

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ИЗНОСА РАБОЧИХ ВАЛКОВ ШИРОКОПОЛОСНОГО СТАНА ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ**

Разработана математическая модель, позволяющая прогнозировать износ рабочих валков широкополосных станов горячей прокатки. Показана роль данного фактора в формировании профиля поперечного сечения полос.

**Постановка задачи.**

Износ валков – важнейший технологический фактор при прокате листовой стали, значение которого возрастает с повышением требований к качеству прокатываемой продукции (поперечной разнотолщинности и профиля полосы).

Величина и характер износа рабочих валков зависит от многих факторов, основные из которых следующие: силовые, температурные и скоростные условия прокатки, свойства и количество прокатываемого металла, твердость и диаметр валков, их исходная профилировка других. Наличие большого числа факторов затрудняет получение зависимостей, которые бы учитывали их и позволяли рассчитывать износ валков [1]. Чаще всего в литературе износ связывают с количеством (длиной) прокатываемых полос и описывают эту зависимость с использованием эмпирических уравнений, коэффициенты которого определяют экспериментально на каждом прокатном стане [1–2]. Основной недостаток этих зависимостей заключается в том, что они учитывают влияние небольшого числа факторов и не могут быть использованы при изменении режимов прокатки или характеристик валков. Существующие теоретические методики основаны на определении пути трения в очаге деформации и контактных напряжений, либо на расчете работы деформации [1]. Они довольно сложны и громоздки, причем зачастую дают высокую погрешность.

**Изложение основных материалов исследования.**

Исходя из сказанного, в настоящей работе при разработке математической модели износа валков использовали упрощенные теоретические методики, в которых трудно определяемые величины заменяли коэффициентами. Значения этих коэффициентов находили, исходя из экспериментальных данных, полученных для условий чистовых групп клетей широкополосных станов горячей прокатки (ШСГП).

Разработанная модель учитывает, что износ рабочего валка в процессе прокатки ( $I_R$ ) происходит от контакта с опорным валком ( $I_o$ ) и взаимодействия с прокатываемой полосой ( $I_n$ ):

$$I_R = I_o + I_n \quad (1).$$

Расчет износа рабочих валков от контакта с опорными основан на методе Клименко В.М. и др. [3]. В этой методике ввиду наличия взаим-

ного проскальзывания между рабочими и опорными валками при эксплуатации, износ принят абразивным. При этом износ элементарного объема поверхностного слоя валка может быть представлен в следующем виде:

$$\Delta V = k_u * k_t * A_{mp} / HSD \quad (2),$$

где  $A_{mp}$  – работа сил трения скольжения на контакте рабочего и опорного валков, равная сумме работ сил трения скольжения при прокатке и при холостом ходу;

$HSD$  – твердость валка;

$k_u$  – коэффициент износа;

$k_t$  – коэффициент, зависящий от соотношения твердости рабочих и опорных валков.

Следует отметить, что метод определения коэффициента  $k_u$  авторы не приводят. По нашему мнению он фактически является коэффициентом адаптации. На основе зависимости (2) авторы работы [3] получили уравнение для определения величины износа опорных валков от контакта с рабочими ( $I_{OB}$ ):

$$I_{OB} = R_{OB} - [R_{OB}^2 - B_{OB}]^{0.5} \quad (3),$$

где  $R_{OB}$  – радиус опорного валка;

$B_{OB}$  – сложная функция, учитывающая контактные межвалковые напряжения, твердость опорного валка, радиусы рабочих и опорных валков, их профилировки и другие параметры.

Авторы указывают, что аналогично из выражения (2) можно получить уравнение для расчета износа рабочих валков. Нами было получено такое уравнение:

$$I_o = R_p - [R_p^2 - B_{PB}]^{0.5} \quad (4),$$

где  $R_p$  – радиус рабочего валка;

Выражение для определения функции  $B_{PB}$  было упрощено за счет пренебрежения износом во время холостого хода, так как анализ показал, что для условий чистой группы клеток ШСГП величина его составляет не более 2 % суммарного износа рабочих валков.

Расчет величины износа рабочих валков в контакте с прокатываемой полосой принят на основе показателя интенсивности износа и длины прокатываемых полос. Этот подход был предложен еще в шестидесятых годах Литовченко Н.В. и Заверюхой В.Н.[4]:

$$I_n = u * L * \alpha_d / [\pi * (\mu + 1) * \cos(\alpha_d / 2)] \quad (5),$$

где  $u$  – интенсивность износа рабочих валков;

$L$  – длина прокатываемой полосы в данной клетке;

$\alpha_d$  – угол захвата;

$\mu$  – коэффициент вытяжки.

При расчете величины износа рабочих валков то этой методике авторы принимают, что интенсивность изнашивания рабочих валков известная величина для данных валков, однако указывают, что она зависит от многих параметров. Например, в работе [5] показано, что интенсив-

ность износа может колебаться в широких пределах, поскольку зависит от фрикционных свойств материалов валка и полосы, контактных напряжений, упруго–прочностных свойств материала валков и т.д.

Исходя из выражения, предложенного авторами работы [5] для процесса приработки фрикционной пары, нами получено упрощенное уравнение для расчета величины интенсивности износа применительно к условиям продольной прокатки:

$$u = k_u * psr^{0,57} * (3 * f / \sigma_{Bp})^\beta * \exp(0,002 * \beta * T)$$

где  $k_u$  – коэффициент, учитывающий схему трения рабочий валок–полоса и влияние гистерезисных потерь;

$psr$  – контактные напряжения при прокатке;

$f$  – коэффициент трения при прокатке;

$\sigma_{Bp}$  – предел прочности материала валка;

$\beta$  – коэффициент, зависящий от материала валка;

$T$  – температура валка.

На основе приведенных выражений разработана математическая модель расчета износа рабочих валков ШСГП в их центральной зоне.

Вместе с тем известно, что наиболее интенсивный износ наблюдается, как правило, на участках валка, соответствующих месту прокатки прикромочных участков полос. Замеры показывают, что температура кромок полосы шириной 100–150 мм на 30–70°C ниже температуры центральной части [6]. Это приводит к дополнительному увеличению контактных напряжений на данных участках, что также было учтено в математической модели износа валков.

#### **Реализация математической модели**

С целью проверки возможности использования разработанной методики были проведены исследования износа рабочих валков семиклетьевой чистовой группы ШСГП 2000. При этом в период одной кампании опорных валков на первые, третьи, пятые и седьмые сутки эксплуатации фиксировали следующие параметры: твердость рабочих и опорных валков до и после прокатки, исходную профилировку валков, величину выработки (износа) рабочих валков после прокатки, диаметры рабочих и опорных валков, монтажность партии металла (последовательность прокатки, размеры и массу горячекатаных полос, марки стали), деформационные и температурно–скоростные режимы прокатки полос в данном монтаже, температуру валков после их вывалки, выборочно профиль горячекатаных полос.

На рис. 1 представлены некоторые результаты исследований величины износа центральной части рабочих валков по клетям чистовой группы. Здесь приведены данные по изменению диаметра изношенных валков ( $I_d = 2 * I_R$ ). Анализ результатов исследований показывает, что величина износа рабочих валков увеличивается по мере эксплуатации опорных валков. То есть, увеличение износа опорных валков в свою очередь приводит к увеличению износа рабочих валков. Соответствующая

поправка была включена в математическую модель износа рабочих валков.

На рис. 2 показано сравнение рассчитанного и замеренного износа для пятой, шестой и седьмой клетки чистовой группы продольных утолщений на горячекатаных полосах, что особенно неблагоприятно при производстве подката для дальнейшей холодной прокатки.

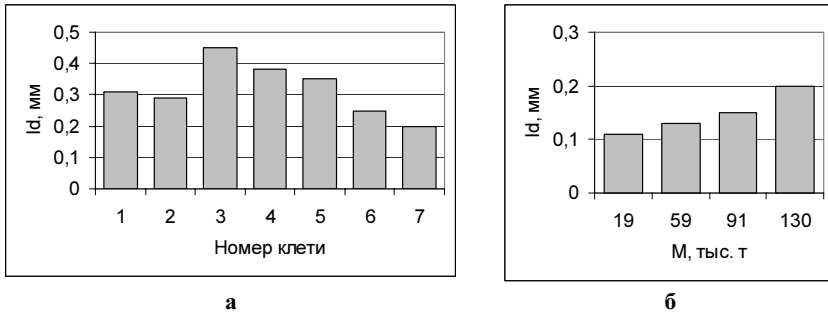


Рис. 1. Величина износа центральной части рабочих валков ( $I_d$ ) клеток чистовой группы (а) и изменение износа валков клетки № 7 в зависимости от массы полос ( $M$ ), прокатанных с момента завалки опорных валков (б).

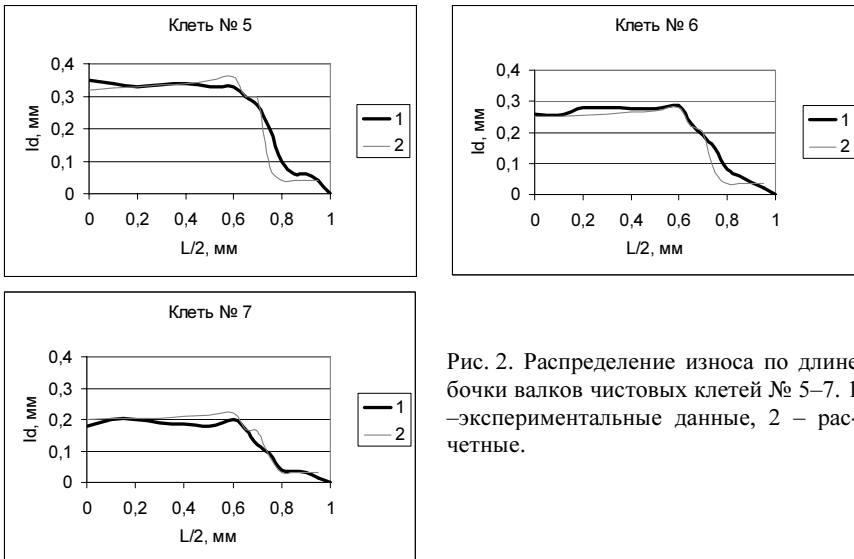


Рис. 2. Распределение износа по длине бочки валков чистовых клеток № 5–7. 1 – экспериментальные данные, 2 – расчетные.

По разработанной программе рассчитывали износ валков для условий, соответствующих проведенным экспериментам. Расчет величины износа в каждом сечении рабочих валков производился путем суммирования износа от всех прокатываемых полос в данном монтаже.

Анализ результатов показал, что разработанная модель позволяет прогнозировать величину износа рабочих валков данного стана с погрешно-

стью не более 20 %. Аналогичные исследования, проведенные на других широкополосных станах показали, что погрешность прогнозирования износа рабочих валков составляет не более 35 % (без адаптации моделей), а при адаптации – не более 20 %.

С позиций обеспечения качества проката наибольшее значение имеет неравномерность износа по длине бочки валков. Неравномерность износа формируется по трем основным составляющим. Первая – повышенный износ зон валков, соответствующих прокатке прикромочных участков полос, о чем было сказано выше. Этот фактор накладывает ограничения на объем проката одной ширины. Вторая – разница износа между участками валков, на которых прокатывается полоса, и на которых прокатка отсутствует (за пределами ширины полосы). Этот фактор определяет необходимость соблюдения монтажности – прокатки полос по схеме «от широких к узким». Третья – местная неравномерность износа валков, которая определяется многими случайными причинами – неравномерность охлаждения валков, недостаточно эффективное удаление окалины в гидросбивах, различие в механических свойствах валков и др. Такой износ валков приводит к формированию местных

Для оценки влияния неравномерности износа валков на величину местных утолщений можно использовать данные, полученные сотрудниками ИЧМ Сорокиным С.А. и др. при проведении экспериментов со специально подготовленными валками с кольцевыми проточками [7].

В результате обработки этих данных нами получено следующее уравнение для оценки передачи местных утолщений из  $i$ -той клетки чистовой группы на готовую полосу:

$$dh = I_R * \exp[-4,5 * (hi - hn) / hi]$$

где  $dh$  – величина местного утолщения на готовой полосе;

$I_R$  – величина кольцевого износа валка (радиальная);

$hi$  – толщина полосы после  $i$ -той клетки;

$hn$  – конечная толщина полосы.

На рис. 3 приведены результаты расчета коэффициента передачи местных утолщений ( $Kdh$ ) от раската за  $i$ -той клетью до готовой полосы для семиклетьевой чистовой группы.

$$Kdh = dI / dh$$

Прогнозировать местный износ валков весьма сложно. Он зависит от многих случайных и трудно учитываемых факторов [8]. Однако нами установлено, что величина местных утолщений в некоторой степени пропорциональна расчетному износу валков (рис. 4).

Полученные зависимости использованы при разработке математической модели формирования профиля поперечного сечения и плоскостности полос при непрерывной горячей прокатке. В модели кроме износа валков учтены исходные профилировки валков, их тепловой профиль, прогиб валковой системы, противозгиб валков и применение циклической осевой сдвижки рабочих валков для снижения величины износа.

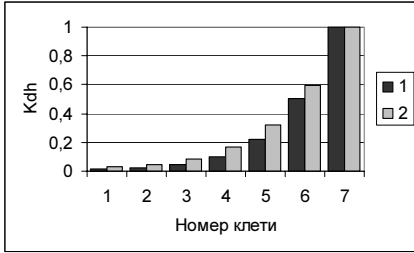


Рис. 3. Зависимость коэффициента передачи местных утолщений от проката в клетях чистой группы до готовой полосы. Толщина полос 2 мм (1) и 6 мм (2).

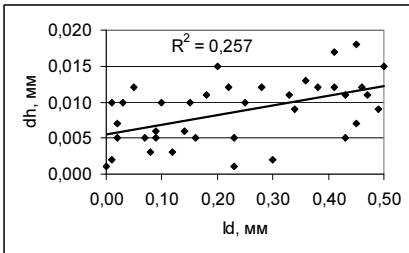


Рис. 4. Зависимость величины местных утолщений (dh) от расчетного износа валков (ld).

Модель позволяет оптимизировать деформационный режим прокатки полос, профилировки валков, определять рациональные компоновки монтажных партий полос, в том числе для проектируемых станов. Покажем это на нескольких примерах.

На рис. 5 показано расчетное допустимое изменение общего профиля поперечного сечения полос размером  $2 \times 1500$  мм и  $6 \times 1500$  мм после их прокатки в семиклетьевой чистой группе, которое не приведет к нарушению их плоскостности. Подобные данные можно использовать при определении исходной универсальной профилировки валков, обеспечивающей требуемые геометрические параметры проката всей монтажной партии.

На рис. 6 показано расчетное соотношение износа валков семиклетьевой чистой группы ШСГП и пятиклетевой группы литейно-прокатного агрегата (ЛПА) при прокатке полос одного типоразмера ( $2 \times 1200$  мм) из подката одинаковой толщины (40 мм). Более интенсивные режимы деформации в клетях ЛПА приводят к большему износу валков.

Моделирование износа рабочих валков при использовании системы их осевого перемещения в режиме циклической сдвижки показало следующее. Существенно меняется характер износа по длине бочки вала за счет его распределения по большей поверхности. Причем переход от участка вала с максимальным износом к участку вала с минимальным износом становится пологим.

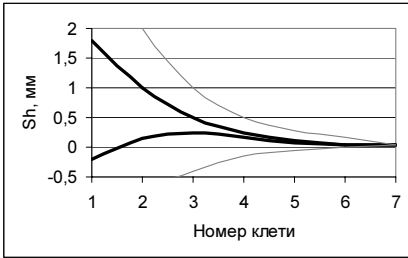


Рис. 5. Допустимый диапазон изменения профиля поперечного сечения полосы ( $Sh$ ) в межклетевых промежутках, не приводящее к потере их плоскостности. Темные линии — полоса размером 2×1500 мм, светлые линии — 6×1500 мм.

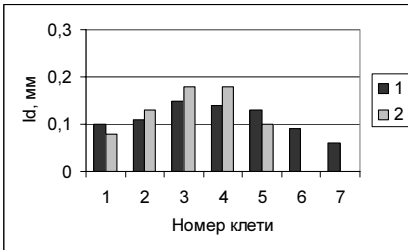


Рис. 6. Соотношение износа валков семиклетевой чистовой группы клеток ШСГП (1) и пятиклетевой группы ЛПА (2).

Анализ неравномерности износа валков показал, что одна и та же величина местных утолщений на полосе при использовании осевой сдвижки валков образуется после прокатки в 1,5–2,5 раза большего количества металла, чем при прокатке полос без осевой сдвижки. Таким образом, при формировании монтажной партии в условиях применения осевой сдвижки валков объем полос одной ширины может быть увеличен в среднем в два раза. При формировании монтажной партии необходимо учитывать также соотношение максимально возможного осевого перемещения валков и разницы между максимальной и минимальной шириной прокатываемых полос. Исходя из этого соотношения полосы различной ширины целесообразно разбивать на несколько групп. При прокатке этих групп необходимо соблюдать последовательность «от широких к узким». Внутри группы допускается произвольная последовательность прокатки полос различной ширины. В то же время, результаты моделирования показывают, что несмотря на применение осевой сдвижки валков, наилучшим вариантом является соблюдение последовательности прокатки полос «от широких к узким». При выборе рациональных параметров циклического перемещения рабочих валков необходимо учитывать, что для каждой клетки чистовой группы существуют свои рациональные параметры осевого перемещения валков (шаг сдвижки и количество полос, прокатываемых в одном положении валков). Это связано с различным износом рабочих валков, а также с типом их профилировок.

**Выводы.**

Разработаны математические модели, позволяющие прогнозировать влияние износа рабочих валков на формирование профиля поперечного сечения и плоскостности горячекатаных полос. Они могут быть использованы для рационального формирования монтажных партий полос на широкополосных станах горячей прокатки и определять требования к оборудованию проектируемых и реконструируемых станов.

1. *Коновалов Ю.В., Остапенко А.Л., Пономарев В.И.* Расчет параметров листовой прокатки. Справочник. – М.: Металлургия, 1986.– 430 с.
2. *Николаев В.А.* Профилирование и износостойкость листовых валков. – К.: Техніка, 1992. – 160 с.
3. *Математическая модель* износа рабочих и опорных валков при их взаимодействии в четырехвалковых клетях /В.М.Клименко, С.Н.Никитенко, С.Г.Савицкий, А.А.Меденков // Изв. ВУЗов. Черная металлургия/ – 1986. – №9. – С.59–62.
4. *Литовченко Н.В., Заверюха В.Н.* К оценке износа валков станов прокатки тонкой листовой стали / Изв. ВУЗов. Черная металлургия. – 1966. – № 11. – С.83–86.
5. *Карачельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С.* Основы расчетов на трение и износ. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.
6. *Горячая прокатка широких полос* / В.Н.Хлопонин, П.И.Полухин, В.И.Погоржельский, В.П.Полухин . – М.: Металлургия, 1991. – 198 с.
7. *Сорокин С.А., Качайлов А.П., Сафьян А.М.* Влияние условий горячей прокатки на образование продольных утолщений на подкате / Повышение качества тонколистовой стали. – М.: Металлургия. – 1986. – С. 12–14.
8. *Хохлов В.И., Воробей С.А.* Изменение поперечного профиля горячекатаных полос за кампанию валков ШСПП / Теория и технология производства листовой проката. – М.: Металлургия, 1991. – С.37–42.

*Статья рекомендована к печати д.т.н. Г.В.Левченко*