

## Профилирование рабочих валков для уменьшения поперечной разнотолщинности полос

В статье показано, что поперечная разнотолщинность образуется на основной части ширины полосы и на кромочных участках, а утонение кромки составляет большую часть общей поперечной разнотолщинности полосы, что приводит к повышению напряжений растяжения на кромках и порыву полос по кромкам. На основе экспериментальных данных предложен рабочий валок клетки кварто с переменной кривизной по длине образующей бочки, обеспечивающий уменьшение поперечной разнотолщинности полос. Ил. 3. Библиогр.: 9 назв.

**Ключевые слова:** рабочий валок, полоса, поперечная разнотолщинность, кромка, профиль

The article shows that transversal thickness variation appears on the basic part of a strip and on the edge areas, and edge drop makes greater part of general transversal thickness variation of a strip, that results in the increase of tensions on edges and break of strips on edges. On the basis of experimental data the working roller of cage of quarto with variable curvature on length of formative barrel, providing diminishing of transversal thickness variation of strips is offered.

**Keywords:** working roller, bar, transversal thickness variation, edge, profile

### Введение

В настоящее время наряду со станочным профилированием рабочих валков, как базового для получения качественного поперечного профиля полос, используют различные динамические способы регулирования формы межвалкового зазора (противоизгиб рабочих валков, осевой сдвиг рабочих валков, перекрещивание верхней и нижней пар валков клетки кварто). Однако указанные современные способы и устройства обеспечивают регулирование формы межвалкового зазора на основной ширине полосы, за исключением кромочных участков шириной  $b/2 = 30-40$  мм (рис. 1).

На кромочных участках толщина полосы формируется не только общим прогибом валкового комплекта, но и изменением упругих радиальных деформаций рабочих валков, наличие которых влияет на характер изменения толщины полосы. В связи с этим разнотолщинность полосы по ширине измеряют относительно точек, расположенных на расстоянии 40 мм от кромок полосы.

### Основная часть исследований

Рассмотрим взаимодействие цилиндрических валков и полосы в клетке кварто (см. рис. 1). В процессе прокатки под действием силы  $P$  происходит изгиб опорного валка по линии 4. Совместно с собственным прогибом рабочего валка (линия 5), вследствие неравномерного распределения межвалковых погонных сил, формируется форма поперечного профиля 7 на основной ширине полосы [1]. Кроме того, профиль 7 образующей формируется поперечной разнотолщинностью исходной полосы и, следовательно, неравномерностью распределения обжатий и погонных сил по ширине полосы [2-5].

Как видно на рис. 2 [3, 4], прогиб рабочих валков носит параболический характер (кривая 1) с макси-

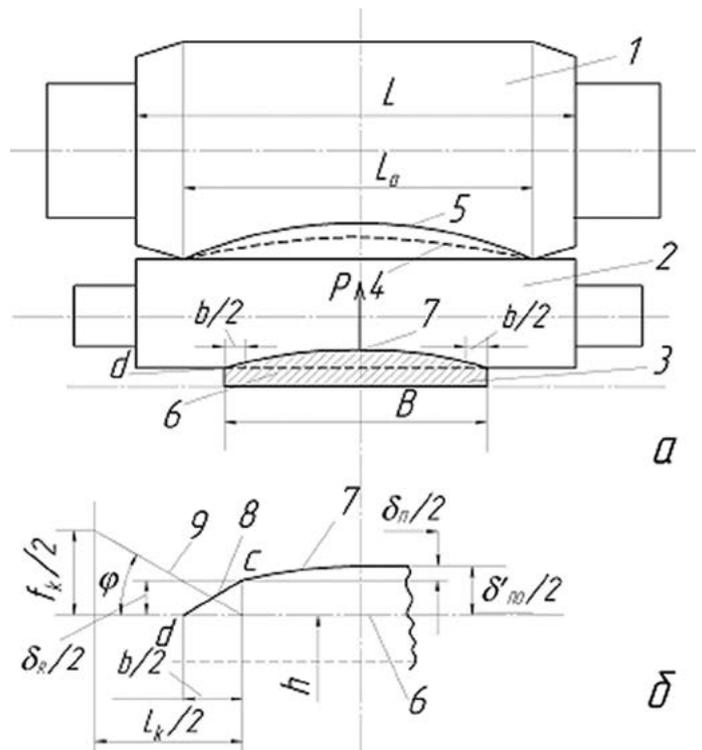
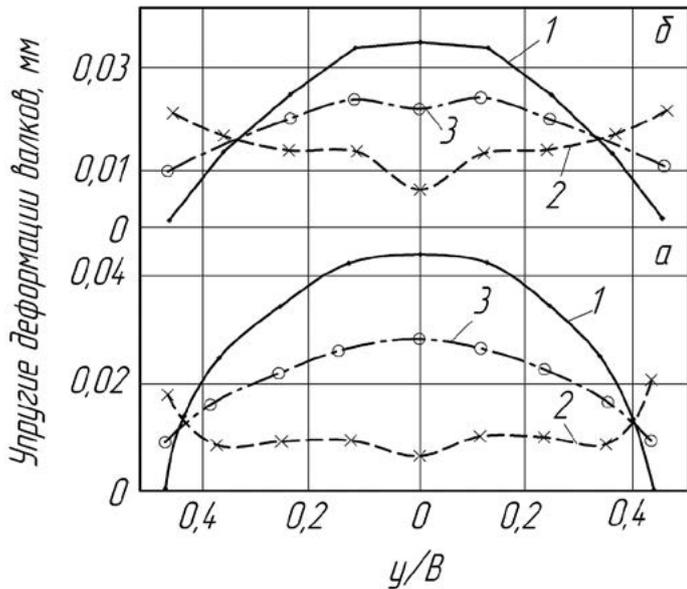


Рис. 1. Взаимодействие рабочего и опорного валков (а) и формирование кромки полосы (б): 1 – опорный валок; 2 – рабочий валок; 3 – полоса; 4 – линия прогиба опорного валка; 5 – линия собственного прогиба рабочего валка; 6 – шлифованный (исходный) профиль бочки рабочего валка; 7 – образующая поперечного профиля полосы; 8 – профиль полосы на кромке; 9 – профиль образующей на концевом участке рабочего валка

мальной величиной прогиба по оси полосы, но радиальная упругая деформация валков минимальна по оси и максимальна на краях полосы ( $y / B = 0,45$ , где  $B$  – ширина полосы;  $y$  – расстояние от оси полосы) (кривая 2). Такой характер изменения радиальной деформации обусловлен неравномерностью обжатий по ширине полосы и свидетельствует о больших обжатиях полосы на краевых участках, чем в середине ширины. Увеличение радиальных деформаций валков от середины полосы к краям коррелируется с характером изменения на участке  $y / B = 0-0,45$  средних нормальных контактных напряжений (СНКН) при прокатке широких полос [6, 7].



**Рис. 2. Прогиб (1), радиальное упругое сжатие (2) валков в контакте с полосой и активная образующая (3) одного валка при прокатке составных образцов на стане 1 в рабочих валках с цилиндрическим профилем: а –  $H = 1,84$  мм,  $\varepsilon = 4,8$  %,  $B = 200$  мм,  $P = 63,2$  кН; б –  $1,88$  мм,  $\varepsilon = 10,0$  %,  $B = 260$  мм,  $P = 71,8$  кН**

В соответствии с данными [6, 7], на участке  $y / B \approx 0-0,4$  имеет место увеличение средних нормальных контактных напряжений  $p_{cp}$  (СНКН), но затем следует резкое уменьшение СНКН в направлении к краям полосы. Анализ экспериментальных данных [6, 7] показывает, что на кромке (при  $y / B = 0,5$ ) СНКН примерно равно напряжению течения металла после деформации, т. е.  $p_{cp} \approx \sigma_{T1}$  ( $\sigma_{T1}$  – напряжение течения металла после деформации).

Таким образом, данные рис. 2 и результаты исследований [6, 7] свидетельствуют о том, что поперечная разнотолщинность полосы на основной части ширины полосы ( $2y / B \approx 0,9$ ) формируется активной образующей бочек валков (см. рис. 2, кривая 3), являющейся алгебраической суммой прогиба валков и их радиальной упругой деформацией, а толщина кромки полосы на ширине  $\sim 40$  мм формируется уменьшением среднего нормального контактного напряжения и радиальной упругой деформацией валков. При этом толщина кромки уменьшается пропорционально уменьшению радиальной деформации валка  $\delta_R$  между точками контакта «с» и «d» (см. рис. 1). В точке

«d» радиальная деформация  $\delta_R = 0$ , обжатие кромки максимально, а толщина полосы минимальна. В соответствии с экспериментальными данными при холодной прокатке полос шириной  $B = 1\,000 - 1\,400$  мм при общей их поперечной разнотолщинности  $\delta_{по} = 0,02-0,1$  мм [8] (относительно точки, расположенной на расстоянии  $\sim 5-15$  мм от кромки) величина  $\delta_R$  составляла  $\delta_R \approx 0,01-0,08$  мм (меньшая величина на широких полосах). То есть утонение самой кромки составляет большую часть общей поперечной разнотолщинности полосы, а это приводит к повышению напряжений растяжения на кромках и порыву полос по кромкам.

Следовательно, допустимое увеличение толщины кромки ( $\delta_R > 0,08$  мм) позволяет сократить вероятность порыва полос и, очевидно, улучшит условия отжига полос в одностопных печах, т.е. когда толщина полосы на кромке в соответствующих точках ( $h_d$ ) и ( $h_c$ ) будет примерно одинакова (где  $h_d$  и  $h_c$  – толщина полосы соответственно в точках d и c).

Локальное утонение кромок полосы не представляется возможным устранить путем использования выпуклой профилировки рабочих валков или известными динамическими способами регулирования межвалкового зазора. На наш взгляд, утонение кромок полосы на ширине «b / 2» ( $\sim 40$  мм) можно устранить (или уменьшить), применив специальную профилировку бочки хотя бы одного рабочего валка. С этой целью краевые участки бочки валка на длине  $L_k / 2$  выполняют с иной кривизной образующей, нежели в средней части бочки. Например, на цилиндрическом рабочем валке краевые участки определенной длины выполняют в виде прямолинейных (параболических) скосов (см. рис. 1, контур 9), наличие которых позволяет уменьшить обжатие полосы на участке «d» и получить толщину в этом сечении в пределах  $h_d \cong h_c$  (см. рис. 16). Параметр  $f_k$  (выпуклость) непосредственно скоса определим из условия

$$tg\varphi = \delta_R / b; \quad L_k = L - B + b; \quad f_k = L_k \cdot tg\varphi, \quad (1)$$

где  $\varphi$  – угол наклона контура 9 (см. рис. 1);  $L_k$  – длина двух скосов на валке.

Расчет длины скосов  $L_k$  упрощается, если на данном стане ширина полосы  $B$  постоянная. Так, для реверсивного стана 1200, при постоянной ширине  $B \approx 1\,000$  мм, при  $b = 80$  мм и  $\delta_R = 0,08$  мм получим:  $tg\varphi = 0,001$ ,  $L_k = 280$  мм и  $f_k = 0,28$  мм. На непрерывном стане холодной прокатки, очевидно, целесообразно применять средневзвешенные значения  $f_k$  и  $L_k$  для групп ширин полос, прокатываемых в межперевалочный период.

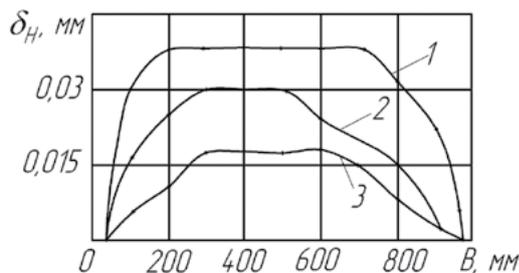
Устранить (уменьшить) краевые утонения также возможно путем осевого сдвига рабочих валков, но при использовании профилировки валков в виде параболы высшего порядка ( $m = 4-6$ ) [2, 8] (где  $m$  – степень параболической зависимости при изготовлении профиля валка) вместо профиля образующей в виде квадратичной параболы ( $m = 2$ ). Вместо профиля образующей валков с  $m = 4-6$  можно использовать

выпукло-цилиндрический профиль, в котором средняя часть длины бочки выполняется с цилиндрическим профилем, а краевые участки – параболической формы [2].

Испытания прокатки полос в рабочих валках с выпукло-цилиндрическим профилем выполнено на реверсивном 20-валковом стане 1700. Рабочие валки имели диаметр 140 мм, прокатывали полосы с размерами 1,0×1 000 мм из горячекатаного подката  $H = 3,8$  мм из стали марки 12X18H10T, масса рулона  $G = 4,2$  т, количество проходов  $n = 11$  [2]. Прокатку выполняли на трех парах валков со следующими характеристиками, мм:

Валки	Серия 1			Серия 2			Серия 3		
	m	f	$L_{ц}$	m	f	$L_{ц}$	m	f	$L_{ц}$
верх	2	0,35	-	> 2	0,35	640	< 2	0,35	640
низ	-	0	-	-	0	-	2	0,1	-

После прокатки и порезки рулонов измеряли толщину листов по их ширине, начиная замеры на расстоянии 40 мм и затем через каждые 100 мм от кромки. Результаты измерений представлены на рис. 3. Как следует из данных, при прокатке полосы в серии 1 с верхним выпуклым  $f_B = 0,35$  мм и нижним цилиндрическим валками поперечная разнотолщинность составила  $\delta_h \approx 0,038$  мм (кривая 1). При такой профилировке валков на расстоянии 100 мм от кромки, толщина полосы увеличилась на 0,022-0,03 мм. То есть, основная доля приращения толщины полосы произошла на краевом участке ширины полосы, равном 100 мм. Мы полагаем, что существенное уменьшение толщины полосы на кромке явилось следствием уменьшения радиальной упругой деформации рабочих валков. При такой же выпуклости верхнего валка, но с цилиндрическим участком  $L_{ц} = 640$  мм в середине длины бочки верхнего валка при  $L_{к} / 2 = 530$  мм общая поперечная разнотолщинность листа уменьшилась до  $\delta_h = 0,03$  мм, т. е. на ~ 20 % за счет уменьшения упругих деформаций краевых участков валков (кривая 2). Применение в этом комплекте нижнего рабочего валка с выпуклостью  $f_H = 0,1$  мм позволяет уменьшить поперечную разнотолщинность листов до  $\delta_h < 0,02$  мм (кривая 3). При этом на ширине 100 мм от кромки толщина полосы увеличивается всего лишь на ~ 0,004-0,006 мм, что существенно меньше, чем при использовании профилировки первого типа.



**Рис. 3. Поперечные профили холоднокатаной полосы толщиной 1 мм и шириной  $B = 1000$  мм из стали 12X18H10T:** 1 –  $f_{p,B} = 0,35$  мм,  $m = 2$ ,  $f_{p,H} = 0$ ; 2 –  $f_{p,B} = 0,35$  мм,  $m > 2$  ( $L_{ц} = 640$  мм); 3 –  $f_{p,B} = 0,35$  мм,  $m > 2$  ( $L_{ц} = 640$  мм),  $f_{p,H} = 0,1$  мм,  $m = 2$  мм

## Выводы

Выполнен анализ влияния профилировки рабочих валков на утонение кромок полосы на ширине 40-100 мм. Обоснована необходимость применения образующей бочки рабочего валка с переменной кривизной и с локальным уменьшением диаметра валка на участках, соответствующих кромкам полосы. Выполненные эксперименты при прокатке полос с различными формами образующих рабочих валков подтверждают целесообразность применения предлагаемого типа профилировки.

## Библиографический список

1. Полухин П. И., Железнов Ю. Д., Полухин В. П. Тонколистовая прокатка и служба валков. - М.: Металлургия, 1967. - 388 с.
2. Николаев В. А. Профилирование и износостойкость листовых валков. - К.: Техніка, 1992. - 160 с.
3. Николаев В. А. Неравномерность деформации по ширине полосы / В. А. Николаев // Известия вузов. Черная металлургия. - 1989. - № 3. - С. 56-61.
4. Николаев В. А., Ходунов Д. А. Влияние профилировок на упругие деформации листовых валков // Известия вузов. Черная металлургия. - 1989. - № 6. - С. 55-58.
5. Николаев В. А., Жученко С. В. Неравномерность погонных сил по длине валков и полосы // Металл и литье Украины. - 2011. - № 5. - С. 6-9.
6. Чекмарев А. П. О некоторых вопросах теории прокатки // Теория прокатки. Материалы конференции по теоретическим вопросам прокатки. - М.: Металлургиздат, 1962. - С. 31-56.
7. Целиков А. И. Основы теории прокатки. - М.: Металлургия, 1965. - 247 с.
8. Николаев В. А., Путноки А. Ю. Прокатка широкополосной стали. - К.: Освита Украины, 2009. - 268 с.
9. Николаев В. А. Теория прокатки. - Запорожье: ЗГИА, 2007. - 228 с.

Поступила 27.05.2013