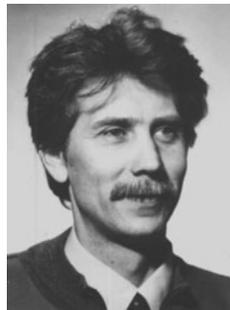


Анатолий Васильевич Литвиненко родился в 1946 г., окончил в 1975 г. МВТУ им. Н.Э. Баумана. Канд. техн. наук, доцент кафедры “Инструментальная техника и технологии” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 40 научных работ в области обработки металлов резанием.



A.V. Litvinenko (b. 1946) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1975. Ph.D.(Eng.), ass. professor of “Tooling engineering and technology” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of over 40 publications in the field of processing metals by cutting.

Ирина Вячеславовна Жучкова родилась в 1980 г., окончила МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2003 г. Аспирант кафедры “Инструментальная техника и технологии” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Специализируется в области повышения эффективности обработки корпусных деталей на основе концентрации технологических операций при обработке комбинированным инструментом.



I.V. Zhuchkova (b. 1980) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 2003. Post-graduate of "Tooling engineering and technology" department of the Bauman Moscow State Technical University. Specializes in the field of increasing the efficiency of processing of frame parts on the basis of concentration of technological operations by using combined tools.

---

УДК 621.771.073

В. И. Борисов, В. В. Голубьев

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗНОСА ЛИСТОВЫХ ВАЛКОВ ВАЛКОВЫХ СИСТЕМ КВАРТОСТАНОВ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ**

*Приведены результаты исследования износа валков полосового стана НШС 2000 АО “Северсталь”. Описаны методика проведения исследования и использованные специальные устройства. Экспериментально определены профили износа бочки валков и динамика износа опорных валков в зависимости от количества прокатанного металла. Приведены причины образования кольцевых выступов на опорных валках.*

К числу основных направлений совершенствования прокатных станов относятся повышение точности проката и производительности. Одной из причин, сдерживающих улучшение этих показателей, является неравномерность износа валков по длине бочки. Негативные последствия такого износа выражаются в снижении точности полос из-за нестабильности жесткости валковых систем и формы межвалкового зазора, в уменьшении производительности стана из-за частых пере-

валок. Неравномерный износ валков также сокращает их ресурс, что обусловлено повышенным съемом металла при переточках, выкрашивании рабочих поверхностей и сколами по краям бочки.

Несмотря на постоянное внимание специалистов к этой проблеме, до настоящего времени решить ее не удалось. Имеющиеся предложения [1–3] не получили практического применения вследствие сложности их реализации. Основными мероприятиями для устранения последствий износа являются станочная профилировка валков и осевая сдвигка валков, которую, кстати, применяют и для регулирования поперечного профиля полосы, например, при использовании *S*-образной профилировки рабочих валков.

В листовых и полосовых станах горячей прокатки в основном используют валковые системы кварто, цилиндрические валки которых слегка профилируют. Для этого контуру бочки валка придают определенную форму (профиль), которую выбирают опытным путем. Известно множество различных форм как симметричных, так и несимметричных [4]. На выбор профиля существенное влияние оказывает форма износа валков по длине бочки.

Настоящая работа направлена на изучение характера износа валков систем листовых квартостанов. Были проведены исследования износа валков чистовой группы НШС 2000 ГП АО “Северсталь”, состоящей из семи клетей: с 6-й по 12-ю.

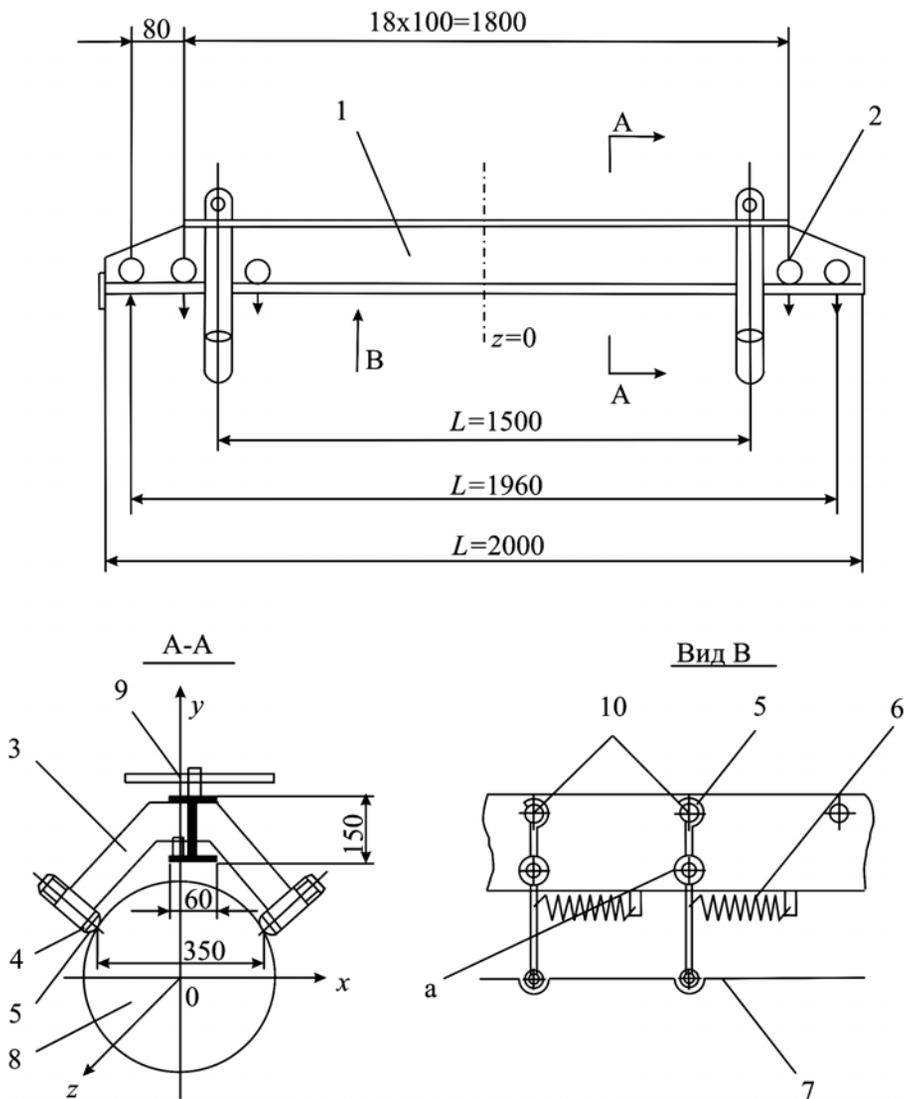
Характеристика валков чистовой группы стана: чугунные рабочие валки (исполнение ЛПХН<sub>д</sub>-71) диаметром 800...760 мм; стальные опорные валки (сталь 9ХФ) диаметром 1600...1460 мм, нормализованные (твердость на поверхности бочки в пределах от 49 до 52 HSD с рассеиванием по длине бочки  $\sigma_{n-1} = 0,968$ ). Рабочие валки профилировались в соответствии с принятой на комбинате практикой: по вогнутой параболе с глубиной по диаметру от 0,45 мм (клеть 6) до 0,25 (0,10) мм (клеть 9). На последних трех клетях профилировался только один валок с глубиной от 0,35 мм (клеть 10) до 0,25 (0,10) мм (клеть 12). Опорные валки профилировались по выпуклой параболе на диаметр 0,4 мм (клетки 6–9) и 0,3 мм (клеть 10–12).

Профилировка рабочих валков в течение одной кампании опорных валков корректируется в зависимости от поперечной разнотолщинности и формы полосы. Под кампанией здесь и в дальнейшем будем понимать время работы валков от одной переточки (перешлифовки) до другой.

Рабочие валки переваливают после прокатки не более 7000 т проката (примерно раз в смену), а опорные — не более 150 000 т (примерно раз в 10 суток).

Форму и размеры профиля износа определяли на холодных валках.

Износ рабочих валков исследовали в клетях 9, 10, 11, 12, а опорных — во всех клетях чистовой группы. Исследование проводилось в два этапа с перерывом в 1 год. Объем выборки по рабочим валкам на каждом этапе составлял 9...15 валков, по опорным — на первом этапе 2...5 валков, на втором — 3...6 валков. В общей сложности замерено около 50 рабочих валков, 96 опорных. На каждом валке измерения проводили трижды. Измерения выполняли в системе координат  $x, y, z$  (рис. 1). Начало координат принято посередине бочки.



**Рис. 1. Измерительное приспособление для определения формы и размеров профиля валков:**

1 — двутавровая балка; 2 — индикаторы часового типа; 3 — скобы; 4 — втулка; 5 — упоры; 6 — пружина; 7 — тяга; 8 — бочка валка; 9 — рукоятка; 10 — механизм фиксации ножек индикаторов; а — ось

Абсолютную величину износа определяли, используя “метод кернов”. Его суть: на рабочей поверхности бочки в радиальном направлении керном наносят углубления, которые называют “кернами”. По изменению глубины кернов оценивают величину износа в местах их нанесения. В нашем случае керны наносились по координатам  $z = (-0,9; 0,9; -0,8; 0,8; 0)$ , где  $z$  — ось выбранной системы координат, совпадающая по направлению с осью валка (цифры даны в метрах). Керны по каждой координате наносили двумя диаметрально противоположными гнездами: по 3 керны в каждом гнезде.

Измерения для определения формы и размеров профиля износа выполняли с использованием специально сконструированного приспособления в виде балки, которое базировалось на бочке валка (см. рис. 1). По длине балки в линию, параллельную оси валка, были вмонтированы индикаторы часового типа (21 штука) с ценой деления 0,01 мм. Шаг размещения индикаторов — 100 мм, кроме крайних. Крайние индикаторы были установлены с таким расчетом, чтобы замеры выполнялись в точках, отстоящих от края бочки на 20 мм.

При измерениях опорных валков расстояние между упорами 5 принимали равным 350 мм, при измерениях рабочих валков это расстояние уменьшали путем увеличения высоты втулок 4. Расстояние выбирали с таким расчетом, чтобы обеспечить стабильное положение приспособления на валке и зазор между валком и балкой 10...15 мм.

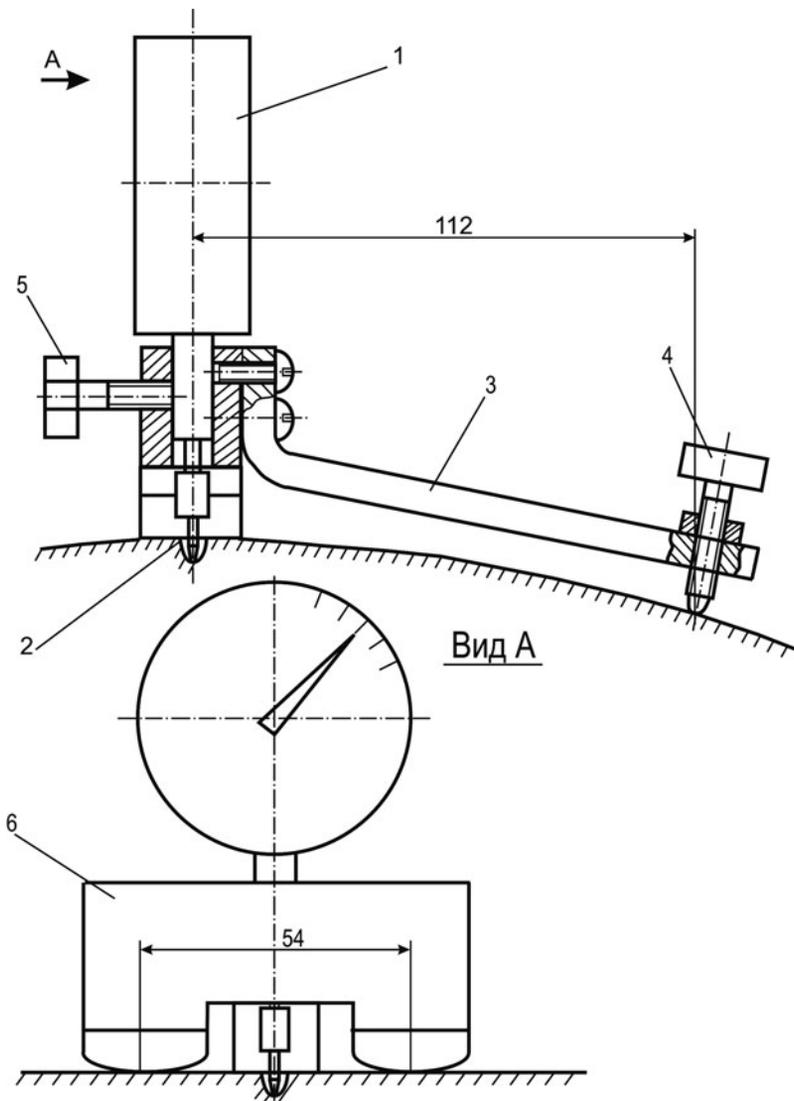
Глубину кернов измеряли индикатором (цена деления 0,01 мм) с использованием устройства, показанного на рис. 2.

По результатам измерения валков и статистической обработки полученных данных были определены их изношенные профили. Типовые профили износа показаны на рис. 3.

По износу рабочих валков можно отметить следующее:

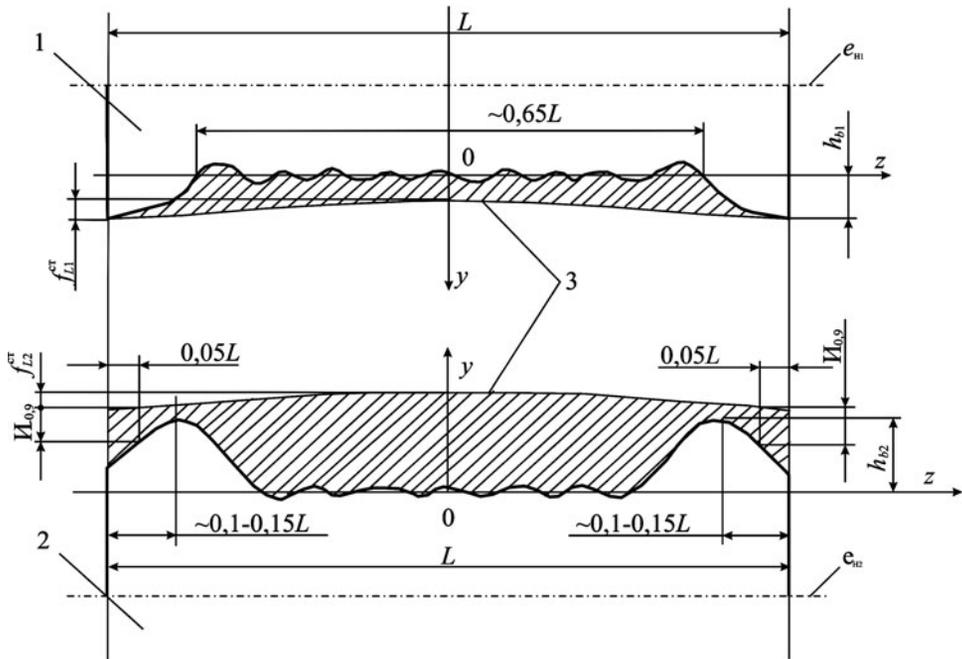
1. Глубина “дорожки” износа на радиус на верхнем валке составляет от 0,20 до 0,45 мм; на нижнем — несколько больше (от 0,30 до 0,60 мм). С увеличением номера клетки глубина возрастает;
2. Износ в местах, где рабочий валок контактирует только с опорным валком, не превышает 0,03...0,05 мм (краевые зоны бочки);
3. Во внутренних угловых зонах профиля образуются углубления, глубина которых зависит от доли узких полос в прокатываемом сорimente.

На рис. 4 в качестве примера приведены профили, образованные в результате износа рабочих валков в клетки 10 после прокатки 6850 т металла. Линия 3 показывает параболическую аппроксимацию профиля верхнего валка, которую можно с некоторым приближением использовать при расчете упругой деформации валковой системы.



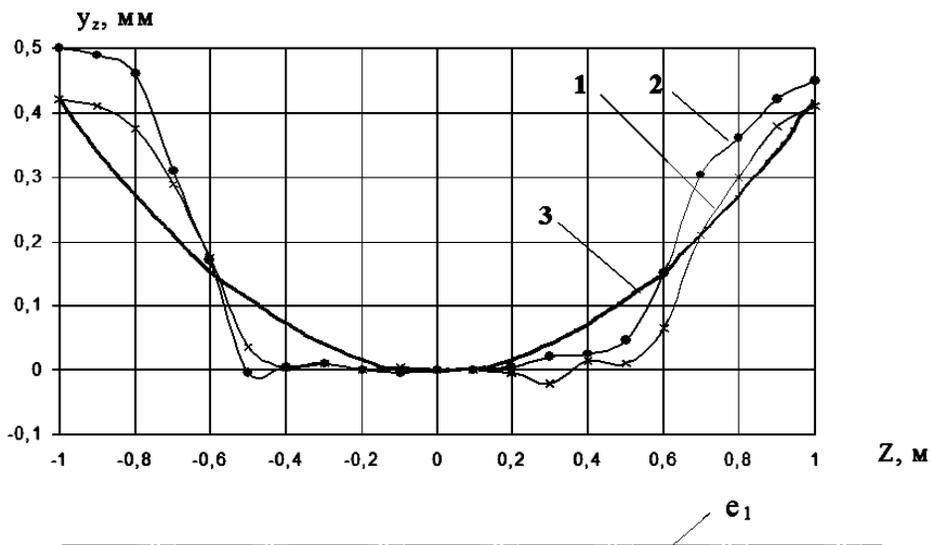
**Рис. 2. Устройство для измерения величины износа с использованием кернов:**  
 1 — стандартный индикатор часового типа с ценой деления 0,01 мм; 2 — измерительная игла; 3 — установочная планка; 4 — регулировочный винт; 5 — фиксирующий винт; 6 — опора

Из анализа износа опорных валков было установлено следующее. Во всех клетях чистовой группы, кроме клеток 6 и 9, на нижних опорных валках в боковых зонах бочки устойчиво образовывались кольцевые выступы разной высоты с вершиной, отстоящей от краев бочки на расстоянии 200... 300 мм. В клетки 6 кольцевые выступы отсутствовали на всех опытных валках как первого, так и второго этапов исследования (объем выборки на первом этапе — 4, на втором — 3). Износ по боковым зонам происходил более интенсивно. В результате контур профиля, соответствующий диапазону координат  $|z| = (0,6 \dots 1,0)$  м,



**Рис. 3. Типовые профили износа нижних валков:**

1 и 2 – рабочий и опорный валки; 3 – станочные профили;  $L$  – длина бочки;  $f_L^{cr}$  – размер станочного профиля;  $I$  – абсолютная величина износа;  $h_b$  – глубина профиля износа;  $e_{n1}$  и  $e_{n2}$  – оси рабочего и опорного валков



**Рис. 4. Профиль износа рабочих валков 10-й клетки:**

1 и 2 – профили верхнего и нижнего валков; 3 – параболическая аппроксимация профиля верхнего валка;  $e_1$  – ось валка

приобретал значительную крутизну. На первом этапе исследования профили имели сглаженную среднюю часть с тенденцией к образованию кольцевых выступов. На втором этапе средняя часть профиля получалась несколько заостренной по отношению к станочному профилю.

В 9-й клетки на первом этапе исследования профили износа с кольцевыми выступами имели место на всех опытных валках (объем выборки равен 3). Наибольшая высота выступа  $h_{b2}$  достигала 0,27 мм, наименьшая — 0,06 мм. На втором этапе кольцевые выступы отсутствовали. Профиль оставался выпуклым со сглаженной вершиной и имел тенденцию к образованию выступов.

Высота кольцевых выступов  $h_{b2}$  по клетям имела следующие средние значения: 0,36; 0,29; 0,15; 0,11; 0,14 и 0,29 мм — клетки 7...12 соответственно. По этим значениям построен график изменения высоты  $h_{b2}$  по клетям, показанный на рис. 5.

Верхние валки изнашивались иначе. Устойчивые кольцевые выступы образовались только в клетки 12. Их средняя высота составляла  $h_{b2} = 0,17$  мм. На первом этапе исследования в остальных клетях выступы отсутствовали или при некоторых измерениях были замечены только признаки выступов, которые проявлялись в выпуклой части профиля. В целом, профили износа оставались выпуклыми с несколько сглаженной вершиной. На втором этапе исследования помимо клетки 12 выступы образовывались на 2-х валках в клетях 7, 8, 9, 11 (объем выборки 4-5). В клетки 10 все опытные валки имели выпуклый профиль.

На рис. 6 в качестве примера приведены статистические профили износа валков в клетях 6, 10, 12.

При исследовании абсолютного износа опорных валков было замечено, что керны при прокатке постепенно закатываются вследствие пластического смещения поверхностных слоев бочки. В результате над керном в направлении пластического сдвига формировался “козырек”, размер которого зависел от давления и проскальзывания рабочих поверхностей в межвалковом контакте. В связи с этим, керны с координатой  $z = 0$ , как правило, закатывались полностью. Керны также забивались окалиной. Поэтому перед измерением их глубины они тщательно очищались от окалины. Таким образом, пластическая

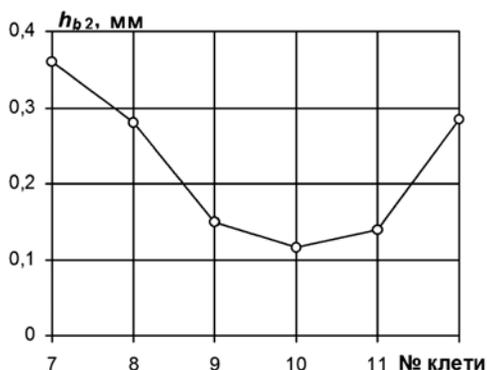
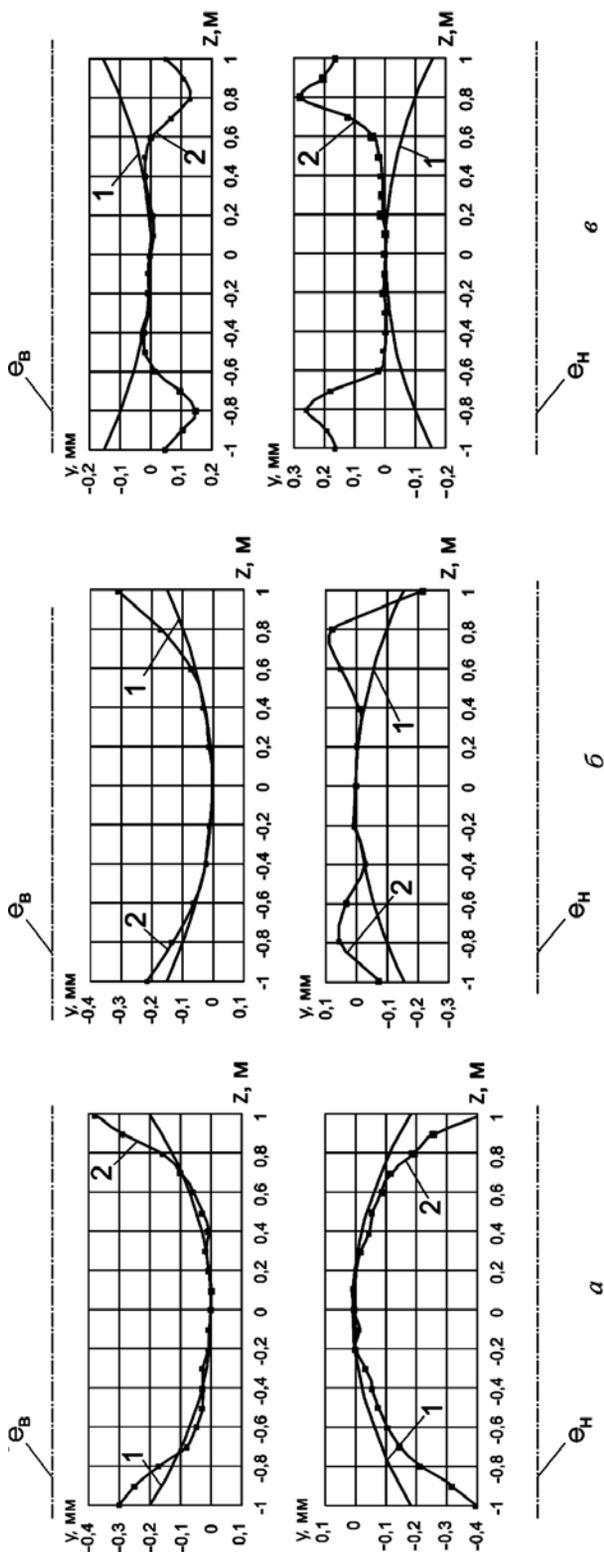


Рис. 5. Высота кольцевых выступов ( $h_{b2}$ ) на нижних опорных валках по клетям



**Рис. 6. Профили износа опорных валков клетей 6 (а), 10 (б) и 12 (в) (сверху — верхние валки; снизу — нижние):**  
 1 — стачный профиль; 2 — профиль износа;  $\epsilon_B$  и  $\epsilon_H$  — оси верхнего и нижнего валков

деформация поверхностных слоев бочки и остатки окалины в кернах вносили определенную погрешность. Замеры глубины кернов тщательно анализировались и корректировались с использованием размеров изношенного профиля по определенной методике. После обработки данных измерений по координате  $|z| = 0,9$  м были получены следующие значения величины износа  $I_{|0,9|}$  (см. рис. 3), приведенные в таблице.

Таблица

Износ валка, мм	Номер клетки					
	7	8	9	10	11	12
Верхнего	0,49	0,29	0,30	0,30	0,36	0,40
Нижнего	0,43	–	0,30	0,34	0,30	0,35

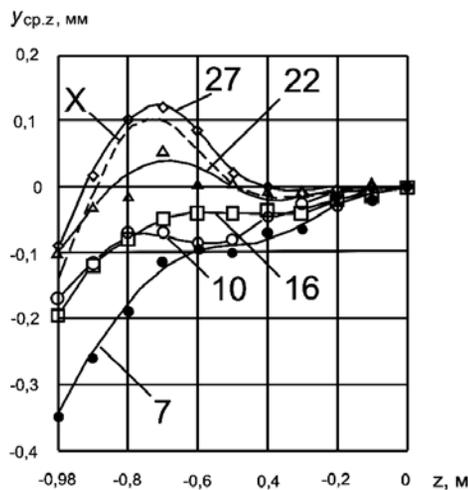
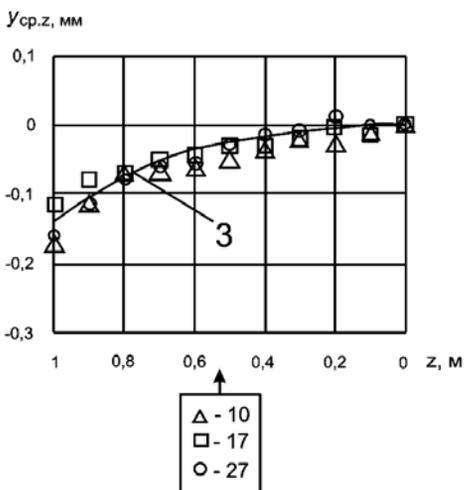
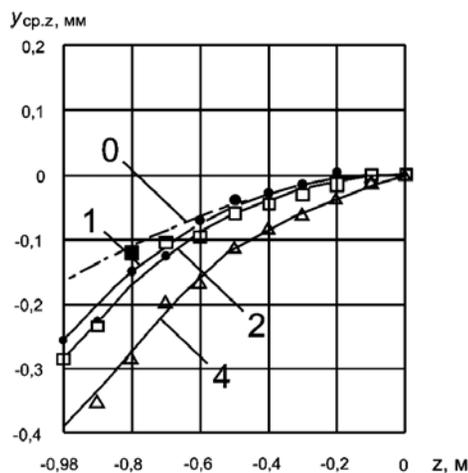
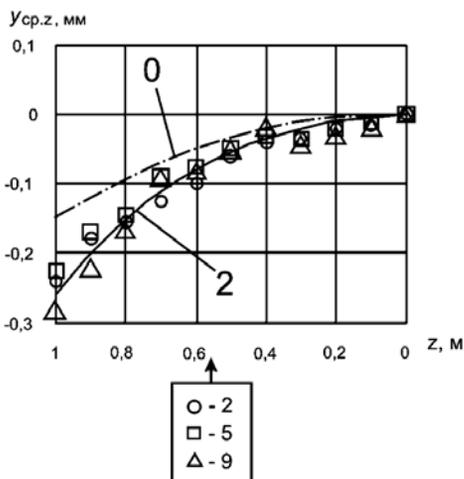
Среднее значение износа по всем клетям составило  $0,35$  мм ( $\sigma_{n-1} = 6,4$ ).

Износ по остальным значениям координаты  $z$  можно найти, используя размеры изношенных профилей.

В рамках настоящей работы проводилось также исследование динамики изменения профиля износа опорных валков в клетях 10 в зависимости от количества прокатанного металла. Отметим, что такие исследования вследствие значительной трудоемкости ранее не проводились. Измерения выполнялись непосредственно в клетях сразу после вывалки рабочих валков приспособлением (см. рис. 1) с использованием механизма фиксации показаний индикаторов. После установки приспособления на валке положение индикаторов фиксировалось механизмом фиксации. Затем приспособление выносилось из клетки, и показания индикаторов снимались вне клетки. Одно и то же измерение выполнялось трижды. Средние значения размера профиля  $y_z$  по координате  $z$  приводились к одной половине валка и по полученным численным значениям построены профили износа после прокатки разного количества металла (рис. 7).

Динамика изменения профиля по координате  $|z| = 0,7$  м представлена на рис. 8.

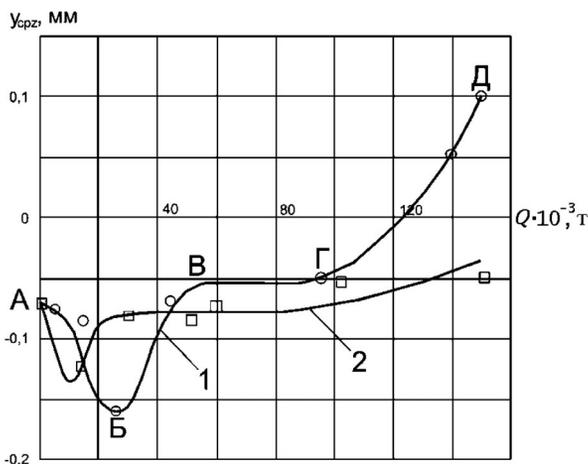
Процесс износа верхнего и нижнего валков протекает примерно одинаково, но с разной интенсивностью, что и определяет разную форму износа. На начальной стадии работы валков после их переделки, примерно, до прокатки  $13,0 \dots 20,0$  тыс. т металла, в боковых зонах бочки износ протекает быстрее, чем в ее средней части, что приводит к увеличению выпуклости профиля. Далее, до  $30,0 \dots 40,0$  тыс. т износ в средней зоне начинает опережать износ в боковых зонах



**Рис. 7. Профили износа верхнего (а) и нижнего (б) опорных валков в клети 10 на разных стадиях прокатки:**

1, 2, 4, 5, 7, 9, 10, 16, 17, 22 и 27 — номера перевалок рабочих валков после прокатки 7781, 13213, 25353, 30135, 42714, 59724, 96931, 102624, 129662, 151993 т соответственно; X — изношенный профиль холодного нижнего опорного вала после трехсуточного охлаждения; 0 — станочный профиль; 3 — усредненный профиль по результатам замеров после 10, 17, 27 перевалок

и выпуклость профиля уменьшается. При дальнейшей прокатке, до 80,0...100,0 тыс. т износ по длине бочки протекает приблизительно равномерно, и форма профиля практически сохраняется постоянной. Ближе к перевалке опорных валков на верхнем валке износ по боковым зонам замедляется, и выпуклость профиля незначительно уменьшает-ся. На нижнем валке уменьшение износа в окрестностях координаты



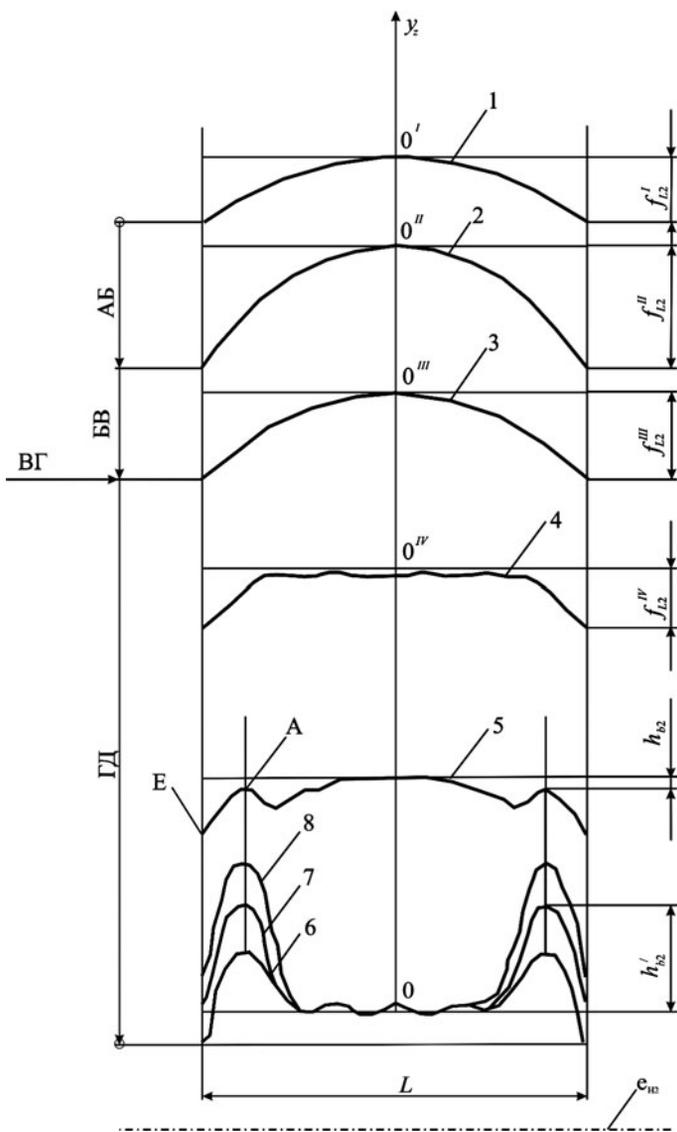
**Рис. 8.** Динамика изменения профиля износа опорных валков по координате  $|z| = 0,7$  м в клетке 10:

1 и 2 – верхний и нижний валки;  $Q$  – количество прокатанного металла

$|z| = 0,7 \dots 0,8$  м вызывает образование кольцевых выступов, высота которых перед очередной переточкой достигает 0,12 мм.

Образование кольцевых выступов на нижних опорных валках, в целом, можно представить схемой, приведенной на рис. 9. В начале кампании опорных валков, примерно до  $20 \cdot 10^3$  т прокатанного металла, происходит увеличение выпуклости профиля ( $f''_{L2} > f'_{L2}$ , процесс износа АБ, см. также рис. 8). Далее, до прокатки  $45 \cdot 10^3$  т (процесс БВ) выпуклость уменьшается ( $f'''_{L2} < f''_{L2}$ ). При этом она остается больше выпуклости станочного профиля. Затем в диапазоне  $(45 \dots 95) \cdot 10^3$  т прокатанного металла профиль остается примерно стабильным (процесс ВГ). В конце кампании на валке формируется кольцевой выступ, высота которого  $h_{b2}$  перед перевалкой может достичь  $0,1 \dots 0,4$  мм в зависимости от номера клетки. Точка Е может оставаться в отрицательной области или может перейти в положительную область, как показано на рис. 9 (см. также рис. 6, б и в).

Износ приводит к образованию зазора в средней части межвалкового контакта при ненагруженных валках, который может достичь в последних клетях чистовой группы  $0,5 \dots 0,7$  мм. Это заметно снижает жесткость рабочих валков на изгиб и приводит к перегрузке боковых зон валков. В результате ухудшается точность прокатки, затрудняется автоматическое регулирование геометрических размеров полосы вследствие нестабильности упругих характеристик валковой системы, уменьшается ресурс валков особенно из-за выкрашивания, которое на опорных валках чаще всего возникает в перегруженных боковых зонах. Выкрашивание приводит к повышенному съему металла при переточках, а также к преждевременному списыванию валков. Напри-



**Рис. 9. Механизм формирования кольцевых выступов на нижних опорных валах по ходу прокатки:**

1 – начальный профиль (цифры 2 – 8 указывают последовательность изменения профиля по мере увеличения количества прокатанного металла); АБ, ВВ, ВГ, ГД – процессы износа, показанные на рис. 8

мер, на исследуемом стане в начале 90-х годов прошлого столетия по этой причине списывалось на разных стадиях износа около 40% всех преждевременно списанных валков. Примерно, за время работы опорных валков от одной переточки до другой выкрашивание разной глубины появляется на одном-двух валках из 14.

На основании проведенного исследования объяснить образование кольцевых выступов не представляется возможным. Однако гипоте-

тически можно указать на некоторые обстоятельства, которые могут привести к образованию выступов.

В начале работы валков после перевалки прилегание валков в межвалковом контакте достаточно плавное и распределение межвалковой силы по длине бочки можно описать параболой (при параболической профилировке). В этом случае два полюса качения (точки, в которых окружные скорости опорного и рабочего валков совпадают) расположатся по обе стороны от середины бочки, где-то в окрестностях точек, отстоящих от середины бочки на расстоянии  $0,25L$ . В межвалковой зоне, между полосами качения, скорей всего возникнет момент торможения, а в боковых зонах от полюсов качения — приводной момент, который будет преодолевать момент торможения и момент трения в подшипниках опорного валка.

С износом валков наибольшая контактная сила будет возникать в средней части валков и по краям бочек, а в области границ дорожки износа на рабочем валке она будет ослабевать. В результате тормозной момент ослабнет. Поскольку контактная сила в боковых зонах будет увеличиваться, то полюса качения начнут смещаться в сторону краев бочки и могут оказаться в месте образования выступов. Тогда проскальзывание валков в этом месте практически прекратится и износ там будет минимальный. В средней части и у самых краев бочки износ будет возрастать.

С другой стороны, в местах выступов, которые находятся напротив границ дорожки износа рабочего валка, контактная сила по мере износа будет уменьшаться. Эти два обстоятельства и могут привести к возникновению выступов.

Образование сравнительно крутых склонов с внешних сторон выступов можно объяснить следующим образом. Вода, которая в небольшом количестве попадает на полосу, стекает вместе с вторичной окалиной узким потоком вдоль рабочего валка с кромок полосы (середина полосы в межклетьевом промежутке приподнята) и попадает на края бочки нижнего рабочего валка. Затем окалина затягивается в контакт между валками. Вследствие ее абразивного характера происходит заметный износ опорных валков у краев бочки.

В результате этих обстоятельств формируются выступы с формой, как показано на рис. 9. Чтобы подтвердить или опровергнуть эту гипотезу, необходимы специальные эксперименты.

**Выводы.** 1. Изменения формы профиля в соответствии с графиками (см. рис. 7) следует считать предварительными, а значения  $y_{cp.z}$  приближительными вследствие малого объема выборки.

2. Размеры профилей износа и динамика его изменения дает возможность более обоснованно подойти к выбору станочной профили-

ровки валков и ее корректировке на рабочих валках по мере износа опорных валков.

3. Образование кольцевых выступов увеличивает негативные последствия неравномерности износа, и было бы целесообразным их образование исключить на основе дополнительных исследований.

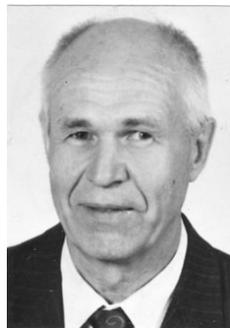
## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А. с. № 400389 (СССР). Опорный валок / А.А. Паршин, К.Н. Ткалич, Л.С. Полонский // Бюллетень, 1973, № 40.
2. А. с. № 816592 (СССР). Бочка опорного валка клетки кварто / З.М. Шварцман, А.Ф. Пименов, С.Ф. Котельников и др. // Бюллетень, 1981, № 12.
3. А. с. № 192149 (СССР). Способ регулирования профиля рабочих валков листовых станов шлифованием в процессе прокатки / А.П. Чекмарев, Л.Е. Каптуров, С.Н. Рабинович и Л.Ф. Машкин // Бюллетень, 1967, № 5.
4. Б у д а к в а А. А., К о н о в а л о в Ю. В., Т к а л и ч К. Н. Профилирование валков листовых станков. – Киев: Техника, 1986. – 190 с.

Статья поступила в редакцию 21.09.2004

Виталий Иванович Борисов родился в 1931г., окончил в 1956г. МВТУ им. Н.Э.Баумана. Канд. техн. наук, доцент кафедры “Оборудование и технологии прокатки” МГТУ им. Н.Э.Баумана. Автор более 60 научных работ в области повышения точности прокатки листов (полос).

V.I. Borisov (b. 1931) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1956. Ph. D. (Eng.), assoc. professor of “Equipment and Technologies of Rolling” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 60 publications in the field of improvement of accuracy of rolling sheets (strips).



Виталий Владимирович Голубьев родился в 1981г., Окончил в 2004г. МГТУ им. Н.Э.Баумана. Аспирант кафедры “Оборудование и технологии прокатки” МГТУ им. Н.Э.Баумана. Автор одной научной работы в области повышения точности прокатки листов и полос.

V.V. Golubiev (b. 1981) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 2004. Post-graduate of “Equipment and Technologies of Rolling” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author a publication in the field of improvement of accuracy of rolling sheets and strips.