,8$  необходимо дополнительно, через двигатель петледержателя установить натяжение 100–120 МПа (см. рис. 3). Таким образом, общие энергетические затраты будут примерно одинаковыми.

В это же время снижение усилия прокатки уменьшает прогибы валковой системы и снижает продольную и поперечную разнотолщинность полосы.

Таким образом, повышение качественных показателей процесса прокатки полос требует обязательного применения систем натяжения, расчет оптимальных параметров которых, приведен в данной статье.

#### Л и т е р а т у р а

1. Клименко В.М., Онищенко А.М., Минаев А.А., Горелик В.С. Технология прокатного производства. Учеб. пособие. – К.: Вища школа. Головное изд-во, 1989. – 311 с.

### EXPLORATIONS OF THE TENSION MECHANISM AT COLD ROLLING OF STRIPS

Kohan L.S., Beleyubsky B.F.

The authors investigate the tension mechanism of multi-strand rolling. Calculation of process variables with the account of forward and back tensions and depending on inclination of loop lifter is presented.

KEY WORDS: cold rolling, tension, loop lifter, uneven gauge, neutral section.