

621.771

В.А. Николаев, зав. кафедрой, д.т.н., профессор  
А.Г. Васильев, инженер

## ДОПУСКАЕМЫЕ ОБЖАТИЯ РАСКАТА В ЧЕРНОВЫХ КЛЕТЯХ ШСГП

*Запорожская государственная инженерная академия*

У черновых клетях широкоштабовых станов (ШСГП) рекомендуют застосовувати максимальні обтиснення, що дозволяє використовувати товсті сляби, а також понизити теплові втрати. Значення обтиснень сляба (розкату) в клетях обмежуються різними факторами, у тому числі величинами припустимих куту захвату (коефіцієнту тертя), міцності валків (сили прокатки) і деталей головної лінії кліті (крутного моменту). Визначення реальних значень обмежень дозволить встановити раціональний режим обтиснень сляба у клетях.

Ключові слова: стан, кліть, прокатування, розкат, обтиснення, кут захвату, сила

В черновых клетях широкополосных станов (ШСГП) рекомендуют применять максимальные обжатия, что позволяет использовать толстые слябы, а также уменьшить тепловые потери. Величины обжатий сляба (розкату) в клетях ограничиваются различными факторами, в том числе допускаемым углом захвата (коэффициентом трения), прочностью валков (силой прокатки) и деталей главной линии клетки (крутящим моментом). Определение реальных значений ограничений позволит установить рациональный режим обжатий сляба в клетях.

Ключевые слова: стан, клеть, прокатка, раскат, обжатие, угол захвата, сила

The maximal cobblings recommend to apply in the rough stands of broad band figures (FHRBB) that allows to use thick slabs, and also decrease thermal losses. The sizes of cobblings of slab (roll) in stands are limited by the different factors, including the assumed corner of claw (by the coefficient of friction), durability of rollers (by force of rolling) and details of main line of stand (by a twisting moment). Determination of the real values of limitations will allow to set the rational regime of cobblings for slab in stands.

Keywords: figure, stand, rolling, roll, cobbing, corner of claw, force

*Введение.* При прокатке раскатов в клетях черновых групп широкополосного стана горячей прокатки (ШСГП) величины обжатий горизонтальными валками ограничиваются различными условиями: предельным углом захвата, прочностью валков (силой прокатки), крутящим моментом, мощностью главного привода. Наибольшие обжатия характерны для первых клетей, когда температура сляба имеет максимальную величину ( $\approx 1180 \dots 1220$  °C). Меньшие абсолютные обжатия назначаются в последних клетях черновой группы, когда раскат имеет сравнительно небольшую толщину и наименьшую температуру. В первых клетях чистовой группы величины абсолютных обжатий полосы обусловлены, главным образом, силой прокатки и мощностью главного привода, а в последующих клетях качеством поперечного профиля полосы. В этих клетях величины обжатий устанавливаются на основании промышленных исследований.

Наиболее систематизированный, на наш взгляд, уточненный метод расчета предельных обжатий, представлен в работе [1].

Определение допустимого обжатия из условия предельного угла захвата. Естественный захват полосы валками происходит при условии [1,2]:

$$\alpha_{\zeta} = f \cdot f_{\zeta} \cdot k_{\zeta} \cdot k_Q, \quad (1)$$

где  $\alpha_{\zeta}$  – допустимый (предельный) угол захвата раската валками;  $f_{\zeta}$  – условный коэффициент трения при захвате раската;  $f$  – коэффициент трения в очаге деформации в установившемся процессе прокатки;  $k_{\zeta}$  – коэффициент, учитывающий различие условий при свободном захвате раската и в установившемся процессе прокатки ( $k_{\zeta} \approx 1,3$ );  $k_Q$  – коэффициент, учитывающий улучшение условий захвата при задаче в валки раската под действием рольганга или предыдущей клетки.

Первые две составляющие ( $f_{\zeta}, k_{\zeta}$ ) уравнения (1) соответствуют условиям свободного захвата раската. Величины коэффициентов трения при захвате раската валками и в установившемся процессе различные, что обусловлено технологическими особенностями контактирования металла и валков, рассмотренными в работах [3,4].

Если раскат входит в валки под действием некоторой силы  $Q$  от предыдущей клетки с горизонтальными (вертикальными) валками [2,3,5], то в этом случае на образовавшейся площадке контакта (после переноса силы  $0,5Q$  в точку середины длины контакта) действуют силы (рис. 1):

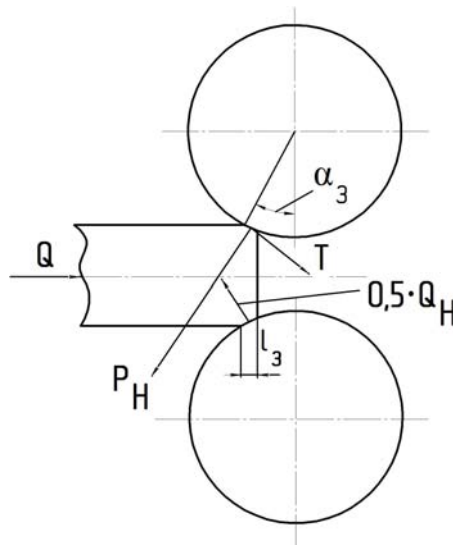


Рисунок 1 – Схема действия сил при захвате раската валками

– нормальная:  $P_j = P + 0,5Q_j$ ;  $Q_j = Q \cdot \sin \alpha_{\zeta}$ ;

– касательная:  $T_{\dot{\alpha}} = T \cdot \cos \alpha_{\zeta} + 0,5Q$ ,

где  $D_j$  – полная нормальная сила на площадке захвата раската;  $D$  – сила, действующая от раската на валки данной клетки при свободном захвате;  $Q_j$  – нормальная к поверхности контакта составляющая силы  $Q$ ;  $\alpha_{\zeta}$  – фактический угол захвата;  $\dot{D}_{\dot{\alpha}}$  – горизонтальная составляющая полной касательной силы на площадке захвата раската;  $\dot{D}$  – касательная сила на площадке при свободном захвате раската.

Условие равновесия сил в горизонтальной плоскости имеет вид:

$$(T \cdot \cos \alpha_{\zeta} + 0,5Q) = P \cdot \sin \alpha_{\zeta}. \quad (2)$$

Осуществляя деление уравнения (3) на силу  $P$  и выполняя некоторые преобразования, можно записать

$$\alpha_{\zeta} = f_{\zeta} + k_{\zeta} , \quad (3)$$

где  $k_{\zeta}$  – коэффициент, учитывающий влияние силы, заталкивающей полосу,  $k_{\zeta} = \frac{Q}{2D}$ .

При отсутствии силы  $Q$  имеет место известное выражение для свободного захвата  $\alpha_{\zeta} = f_{\zeta}$ .

Силу  $Q$  можно определить для условий прокатки в предыдущей клетке (с учетом влияния зон опережения и отставания) из выражения (при  $\gamma > 0$  и  $\cos \alpha \cong 1$ ):

$$Q = 2f \cdot P_n \cdot (\alpha - 2\gamma/\alpha) , \quad (4)$$

где  $P_n$  – сила прокатки при заполненном очаге деформации в предыдущей клетке;  $f$ ,  $\gamma$ ,  $\alpha$  – коэффициент трения, угол критического сечения и угол контакта в предыдущей клетке соответственно.

При прокатке высоких раскатов реальное среднее отношение  $\gamma/\alpha \Rightarrow 0,5$  и параметр  $(\alpha - 2\gamma/\alpha)$ , очевидно, не превышает значений  $0,05 \dots 0,10$ . Тем более что, после контакта раската с валками последующей клетки, отношение  $\gamma/\alpha$  в очаге деформации предыдущей клетки будет уменьшаться, а при достижении  $\gamma/\alpha = 0$  (буксование валков по полосе) заталкивающая сила  $Q$  будет равна нулю.

Для определения силы  $D$  в данной клетке, действующей в момент захвата, можно применить формулу

$$P \cong \delta_{cp,\zeta} \cdot \ell_{\zeta} \cdot \hat{A} , \quad (5)$$

где  $\delta_{nd,\zeta}$  – среднее нормальное контактное напряжение при захвате раската в данной клетке;  $\hat{A}$  – ширина раската;  $\ell_{\zeta}$  – длина дуги контакта в данной клетке в момент захвата раската.

Записывая силу  $Q$  в уравнении (4) через нормальное контактное напряжение и осуществляя совместное решение выражений (4) и (5) при  $\alpha - 2\gamma/\alpha = 0,05 \dots 0,10$  получают

$$k_{\zeta} = \frac{Q}{2D} = (0,05 \dots 0,10) \frac{f \cdot \delta_{cp} \cdot l_d}{\delta_{cd,\zeta} \cdot l_{\zeta}} , \quad (6)$$

где  $l_d$  – длина дуги контакта в предыдущей клетке;  $\delta_{nd}$  – среднее нормальное контактное напряжение при прокатке в предыдущей клетке.

Вследствие наличия пластической деформации при захвате раската имеем  $\delta_{nd}/\delta_{cp,\zeta} \neq 1,0$ . В зависимости от влияния контактного трения и неконтактной деформации указанное соотношение может быть больше или меньше единицы. Принимая для высоких полос ( $l_d/h_{cp} \geq 1,0$ ) реальные параметры  $\delta_{nd}/\delta_{cp,\zeta} \cong 1,0$ ;  $l_d/l_{\zeta} = 15$ ;  $f = 0,25$ ;  $f_{\zeta} = f \cdot k_{\zeta} = 0,325$  ( $k_{\zeta} \cong 1,30$  [3,5]), и числовой коэффициент в формуле (6) равным  $0,075$ , получают для этих условий  $k_{\zeta} = 0,368$ , а допускаемый угол захвата из выраже-

ния (3) будет равен  $\alpha_\zeta = 0,48\delta_{\zeta}$ , что в 1,48 раза больше, чем при свободном захвате раската ( $\alpha_\zeta = f_\zeta$ ).

Допускаемое обжатие  $\Delta h_d$  равно [1-3,56]:

$$\Delta h_d = R \cdot \alpha_\zeta^2 = R \cdot f_\zeta^2, \quad (7)$$

где  $R$  – рабочий радиус валков;  $f_\zeta$  – условный коэффициент трения из выражения (1).

Коэффициенты  $f_\zeta$ ,  $f$ ,  $k_{zi}$  определяют из литературы на основании опытных или расчетных данных [1-3,5], обработка которых позволяет рекомендовать для практических целей следующие значения коэффициентов: в случае задачи раската в горизонтальные валки рольгангом коэффициент  $k_{zi}$  следует принимать равным 1,05; если раскат входит в горизонтальные валки после выхода из валков предыдущей клетки с вертикальными валками, то коэффициент будет 1,1...1,15, а если из горизонтальной клетки, то, в соответствии с расчетами, величину коэффициента следует принимать равной 1,3...1,4.

*Определение допускаемого обжатия из условия прочности валков.* Режим деформации металла должен предусматривать такие обжатия, при которых валки стана не будут разрушены единичной нагрузкой. Для определения допускаемого обжатия принимают известное выражение для расчета силы прокатки

$$P = p_{cp} \cdot B_{cp} \cdot \sqrt{R \cdot \Delta h}. \quad (8)$$

После возведения в квадрат обеих частей уравнения (8) и решения относительно  $\Delta h$  при допускаемой силе  $P_d$  получают

$$\Delta h_d = \left( \frac{P_d}{p_{cp} \cdot B_{cp}} \right)^2 \cdot \frac{1}{R}, \quad (9)$$

где  $\Delta h_d$ ,  $P_d$  – допускаемые величины обжатия и силы на валки соответственно;  $\delta_{\bar{n}\delta}$  – среднее нормальное контактное напряжение.

В формулу (9) входят две неизвестные величины  $\Delta h_d$  и  $\delta_{\bar{n}\delta}$ . Среднее нормальное напряжение  $\delta_{\bar{n}\delta}$  неизвестно потому, что оно может быть определено только при известной величине обжатия  $\Delta h$ . Поэтому решение указанного выражения осуществляется итерационным методом (методом приближений), выполнение которого не представляет сложностей.

Имея в виду, что сила прокатки практически линейно зависит от обжатия, предложено также выражение, исключающее итерационный расчет допускаемого обжатия [7]:

$$\Delta h_d = \Delta h' + \frac{(\Delta h'' - \Delta h')}{P'' - P'} \cdot (P_d - P'), \quad (10)$$

где  $\Delta h'$ ,  $\Delta h''$  – соответственно минимальное и максимальное абсолютные обжатия, принятые для данного расчета;  $P'$ ,  $P''$  – расчетные силы прокатки, соответствующие обжатиям  $\Delta h'$  и  $\Delta h''$ .

При расчете допускаемого обжатия задают значения обжатий  $\Delta h'$  и  $\Delta h''$ , возможные для данного стана, и по известным формулам рассчитывают силы прокатки

$D'$  и  $D''$  [20]. Например, для слябинга возможные обжатия находятся в пределах 20...70 мм. Поэтому, величины  $\Delta h'$  и  $\Delta h''$  можно принять равными соответственно  $\Delta h' = 20...30$  мм и  $\Delta h'' = 60...70$  мм.

Допускаемые значения силы прокатки в клети «кварто» определяют исходя из прочности бочки и шейки опорного валка на изгиб. Для двухвалковой клети имеют, МН:

– для бочки валка

$$D_d = 0,4D^3 \cdot \frac{[\sigma_{\dot{\epsilon}c}]}{a - 0,5b} ; \quad (11)$$

– для шейки валка

$$D_d = 0,4d_o^3 \cdot \frac{[\sigma_{\dot{\epsilon}c}]}{l_o} , \quad (12)$$

где  $[\sigma_{\dot{\epsilon}c}]$  – допускаемое напряжение на изгиб, Н/мм<sup>2</sup>;  $D$  – диаметр валка в опасном сечении, м;  $a$  – расстояние между осями нажимных винтов, м;  $b$  – ширина сляба (листа), м;  $d_o$ ,  $l_o$  – диаметр и длина шейки валка соответственно, м.

Однако в практических условиях величину  $P_d$  часто уменьшают, по сравнению с расчетными значениями, до (0,90...0,95)  $P_d$  для повышения надежности работы валков (большая величина – для новых, а меньшая – для старых станков). Наиболее слабым элементом служит шейка опорного валка.

При оценке прочности деталей на кручение, в том числе и шейки валка, целесообразно сравнивать величины расчетного и допускаемого крутящих моментов. Теоретическим путем крутящий момент на одном рабочем валке определяют по формуле:

$$M = \psi \cdot l_d \cdot P , \quad (13)$$

где  $\psi$  – коэффициент положения равнодействующей сил в очаге деформации;  $l_d$  – длина дуги контакта.

При определении величины допускаемого крутящего момента  $M_d$  можно использовать формулу

$$M_d = \frac{0,975N_{\dot{a}\dot{a}} \cdot \eta \cdot 10^{-2}}{n_i} , \quad (14)$$

где  $N_{\dot{a}\dot{a}}$  – мощность двигателя, кВт;  $\eta$  – коэффициент потерь мощности в деталях главной линии стана,  $n_i$  – номинальное число оборотов двигателя, об<sup>-1</sup>.

Допускаемые напряжения изгиба  $[\sigma_{\dot{\epsilon}c\dot{a}}]$  и кручения  $[\tau_{\dot{\epsilon}d}]$ :

– для стальных валков, Н/мм<sup>2</sup>:  $[\sigma_{\dot{\epsilon}c\dot{a}}] = 100...120$  и  $[\tau_{\dot{\epsilon}d}] = 70...85$ ;

– для чугунных валков, Н/мм<sup>2</sup>:  $[\sigma_{\dot{\epsilon}c\dot{a}}] = 70...80$  и  $[\tau_{\dot{\epsilon}d}] = 50...55$ .

Установлено, что опасное сечение на кручение в сечении детали, например в шейке рабочего приводного валка, находится под углом 45° к продольной оси валка.

Для определения допускаемого угла захвата, силы прокатки и крутящего момента, в первую очередь, необходимо рассчитать коэффициенты трения ( $f$ ), напряжение течения металла ( $\sigma_o$ ), среднее нормальное контактное напряжение ( $\delta_{\dot{n}o}$ ), коэф-

фициент плеча момента ( $\psi$ ), длину дуги контакта с учетом упругих деформаций валков и полосы ( $\ell_n$ ) и силу прокатки ( $D$ ). Наиболее достоверные и обоснованные зависимости для расчета указанных параметров, подтвержденные практическими данными, представлены в работах [1-3,5,6], которые и рекомендуются для использования.

Для последующих расчетов остальных параметров очага деформации в данной клетки из всех вариантов значений принимают минимальное допустимое обжатие.

*Выводы.* Разработан усовершенствованный метод расчета обжатия по величине предельного угла захвата с учетом принудительной задачи раската в валки от горизонтальной силы предыдущей клетки. Получено выражение для расчета горизонтальной силы при деформации металла в предыдущей клетки. Установлено, что применение принудительного ввода раската в валки приводит к увеличению предельного угла захвата в 1,3...1,4 раза.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Николаев, В. О.* Виробництво плоского прокату [Текст] / В. О. Николаев, В. Л. Мазур. – Запоріжжя : ЗДІА, 2010. – 320 с. – Бібліогр. : с. 310-317. – ISBN 978-966-8462-27-6.
2. *Николаев, В. А.* Продольная разнотолщинность широких полос [Текст] / В. А. Николаев, А. А. Васильев // *Металлургическая и горнорудная промышленность.* – 2012. – № 6 (277). – С. 23-27.
3. *Николаев, В. А.* Теория прокатки [Текст] / В. А. Николаев. – Запорожье : ЗГИА 2007. – 228 с. – Библиогр. : с. 218-224. – ISBN 976-966-7101-86-2.
4. *Грудев, А. П.* Захватывающая способность прокатных валков [Текст] / А. П. Грудев. – М. : «СП Интермет Инжиниринг», 1998. – 283 с. – Библиогр. : с. 274-283. – ISBN 5-89584-012-1.
5. *Николаев, В. А.* Теория и технология прокатки металла [Текст] / В. А. Николаев. – Запорожье : Акцент Инвест-Трейд, 2013. – 232 с. – Библиогр. : с. 211-216. – ISBN 978-966-2602-49-1.
6. *Николаев, В. А.* Исследования параметров, способы и устройства прокатки полос [Текст] / В. А. Николаев. – Запорожье : Акцент Инвест-Трейд, 2012. – 264 с. – Библиогр. : с. 245-260. – ISBN 978-966-2602-14-2.
7. *Железнов, Ю. Д.* Статистические исследования точности тонколистовой прокатки [Текст] / Ю. Д. Железнов, С. Л. Коцарь, А. Г. Абиев. – М. : *Металлургия*, 1974. – 240 с. – Библиогр. : с. 236-239.
8. *Николаев, В. А.* Деформация полосы в непригодных валках с применением переднего натяжения [Текст] / В. А. Николаев, А. А. Васильев // *Производство проката.* – 2013. – № 3. – С. 17-22.

Стаття надійшла до редакції 28.12.2013 р.  
Рецензент, проф. В. В. Чигиринський

Текст даної статті знаходиться на сайті ЗДІА в розділі Наука  
<http://www.zgia.zp.ua>

9.