

УДК 621.771.

**Сатонин А. В.****Переходченко С. В.****Добронос Ю. К.****Махмудов К. Д.**

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ ЛИСТОВ И ПОЛОС В ВЕРТИКАЛЬНЫХ ВАЛКАХ

Прокатка в вертикальных валках применяется в первых проходах на ряде толстолистовых и широкополосных станов горячей прокатки для снятия уширения, разрушения окалины, а в последнее время и для редуцирования непрерывнолитых слэбов. Для расчета энергосиловых параметров процесса необходимо знать параметры контактной поверхности, которая определяется, в том числе, и величиной уширения. Теоретические исследования процесса прокатки в вертикальных валках проведены рядом авторов [1–3] с использованием большого числа допущений, поэтому экспериментальное уточнение теоретических предположений является актуальной задачей. Кроме того, в настоящее время практически нет данных, на основании которых можно судить о величине пластической деформации, необходимой для взрыхления окалины в вертикальных валках.

Цель работы – уточнение влияния геометрических параметров очага деформации на величину уширения и глубину проникновения пластической деформации при горячей прокатке в вертикальных валках.

Экспериментальные исследования геометрических параметров при горячей прокатке листов и полос в вертикальных валках были проведены путем физического моделирования на лабораторном стане 200/250 ДГМА путем прокатки на ребро образцов прямоугольного сечения в специально разработанных ступенчатых валках с катающим диаметром по участкам в диапазоне от 60 до 150 мм (рис. 1). Масштаб моделирования 1 : 10. В качестве материала образцов выбрали ст. 3 при температуре 1100–1160 °С и свинец при комнатной температуре. Размеры образцов изменялись в пределах:  $H \times B \times L = 12\text{--}40 \times 105\text{--}140 \times 200\text{--}240$  мм, обжатия  $\Delta b_g = 1,5\text{--}10$  мм. Точность замеров  $\pm 0,05$  мм. Было прокатано 50 стальных и 30 свинцовых образцов. Перед прокаткой с части стальных образцов сбивалась окалина, другая часть образцов прокатывалась с окалиной, что дало возможность судить о глубине проникновения интенсивной пластической деформации, достаточной для разрушения окалины. Для исследования распределения пластической деформации по длине и ширине стальных образцов на их боковую поверхность наносили координатную сетку кернами с размерами по узлам  $10 \times 10$  мм. Статистическую обработку экспериментальных результатов производили по общепринятым методикам с использованием стандартного программного пакета.



Рис. 1. Рабочая клетка лабораторного стана 200/250 ДГМА, используемый при физическом моделировании процесса прокатки листов и полос в вертикальных рабочих валках:  
а – общий вид; б – узел валков

При проведении экспериментов фиксировали максимальную толщину контактных слоев  $h_m$  и ширину контактной поверхности  $B_k$ . Обработка результатов измерения по  $h_m$  (рис. 2) позволила определить максимальное абсолютное уширение приконтактных слоев  $\Delta b_m$

$$\Delta b_m = h_m - h_0, \quad (1)$$

где  $h_0$  – исходная толщина раската (начальная ширина очага деформации).

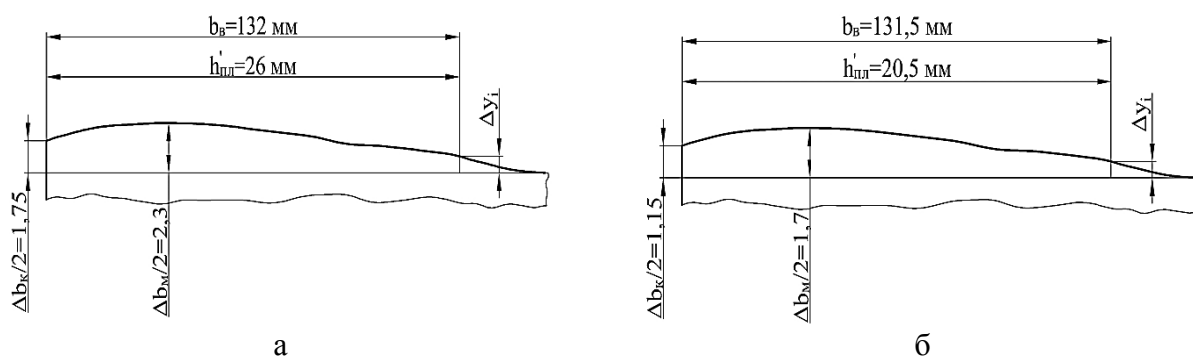


Рис. 2. Типовые замеры прикромочной зоны образца:

а – при  $h_0 = 40$ ;  $b_0 = 140$ ;  $\Delta b_\epsilon = 8$ ;  $D = 100$ ; б – при  $h_0 = 29,9$ ;  $b_0 = 139,3$ ;  $\Delta b_\epsilon = 7,8$ ;  $D = 100$

В результате обработки результатов предложена обобщенная эмпирическая зависимость  $\Delta b_m / \Delta b_\epsilon = f(h_0 / L_\epsilon)$  при  $L_\epsilon / b_{cp} = 0,05 - 0,15$ , позволяющая определить уширение в зависимости от основных геометрических параметров прокатки в исследуемом диапазоне (рис. 3). Аналитически данную зависимость можно аппроксимировать выражением вида:

$$\Delta b_m / \Delta b_\epsilon = 0,4 + 0,35(h_0 / L_\epsilon - 0,5), \quad (2)$$

где  $\Delta b_\epsilon$  – абсолютное обжатие в вертикальных валках,

$L_\epsilon$  – длина дуги контакта при прокатке в вертикальных валках.

Полученная зависимость показывает, что в диапазоне отношений  $h_0 / L_\epsilon = 0,5 - 2,5$  количественная оценка соотношения  $\Delta b_m / \Delta b_\epsilon$  возрастает с увеличением  $h_0 / L_\epsilon$  по закону, близкому к линейному. Увеличение исходной толщины при одних и тех же обжатиях в вертикальных валках приводит к увеличению максимального уширения приконтактных слоев  $\Delta b_m$  (см. рис.2). При постоянной исходной толщине  $h_0$  увеличение обжатия в вертикальных валках  $\Delta b_\epsilon$  вызывает уменьшение  $\Delta b_m$ .

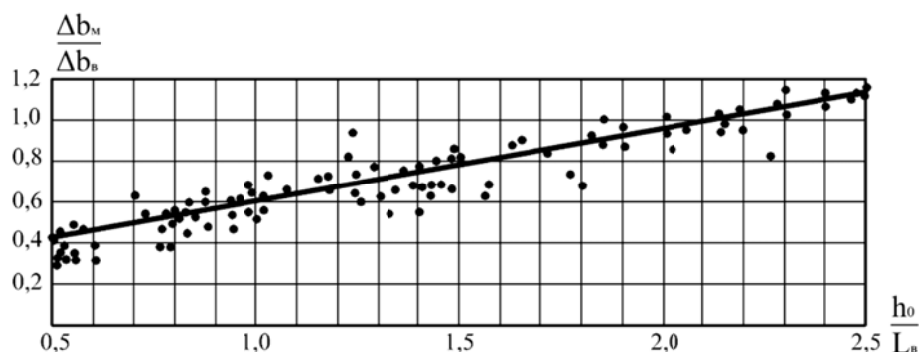


Рис. 3. Зависимость  $\Delta b_m / \Delta b_\epsilon = f(h_0 / L_\epsilon)$  при  $L_\epsilon / b_{cp} = 0,05 - 0,15$

Для определения максимальной относительной деформации  $\epsilon_{ym}$  у приконтактной поверхности использовали зависимость:

$$\epsilon_{ym} = (\Delta b_m / h_0) 100\%. \quad (3)$$

Анализ полученной зависимости показывает, что с уменьшением толщины заготовки при постоянном её обжатии и диаметре валков величина уширения приконтактных слоев возрастает. Особенно интенсивный рост в этом случае наблюдается при  $h_0/L_b < 1$ .

Для расчета силы прокатки, действующей на рабочие валки по известным величинам  $p_{cp}$ , необходимо знать абсолютную величину контактного уширения  $\Delta b_k$ .

В проведенных экспериментах величина  $\Delta b_k$  определялась из очевидного соотношения (4) по замерам ширины контактной поверхности  $B_k$  и  $h_0$

$$\Delta b_k = B_k - h_0 \quad (4)$$

В исследуемом диапазоне  $h_0/L_b$  и  $L_b/b_{cp}$  отношение абсолютной величины контактного уширения  $\Delta b_k$  к абсолютному максимальному уширению приконтактных слоев  $\Delta b_m$  составило 0,75–0,65, а ее средневзвешенная величина равна:

$$\Delta b_k = 0,67 \Delta b_m. \quad (5)$$

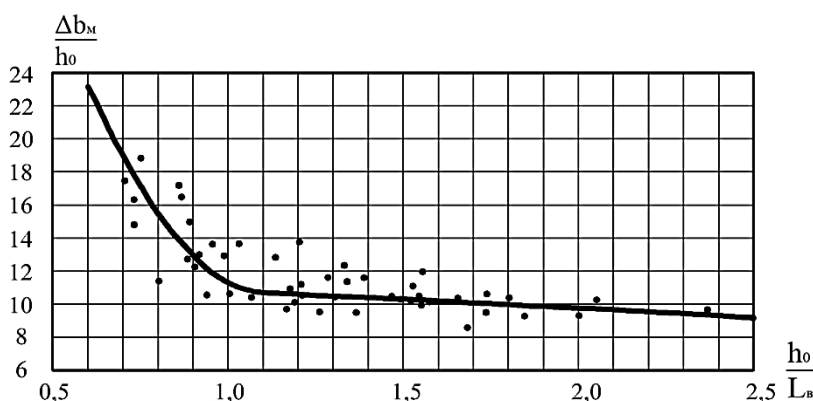


Рис. 4. Зависимость  $\Delta b_m/h_0 = f(h_0/L_b)$  при  $L_b/b_{cp} = 0,06–0,18$ ,  $t = 1120–1220$  °С полученная при прокатке стальных образцов

Тогда зависимость для определения контактного уширения имеет вид:

$$\Delta b_k/\Delta b_m = 0,36 + 0,18(h_0/L_b - 1,3) \quad (6)$$

Несмотря на широкое использование в современных станах гидросбива для удаления окалины, на большом числе станов все еще используются вертикальные окалиноломатели [4, 5]. Однако практически нет данных, на основании которых можно судить о величине пластической деформации, необходимой для взрыхления окалины.

Для определения величины пластической деформации, обеспечивающей взрыхление окалины, достаточное для её удаления, в лабораторных условиях образцы, нагретые до температуры 1120–1160 °С, были прокатаны в валках диаметром 100 мм с обжатием по боковым кромкам (имитация прокатки в вертикальных валках). Затем с охлажденных образцов были сняты размеры координатной сетки и зафиксирован профиль. После этого образцы снова нагревали и прокатывали в горизонтальных валках без обжатия металла в центральной зоне. При этом обжатие получали только приконтактные слои, которые после прокатки в вертикальных валках имели уширение (утолщение). Обработка данных по  $\varepsilon_y$  и сравнение глубины взрыхления окалины, показала, что для её удаления, необходима деформация  $\varepsilon_y > 2,5\%$ .

На основе экспериментальных данных получена зависимость для определения относительной глубины проникновения пластической деформации  $2h_{nl}/b_s$  достаточной для взрыхления окалины, которую с точностью до 10 % можно аппроксимировать выражениями вида:

$$\begin{aligned} 2h_{nl}/b_s &= (L_b/b_{cp} - 0,05)[(2,5 + 6)h_0/L_b - 0,7]; \\ L_b/b_{cp} &= 0,07 \dots 0,2; \quad h_0/L_b = 0,7 \dots 0,2, \end{aligned} \quad (7)$$

где  $b_{cp}$  – средняя ширина полосы в очаге деформации в вертикальных рабочих валках, мм;  
 $b_g$  – раствор вертикальных рабочих валков, мм;  
 $h_{nl}$  – глубина проникновения пластической деформации, достаточной для взрыхления окалины, мм.

При проведении лабораторных опытов производили определение также и средней по высоте очага деформации относительной деформации слоев металла в направлении оси X (рис. 6), определяемой как

$$\varepsilon_{xcc} = (\Delta b_g / b_0) 100\%. \quad (8)$$

На основании обработки результатов экспериментальных данных получены графические зависимости  $\varepsilon_{xi} = f(L_b / b_{cp})$  при значении  $h_0 / L_g = 1,1 - 2,0$  (рис. 6), позволяющие оценить влияние соотношения  $h_0 / L_g$  на величину деформации  $\varepsilon_x$ . В частности, с увеличением данного соотношения, т. е. с увеличением толщины полосы (при постоянном обжатии в вертикальных рабочих валках  $L_g = \sqrt{R\Delta b_g}$ ) растет глубина проникновения пластической деформации по ширине полосы. Аналогичная картина имеет место и при увеличении отношения  $L_b / b_{cp}$ , т. е. с уменьшением ширины прокатываемой полосы.

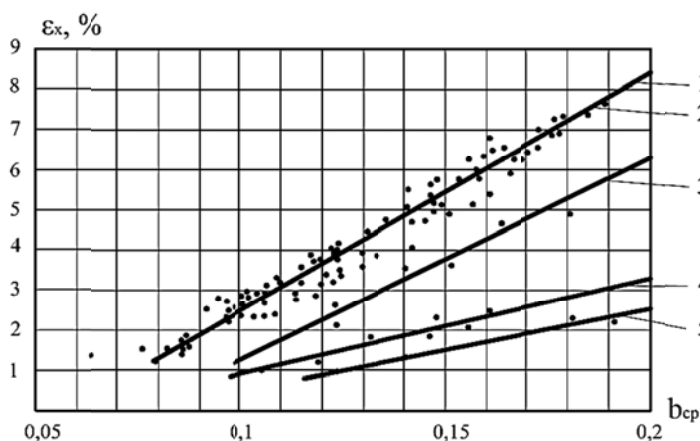


Рис. 6. Эмпирические распределения относительной деформации  $\varepsilon_x$  в зависимости от геометрических параметров очага деформации:

1 –  $\varepsilon_{xcc} = (\Delta b_g / b_0) 100\%$ ; 2 –  $\varepsilon_{x0,4}$  при  $h_0 / L_g = 1,1 - 1,2$ ; 3 –  $\varepsilon_{x0,6}$  при  $h_0 / L_g = 1,4 - 2,0$ ;  
 4 –  $\varepsilon_{x0,8}$  при  $h_0 / L_g = 1,4 - 2,0$ ; 5 –  $\varepsilon_{x0,9}$  при  $h_0 / L_g = 1,1 - 1,2$

Полученные зависимости показывают, что относительные деформации сжатия средних по ширине слоев металла (4, 5, см. рис. 6) в исследуемом диапазоне  $L_b / b_{cp}$ , имеющем место при прокатке в вертикальных рабочих валках черновой группы, достигают величины 2,5 % только при  $L_b / b_{cp} > 0,15 - 0,18$ . Надежного разрушения окалины в средней по ширине полосы части за счет деформации сжатия не будет (при  $L_b / b_{cp} < 0,15 - 0,18$ ). Средние слои металла наряду с деформацией сжатия в направлении ширины получают продольную вытяжку. Как показали опыты, величина относительной продольной деформации средних слоев  $\varepsilon_z$  оказывается несколько больше, чем деформация  $\varepsilon_x$ . Это связано с появлением в средних слоях продольных растягивающих напряжений, которые приводят к «утяжке» средних слоев по толщине (толщина средних слоев металла при прокатке в вертикальных валках уменьшается). За счет этого деформация в продольном направлении  $\varepsilon_z$  возрастает. Однако величина «утяжки» средних слоев (относительная деформация  $\varepsilon_y$ ) невелика и можно, считать, что  $\varepsilon_x = \varepsilon_z$ . Надо отметить, что при одних и тех же значениях  $L_b / b_{cp}$ , с увеличением отношения  $h_0 / L_g$  величина  $\varepsilon_z$  возрастает.

Полученные результаты позволяют дать рекомендации, что для наиболее полного взрывления окалины на современных широкополосных станах с вертикальными валками диаметром 1000–1200 мм необходимо назначать обжатия равными 60–90 мм, при этом наиболее эффективными обжатиями по глубине проникновения интенсивной пластической деформации является обжатие при максимальной толщине сляба, т. е. обжатие в вертикальном окалиноломателе.

### ВЫВОДЫ

1. Зависимость максимального уширения приконтактных слоев  $\Delta b_m$  от геометрических параметров очага деформации носит линейный характер. Увеличение исходной толщины при одних и тех же обжатиях в вертикальных валках приводит к увеличению  $\Delta b_m$ . При постоянной исходной толщине  $h_0$  увеличение обжатия в вертикальных валках  $\Delta b_e$  вызывает уменьшение  $\Delta b_m$ .

2. С уменьшением толщины заготовки при постоянном её обжатии и диаметре валков величина уширения приконтактных слоев возрастает. Особенно интенсивный рост в этом случае наблюдается при  $h_0 / L_b < 1$ .

3. Для взрывления окалины с целью её удаления в вертикальных валках необходима деформация  $\varepsilon_y > 2,5\%$ .

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коновалов Ю. В. *Расчет параметров листовой прокатки: справочник* / Ю. В. Коновалов, А. Д. Остапенко, В. И. Пономарев. – М.: Металлургия, 1986. – 430 с.
2. Потапкин В. Ф. *Метод полей линий скольжения в теории прокатки широких полос: монография* / В. Ф. Потапкин. – Краматорск: ДГМА, 2005. – 316 с.
3. Ленард Д. *Учебное пособие по листовой прокатке* / Д. Ленард; пер. с англ. Е. А. Толстиковой. – 2011. – 364 с.
4. Бердичевский Ю. Е. Пути повышения эффективности систем гидромеханического удаления окалины станом горячей прокатки // *Сталь*, 2004. – № 7. – С. 44–48.
5. Коновалов Ю. В. *Справочник прокатчика. Справочное издание в 2-х книгах. Книга 1. Производство горячекатаных листов и полос.* – М.: Теплотехник, 2008. – 640 с.

### REFERENCES

1. Konovalov Ju. V. *Raschet parametrov listovoj prokatki: spravochnik* / Ju. V. Konovalov, A. D. Ostapenko, V. I. Ponomarev. – M.: Metallurgija, 1986. – 430 s.
2. Potapkin V. F. *Metod polej linij skol'zhenija v teorii prokatki shirokih polos: monografija* / V. F. Potapkin. – Kramatorsk: DGMA, 2005. – 316 s.
3. Lenard D. *Uchebnoe posobie po listovoj prokatke* / D. Lenard; per. s angl. E. A. Tolstikovej. – 2011. – 364 s.
4. Berdichevskij Ju. E. *Puti povyshenija jeffektivnosti sistem gidromehanicheskogo udalenija okaliny stanov gorjachej prokatki* // *Stal'*, 2004. – № 7. – S. 44–48.
5. Konovalov Ju. V. *Spravochnik prokatchika. Spravochnoe izdanie v 2-h knigah. Kniga 1. Proizvodstvo gorjachekatanyh listov i polos.* – M.: Teplotehnik, 2008. – 640 s.

**Сатонин А. В.**

– д-р техн. наук, проф. ДГМА

Переходченко В. А.

– вед. инженер ПАО «НКМЗ», аспирант

Добронос Ю. К.

– канд. техн. наук, доцент каф. АММ ДГМА

Махмудов К. Д.

– канд. техн. наук, доц. ДГТУ

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск;

ПАО «НКМЗ» – Публичное акционерное общество «Новокраматорский машиностроительный завод»;

ДГТУ – Дагестанский государственный технический университет, г. Махачкала, Дагестан.

E-mail: [amm@dgma.donetsk.ua](mailto:amm@dgma.donetsk.ua)