

УДК 621.77.014 : 621.771.65

Федоринов В. А.
Бобух И. А.
Бобух В. И.
Мацко С. В.

РЕДУЦИРОВАНИЕ ЛИТЫХ СЛЯБОВ ПЕРЕД ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКОЙ ПОЛОС

Использование литых слябов вместо катанных для полосовых станов горячей прокатки вызвало практический интерес к уменьшению типоразмеров литых слябов для широкого спектра проектных типоразмеров полос конкретных станов горячей прокатки.

Сотрудники теперешней кафедры АММА ДГМА были привлечены головной организацией по созданию полосовых прокатных станов Новокузнецким машиностроительным заводом к изучению деформации по ширине слябов в вертикальных валках.

Благодаря этому сотрудничеству, были проведены экспериментальные исследования по изучению особенностей деформации заготовок при последовательной прокатке в вертикальных и горизонтальных валках. На стане 2300/1700 г. п. Челябинского металлургического комбината, в черновой группе стана 2000 г. п. Новоліпецкого металлургического комбината, в черновой группе стана 1700 г. п. металлургического комбината им. Ильича были получены экспериментальные данные, которые позволили получить ряд зависимостей описывающих указанные выше особенности [1].

Сотрудниками кафедры еще в 1971 г. был предложен способ прокатки [2], при котором слябы прокатываются в вертикальных валках с обжатием по ширине, а затем в специальных горизонтальных валках с ребордами с обжатием утолщенных кромок до первоначальной толщины без свободного уширения и последующим обжатием в горизонтальных валках с обжатием по толщине.

В силу объективных и субъективных причин указанный способ прокатки не получил дальнейшего развития. К объективным причинам относится отсутствие в то время соответствующих программ и быстродействующих вычислительных машин. Вопросы редуцирования слябов по ширине требовали накопления научного задела и методик расчета для реализации в промышленных условиях. Появились работы, в которых в той или иной мере решались поставленные задачи [3–6].

С другой стороны появились технические решения, направленные на реализацию полученного научного задела. В способе редуцирования слябов по ширине [7], включающего прокатку сляба с регламентированным обжатием в вертикальных валках, определяемых по математическим зависимостям с учетом обжатий в валках последующей универсальной клетки, имеется возможность по математическим моделям найти оптимальные режимы обжатий, обеспечивающие максимально возможное редуцирование по ширине. Однако рекомендации по величине обжатия в первой вертикальной клетке $\Delta b_{b1} = 160$ мм, а во второй клетке $\Delta b_{b2} = 220$ мм при толщине сляба перед первой клетью $h_{01} = 250$ мм, а второй $h_{02} = 200$ мм, противоречит принципу: эффективность обжатий вертикальными валками уменьшается по мере уменьшения толщины раската перед вертикальными валками. В противном случае имеет место увеличение силовых параметров при редуцировании исходных слябов на требуемую ширину раскатов. Поэтому с точки зрения экономии энергозатрат более приемлемым является способ, предложенный в техническом решении [2]. В работе [8] отмечено, что эффективность редуцирования зависит от формы и параметров калибров вертикальных валков.

Целью работы является исследование процесса редуцирования литых слябов толщиной 200...250 мм.

Хорошо известны вертикальные валки для деформирования боковых граней как катанных, так и непрерывнолитых слябов определенной толщины.

Для расширения сортамента прокатываемых слябов по толщине [9] на рабочем участке калибров (дну калибров) выполняют проточку шириной (0,6...0,7) длины рабочего участка, глубиной 0,015 радиуса вала, что позволяет центрировать сляб относительно рабочего участка и препятствует лыжеобразованию на переднем конце раската и исключает скручивание раската при интенсивных обжатиях. Использование технического решения [9] в условиях металлургического комбината «Северсталь» подтверждает его эффективность. Выполнение среднего участка калибра выпуклым, плавно сопряженным со смежными вогнутыми участками [10], не привело к существенным положительным результатам из-за быстрого износа выпуклого участка и необходимости частых перевалок вертикальных валков для их переточки.

Установлено [1, 3–6], что при прокатке полос в вертикальных валках развивается значительное приконтактное уширение (утолщение). При последующей прокатке в горизонтальных валках в очаг деформации сначала попадают зоны развитого утолщения (у боковых кромок полосы). При этом большая часть объема утолщений идет в уширение, так как течению металла в направлении прокатки препятствует объем основного металла, который находится еще вне зоны деформации. С другой стороны [8] эффективного решения с калиброванными вертикальными валками тоже не существует. Но самое главное, что до настоящего времени не существует теоретического решения, описывающего профиль деформируемого металла в калибрах вертикальных валков.

Существует альтернативное решение по использованию обжимного пресса для редуцирования слябов по ширине [11]. Выполнена модернизация полосового стана 1730 г. п. № 1 фирмы «China Steel» с установкой пресса для обжатия слябов по ширине перед первой черновой клетью вместо старого вертикального окалиноломателя. Было установлено следующее новое механическое оборудование на участке черновых клетей:

- основное оборудование пресса с подающими и прижимными роликами;
- устройство удаления окалины на входе в черновые клетки;
- входной рольганг пресса для калибровки слябов с устройством подъема стола;
- выходной рольганг пресса;
- входное устройство пресса;
- входные боковые проводки первой черновой клетки;
- входные и выходные боковые гидравлические проводки второй черновой клетки;
- входные центрирующие устройства третьей и четвертой черновых клетей.

Основные характеристики пресса: максимальное обжатие 350 мм; скорость транспортировки слябов при их обжатии на прессе 0,3 м/с; максимальное усилие 2200 т; мощность основного двигателя 3400 кВт.

Оборудование было поставлено в течение 14 месяцев. Время дополнительного простоя стана (помимо обычного простоя для технического обслуживания) составило 24 дня.

Число типоразмеров по ширине различных слябов, заказываемых на установке непрерывной разливки стали, уменьшилось с 19 до 7. Эффективность установки непрерывной разливки стали значительно повысилась, так как 85 % используемых ранее литых слябов имело ширину 1050, 1270/1280 и 1420 мм. Частота смены кристаллизатора значительно уменьшилась. В результате годовая экономия составила примерно 2 млн. долл.

Видим, что кроме пресса в состав прокатного стана включается целый ряд оборудования, установка которого повышает расходы на реконструкцию и эксплуатацию, а скорость транспортировки слябов при обжатии на прессе уменьшается до 0,3 м/с.

Редуцирование слябов по ширине в прокатных валках необходимо решать в направлении исключения эффекта дополнительного уширения при прокатке в горизонтальных валках [2] и поиска оптимальной глубины калибров.

Анализ ряда зависимостей [12] показал, что наиболее точно профиль полосы можно описать с помощью зависимости вида:

$$\gamma = 1/ax^2 - bx + C, \quad (1)$$

где x – координата, характеризующая текущую ширину полосы B_x ;

γ – половина величины уширения (поперечной деформации) металла в соответствующем продольном сечении;

a, b, C – положительные коэффициенты, определяемые из начальных условий.

В наших расчетах ось x совмещалась с горизонтальной гранью исходной полосы, ось y – с контактной поверхностью металла (рис. 1), причем координата x определялась как относительная величина $x = B_x / B_1$ так, что на контактной поверхности $x = 0$, а на центральной продольной оси полосы $x = 1$. В этом случае начальные условия могут быть записаны в виде:

$$\gamma|_{x=0} = \Delta b_K / 2; \quad (2)$$

$$\gamma|_{x=x_M} = \Delta b_M / 2; \quad (3)$$

$$\gamma|_{x=\alpha_X} = \Delta b_{\Pi} / 2. \quad (4)$$

Причем величина x_M (рис. 1), характеризующая линии положения максимального уширения Δb_M , находится в соответствии с зависимостью (1) по формуле:

$$x_M = b / 2a. \quad (5)$$

Из начального условия (2) и с учетом зависимости (1) непосредственно получим:

$$C = 2 / \Delta b_K, \quad (6)$$

$$\text{где} \quad \Delta b_K = [0.35 + 0.18(h_0 / l - 1.3)] \cdot \Delta b_b, [1]; \quad (7)$$

Δb_b – обжатие в вертикальных валках, мм;

l – длина дуги захвата вертикальных валков, мм.

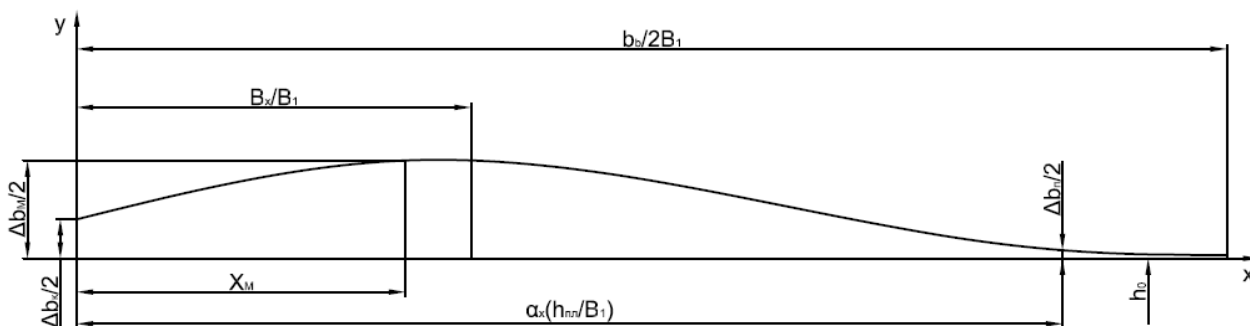


Рис. 1. Профиль боковой поверхности сляба при обжатии в вертикальных валках

На основании условий (3) и (4) получим систему уравнений, решение которой дает:

$$b = 2 \left(\alpha_b \cdot \alpha_2 + \sqrt{(\alpha_b \cdot \alpha_2)^2 + \alpha_b \cdot \alpha_1} \right); \quad (8)$$

$$a = b^2 / 4\alpha_b, \quad (9)$$

причем для упрощения записи введены обозначения:

$$\alpha_b = 2 / \Delta b_K - 2 / \Delta b_M = 0,666 / 2 / \Delta b_M, \quad (10)$$

$$\text{где} \quad \Delta b_M = \Delta b_K / 0,6. \quad (11)$$

Зависимость (11) действительна в диапазоне параметров прокатки вертикальных валков с калибрами при температуре прокатки 1120...1220 °С:

$$\alpha_1 = \frac{1}{\alpha_x^2} \cdot \left(\frac{2}{\Delta b_{\Pi}} - \frac{2}{\Delta b_K} \right), \quad (12)$$

где Δb_{Π} – приращение толщины сляба на глубине проникновения пластической деформации $h_{\Pi\Lambda}$.

Величину $h_{\Pi\Lambda}$ можно определять по данным, приведенным в работе [1], или по следующей формуле:

$$h_{\Pi\Lambda} = 1.68 \left(\frac{l}{b_{CP}} \right)^2 \left[2.5 + 6 \left(\frac{h_0}{l} - 0.7 \right) \right] \frac{b_b}{2}, \quad (13)$$

где b_b – раcтвор вертикальных валков, мм.

$$\alpha_2 = 1/\alpha_x, \quad (14)$$

где α_x – численно равен выражению перед $b_b/2$ или:

$$\alpha_x = 2h_{\Pi\Lambda} / b_b. \quad (15)$$

На Украине находятся в эксплуатации два полосовых стана горячей прокатки с широким диапазоном сортамента выпускаемого проката. В связи с переходом станом 1700 г. п. и 1680 г. п. на использование литых слябов остро стоит задача установки перед черновой группой этих станом агрегата, редуцирующего слябы по ширине. Высота существующих станом пролетов не позволяет устанавливать отдельно стоящие вертикальные клетки достаточной обжимной способности.

В работе, с учетом особенностей деформации литых слябов по ширине и последующей прокатке в горизонтальных валках специальной конструкции и реверсивной прокатке в горизонтальных и вертикальных валках, рассматривается способ редуцирования литых слябов толщиной 200...250 мм усредненной ширины 1500 мм на величину 300...360 мм.

Учитывая опыт проектирования калибров вертикальных валков, пути повышения эффективности реборд горизонтальных валков и обжимную способность бочек горизонтальных валков, выбираем предварительно следующие параметры валков, представленные в табл. 1. Основные допущения, принятые при создании математической модели редуцирования, обоснованные сопоставлением теоретических и расчетных данных с экспериментальными:

1. При прокатке слябов в калибрах вертикальных валков в зависимости для определения вытяжки центрального слоя (шириной $0,1 b_0$), полученную на основе обработки экспериментальных данных при $l/b_{CP} = 0,1...0,2$ и $h_0/l = 0,7...2,4$ имеющую вид $\lambda_0 = 1,01 = 0,2(l/b_{CP} - 0,1)$ величину l необходимо определять с учетом прилипания части металла в калибре вертикальных валков, т. е. наличия в очаге деформации зоны металла, движущейся с одинаковой угловой скоростью вертикального валка, т. е.:

$$l_{\text{ВВ}} = \sqrt{\Delta b_b \cdot \frac{D_k + x_M \cdot b_B}{2}}. \quad (16)$$

Например, при $\Delta b_B = 120$ мм и $\frac{D_k}{2} = 600$:

$$l'_{\text{ВВ}} = \sqrt{120 \cdot 600} = 268,33 \text{ мм}; \quad l' / b_{CP} = \frac{268,33}{1440} = 0,1863.$$

Таблица 1

Параметры валков

Параметры	Формула	Толщина сляба 200 мм	Толщина сляба 250 мм	Примечание
Катающая поверхность, мм.	$D_K \cdot b_K = h_0 + \Delta$ $\Delta = 3 / \alpha_x$	1200 208 8	1200 256 6	α_x – коэф. глубины пластич. деф.
Глубина калибра, мм	$t = (0,48...0,60)h_0$	120	120	
Угол выпуска калибра, град.	$\varphi = \frac{2 \cdot 0,66\Delta}{x_M \cdot b_b}$	$\varphi = 1,57^0$ $tg \varphi = 0,0275$	$\varphi = 1,57^0$ $tg \varphi = 0,0275$	x_M – относит. расстояние от кромки до сеч. макс. толщины
Угол выпуска калибров реборд, град.	γ^0	$\gamma = 1^0$ $tg \gamma = 0,017455$	$\gamma = 1^0$ $tg \gamma = 0,01745$	
Длина образующих реборд, мм	t_p	360	360	
Катающий диаметр реборд, мм	D_Γ	1200	1200	
Катающий диаметр бочки, мм	D_δ	1209,5	1215,0	
Радиус реборд горизонт. валков, мм	R_p	693	710	

С учетом $x_M = 0,1396$ при $b_b = (1500 - 120) = 1380$.

$$l_{b,b} = \sqrt{120 \cdot \frac{1200 + 0,1396 \cdot 1380}{2}} = \sqrt{120 \cdot 696,3} = 289 \text{ мм}, \quad \frac{l}{b_{CP}} = 0,2.$$

2. Поскольку относительная величина x_M определяет расстояние от кромки сляба до максимальной толщины приконтактной зоны и равна глубине заполнения калибров вертикальных валков металлом, то величина $(D_K + x_M \cdot b_B) / 2$ является приведенным катающим радиусом вертикальных валков с калибрами. Величина приведенного катающего радиуса учитывается при определении глубины проникновения пластической деформации ($h_{ПД}$), при прокатке в калибрах вертикальных валках для вычисления площади деформируемого металла (F_0) и площади металла после деформации (F_1) в приконтактной зоне.

3. Коэффициент удлинения приконтактных слоев при прокатке в вертикальных валках равен соответственно:

$$\lambda_{KBV} = F_{K0} / F_{K1}, \quad (17)$$

где F_{K0} – площадь металла до деформации на глубине $\Delta b_b / 2 + h_{нл}$;

F_{K1} – площадь металла после деформации на глубине $h_{нл}$.

4. Удлинение приконтактных слоев при прокатке в ребордах горизонтальных валков равно:

$$\lambda_{KP} = F_{KP0} / F_{KP1}, \quad (18)$$

где F_{KP0} – площадь металла до деформации на ширине t_{PO} ;

F_{KP1} – площадь металла после деформации на ширине t_{PO} .

5. Ширина деформируемого металла в ребордах горизонтальных валков определяется как расстояние от боковой кромки раската до точки, где деформация металла по высоте равна 0, т. е. $\Delta h_{\Gamma P} = 0$.

6. Удлинение срединных слоев редуцируемых слябов при обжатии бочкой горизонтальных валков:

$$\lambda_{ОВ} = h_{0i} / h_{1i}. \quad (19)$$

В соответствии с выбранными параметрами вертикальных калиброванных валков и горизонтальных валков с краевыми ребрами и центральной катающей бочкой, а так же принятыми и обоснованными допущениями, произведены расчеты и получены результаты по редуцированию литых слябов исходной шириной 1500 мм и двумя наиболее вероятными толщинами слябов 200 и 250 мм.

Анализ полученных результатов показал, что за три пропуска в редуцирующем агрегате в двух прямых и одном реверсивном изменение ширины составляет 360 мм. Коэффициенты вытяжки характерных участков по пропускам и валкам представлены в табл. 2.

Таблица 2

Коэффициенты вытяжки

Протяжки		Вертикальные валки		Горизонтальные валки		Ширина раската	Примечание
		Вытяжка центральной зоны	Вытяжка прикромочных слоев	Вытяжка прикромочной зоны	Вытяжка центральной зоны бочки		
Δb_b	№	$\lambda_{ВО}$	$\lambda_{ВК}$	$\lambda_{ГК}$	$\lambda_{ГО}$	b_b	
При толщине сляба $h_0 = 200$ мм							
120	1	1,03	1,13	1,0415	1,05	1380	
120	2	1,03	1,0	1,01	1,013	(1260)	после вертик. валков
120	3	1,038	1,064	1,038	1,0	1140	
При толщине сляба $h_0 = 250$ мм							
120	1	1,0304	1,13	1,0275	1,073	1380	
120	2	1,031	1,0	1,002	1,009	(1260)	после вертик. валков
120	3	1,039	1,16	1,0324	1,022	1140	

Данные по величине коэффициентов вытяжек прикромочных участков на глубину $h_{ПЛ}$ и срединных слоев раскатов равны соответственно: для сляба толщиной 200 мм накопленная величина коэффициентов вытяжек прикромочных слоев равна:

$$\lambda_{К200} = \lambda_{ВК1} \cdot \lambda_{ВК2} \cdot \lambda_{ВК3} \cdot \lambda_{ГК1} \cdot \lambda_{ГК2} \cdot \lambda_{ГК3} = 1,31,$$

а накопленная величина коэффициентов вытяжки центральной зоны равна:

$$\lambda_{0200} = \lambda_{В01} \cdot \lambda_{В02} \cdot \lambda_{В03} \cdot \lambda_{Г01} \cdot \lambda_{Г02} \cdot \lambda_{Г03} = 1,17.$$

Аналогично для сляба толщиной 250 мм:

$$\lambda_{К250} = 1,37; \lambda_{0250} = 1,18.$$

При этом для исходного сляба $h_0 = 200$ мм, толщина по кромке составляет 198 мм, а максимальная толщина $b = 206,36$ мм находится от кромки на расстоянии 240 мм ($1,2h_0$), а для сляба $h_0 = 250$ мм, толщина раската по кромке составляет 243,8 мм, а максимальная толщина $b = 256,4$ мм находится от кромки на расстоянии 360 мм ($1,44h_0$), что исключает дополнительное уширение (кроме естественного) при обжатии в последующих горизонтальных валках черновой группы стана.

Усредненные коэффициенты вытяжки при редуцировании исходных слябов с учетом реальной площади раската после редуцирования в 3-х пропусках равны соответственно, для слябов толщиной $h_0 = 200$ мм и слябов $h_0 = 250$ мм:

$$\lambda_{CP200} = 1,32, \lambda_{CP250} = 1,328.$$

ВЫВОДЫ

Предложена расчетная схема поперечной деформации слябов на основе сопоставленных теоретических и экспериментальных данных. На основе расчетной схемы определены параметры калибров при обжатии слябов толщиной 200 мм и 250 мм по ширине на 120 мм за пропуск. Показано, что за три пропуска редуцирование слябов начальной шириной 1500 мм составляет 360 мм, что служит основанием для выполнения проектного предложения установки редуцирующих агрегатов для полосовых станов горячей прокатки Украины.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пономарев В. И. *Металлургическое оборудование* / В. И. Пономарев, В. Ф. Потапкин, И. А. Бобух // *НИИинформтяжмаш*. – 1977. – № 21. – С. 14.
2. А. с. 418232 СССР В21в 1/38 / В. Ф. Потапкин, И. А. Бобух. – № 1629013/22-2; заявл. 01.03.1971; опубл. 05.03.1974, Бюл. № 1.
3. Бобух И. А. *Исследование течения металла при прокатке широких полос в вертикальных валках* / И. А. Бобух, В. И. Пономарев, Л. М. Белкин // *Металлургия и коксохимия. Обработка металлов давлением*. – Киев: Техника, 1983. – Вып. 80. – С. 48–54.
4. *Загрузка клетей с вертикальными валками стана 2000 Череповецкого металлургического комбината* / Пономарев В. И., Набатов Г. И., Тишков В. Я. и др. // *Прокатка широкополосной стали*. – М.: Металлургия, (МЧМ СССР) 1985. – С. 30–33.
5. *Методика расчета параметров наплывов и приведенной толщины раската при деформации в вертикальных валках* / Коновалов Ю. В., Руденко Е. А., Бобух И. А. и др. // *Известия вузов. Черная металлургия*. – 1991. – № 2. – С. 31–34.
6. Коновалов Ю. В. / *К расчету настройки горизонтальных валков* / Ю. В. Коновалов, Е. А. Руденко, И. А. Бобух // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 1991. – № 4. – С. 3–5.
7. А. с. 1799648 СССР, МКИ В 21 В 1/26. *Способ редуцирования слябов по ширине* / В. В. Орубцев, А. Л. Остапенко, О. Е. Таллер, И. А. Бобух и др. – №4871969 / 27; заявл. 05.10.90; опубл. 07.03.93, Бюл. № 9.
8. Чижиков Ю. М. *Редуцирование и прокатка металла непрерывной разливки* / Ю. М. Чижиков. – М.: Металлургия, 1974. – 382 с.
9. А. с. 1091954 СССР, МКИ В 21 В 27/02. *Комплект вертикальных валков* / Ю. В. Коновалов, А. Л. Остапенко, В. В. Орубцев и др. – № 3585255 / 22-02; заявл. 27.04.83; опубл. 15.05.84, Бюл. № 18.
10. А. с. 1708458 СССР, МКИ В 21 В 27/02. *Прокатный валок вертикальной клетки* / В. В. Орубцев, Е. А. Руденко, И. А. Бобух и др. – № 4758541 / -02; заявл. 14.11.89; опубл. 30.01.92, Бюл. № 4.
11. *Проект модернизации полосового стана горячей прокатки № 1на фирме «China Steel» с обеспечением калибровки слябов, охлаждения и смотки полос / под ред. А. В. Зиновьева // Новости черной металлургии за рубежом*. – 2008. – № 1. – С. 44–46. – (Источник: *Pressing, Cooling and Cooling – China Steel HSM №1major Upgrade Project* / W. Pilipczyk, Chen-Hua Lin // *Iron and Steel Technology*. – 2007. – № 5. – P. 301–311).
12. Блантер М. Е. *Методика исследования металлов и обработки опытных данных* / М. Е. Блантер. – М.: Металлургиздат, 1952. – 444 с.

Федоринов В. А. – канд. техн. наук, проф. кафедры АММ ДГМА;

Бобух И. А. – доц. кафедры АММ ДГМА;

Бобух В. И. – нач. отдела ЗАО «НКМЗ»;

Мацко С. В. – нач. цеха ОАО «Запорожсталь».

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск;

ЗАО «НКМЗ» – ЗАО «Новокраматорский машиностроительный завод», г. Краматорск.

E-mail: amm@dgma.donetsk.ua