

УДК 621.771.01

Юрков К. Ю.  
Чуруканов А. С.  
Сатонин А. А.

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СИСТЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ПРОФИЛЯ И ФОРМЫ ПОЛОСЫ ПРИ ПРОКАТКЕ С ПЕРЕКРЕЩИВАНИЕМ РАБОЧИХ И ОПОРНЫХ ВАЛКОВ

Повышение качества и снижения себестоимости всегда были приоритетными для любой из отраслей промышленности. На сегодняшний день для металлургии Украины как никогда актуально снижение степени отбраковки готовой металлопродукции. В определённой мере недостаточный уровень качества влияет на общее состояние металлургии в целом, не всегда позволяя успешно конкурировать на мировых рынках, что и заставляет украинских производителей играть роль поставщиков сырья и заготовок, оставляя наиболее прибыльные переделы на долю европейских производителей.

В контексте производства тонколистового металлопроката основная отбраковка готовой продукции (до 60–65 %) происходит из-за несоответствия её макрогеометрических характеристик предъявляемым требованиям. Несмотря на заметный научно-технический прогресс в оснащении производства современными средствами технологического контроля и системами автоматического управления, новыми методами воздействия на точность, профиль и форму полос, открывающиеся возможности используются не в полной мере. Это, прежде всего, происходит потому, что зачастую выбор технологии и направление проектных разработок основан на интуитивных подходах или обобщении производственного опыта. Между тем, основой для объективности решений могут быть только углублённые знания о взаимном влиянии многочисленных факторов на качественные показатели готовой продукции.

Одним из путей повышения качества тонколистового металлопроката является применение на станах холодной прокатки способа регулирования профиля полосы путём перекрещивания осей рабочих и (или) опорных валков [1, 2]. При этом, с точки зрения снижения удельных капитальных затрат, экономии материальных ресурсов и уменьшения сроков окупаемости реализация данного способа является целесообразной, в первую очередь, по отношению к оборудованию действующих прокатных станов.

Целью данной работы является изучение и сопоставления основных показателей при реализации процесса прокатки с взаимным перекрещиванием валков клетки кварто.

Регулирующее воздействие метода заключается в том, что при изменении взаимной ориентации валков путём их взаимного перекрещивания межвалковый зазор посередине длины бочек остаётся неизменным, а к краям нелинейно увеличивается. Изменение угла перекрещивания в процессе прокатки позволяет целенаправленно изменять профиль межвалкового зазора в пределах, ограниченных только возникающими при этом осевыми нагрузками на валки.

Существуют три схемы перекрещивания валков в клетях кварто (рис. 1): попарно перекрещивающиеся валки – при этом геометрические оси верхнего и нижнего комплекта валков перекрещиваются, в то время как оси в каждом комплекте между рабочим и соответствующим ему опорным валком остаются неизменными (см. рис. 1, а); перекрещиваются только оси опорных валков, при этом оси рабочих остаются параллельными (см. рис. 1, б); перекрещиваются лишь оси рабочих валков, а оси опорных остаются параллельными (см. рис. 1, в) [2].

С целью изучения и сопоставления основных показателей при реализации процесса прокатки с перекрещиванием валков был проведен анализ эффективности регулирующего воздействия и диапазона регулирования для различных конструктивных схем, позволяющих осуществить изменение профиля межвалкового зазора, а также анализ изменения межвалкового давления в сравнении с традиционной схемой прокатки.

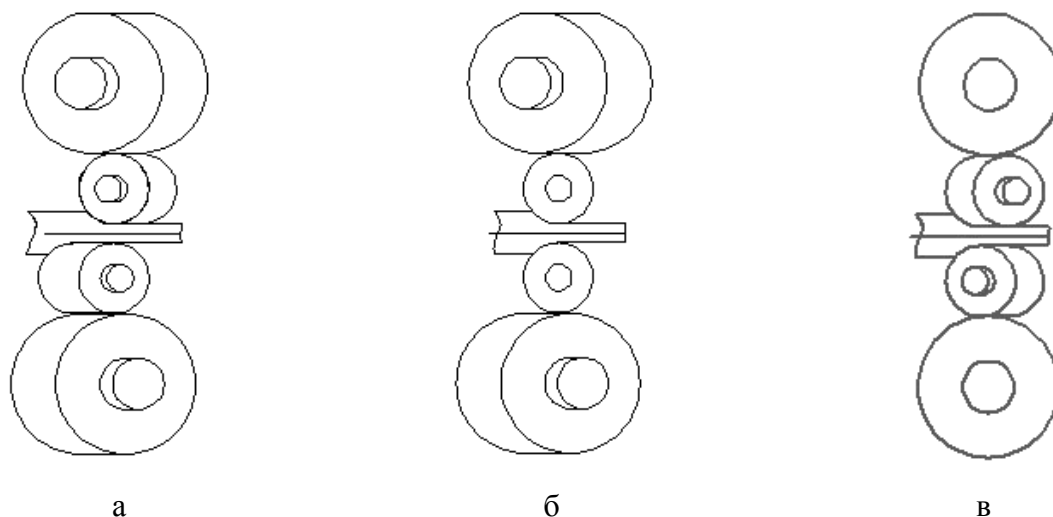
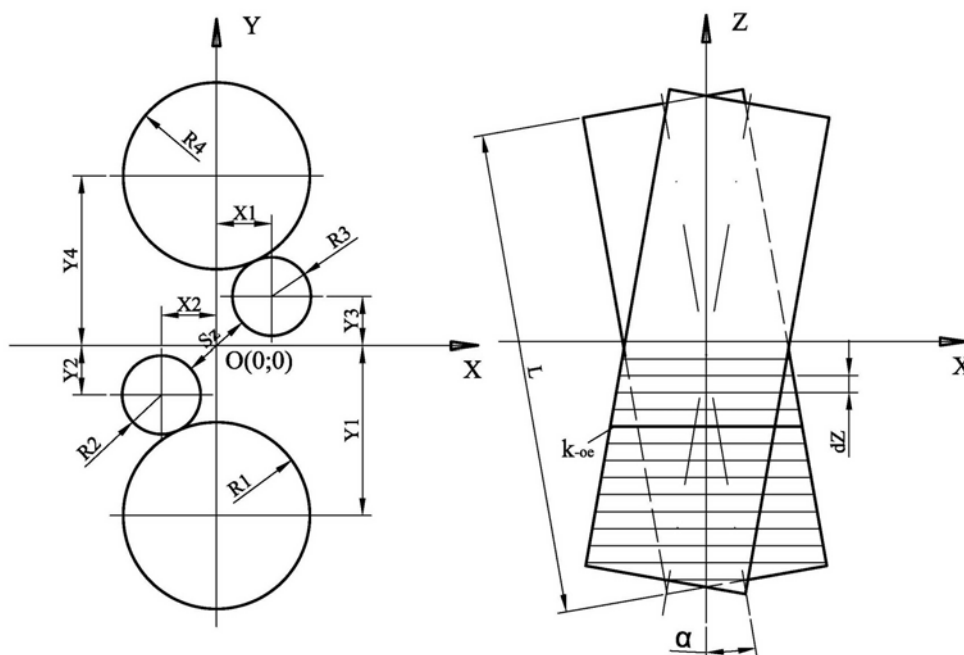


Рис. 1. Системы с перекрещивающимися валками

В ходе выполнения работы были просчитаны три вышеописанных способа перекрещивания на основе геометрического анализа по принятой расчётной схеме (рис. 2).

Рис. 2. Расчётная схема определения межвалкового зазора  $Sz$ 

Предварительно по длине бочки вала выделяются сегменты шириной  $dz$ . Учитывая симметричный характер изменения межвалкового зазора  $S$ , для сокращения вычислений возможно рассмотрение только половины длины бочки. Отсюда:

$$dz = L / 2 \cdot kr, \quad (1)$$

где  $L$  – длина бочки рабочего вала;

$kr$  – количество разбиений.

Тогда координата  $z$  в любом сечении будет равна:

$$z_k = dz \cdot k, \quad (2)$$

где  $z_k$  – координата  $z$  в  $k$ -ом сечении;

$k$  – порядковый номер сечения.

Межвалковый зазор определялся как кратчайшее расстояние между выделенными сегментами рабочих валков, исходя из координат центров соответствующих сегментов. За точку отсчёта принимаем точку с координатами  $(0, 0)$ , соответствующая точке, в которой валки сходятся в забой, и относительно неё, с учётом углов перекося, определяются координаты центров каждого сегмента.

Зададимся тем, что верхний рабочий и (или) опорный валки перекрещиваются по часовой стрелке, тогда координаты центров валков по оси  $X$  берутся со знаком «-», а нижние рабочий и (или) опорный валки против часовой стрелки, тогда координаты центров валков берутся со знаком «+». Определим координаты центров валков по осям  $X$  и  $Y$ :

$$\begin{aligned} X_1 &= -z_k \times \operatorname{tg} \alpha_1; \\ X_2 &= -z_k \times \operatorname{tg} \alpha_2; \\ X_3 &= z_k \times \operatorname{tg} \alpha_3; \\ X_4 &= z_k \times \operatorname{tg} \alpha_4; \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} Y_2 &= (2 \cdot R_1 + R_2) - \sqrt{(R_1 + R_2)^2 - (X_1 - X_2)^2}; \\ Y_3 &= (2 \cdot R_3 + R_4) - \sqrt{(R_3 + R_4)^2 - (X_3 - X_4)^2}, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $X_1, X_2, X_3, X_4, Y_1, Y_2, Y_3, Y_4$  – геометрические координаты осей вращения соответствующих рабочих и опорных валков;

$\alpha$  – угол перекрещивания;

$R_1, R_2, R_3, R_4$  – радиусы соответствующих валков.

Координаты  $Y_1$  и  $Y_4$  не изменяются в процессе перекрещивания и соответственно равны:

$$\begin{aligned} Y_1 &= -(R_1 + 2 \cdot R_2); \\ Y_4 &= R_4 + 2 \cdot R_3. \end{aligned} \quad (5)$$

Тогда, исходя из геометрических зависимостей, можем определить межвалковый зазор в данном сечении:

$$S_Z = \sqrt{(Y_3 - Y_2)^2 + (X_3 - X_2)^2} - R_2 - R_3. \quad (6)$$

На основе данной методики были рассчитаны межвалковые зазоры при трёх разных случаях перекрещивания для промышленно-лабораторного стана  $105/260 \times 300$ , который позволяет реализовать практически все возможные технологические схемы процессов холодной прокатки [3].

Полученные зависимости межвалкового зазора от угла перекрещивания представлены в графическом виде на рис. 3.

Проанализировав полученные зависимости, можно сделать вывод, что более рациональным и эффективным является способ перекрещивания только рабочих валков, поскольку в данном случае перекрещивание на тот же угол даёт больший эффект в плане регулирования.

Для определения эпюры межвалкового давления воспользуемся следующей методикой [4]: разбивая валок по длине на  $n$  частей, равных  $\Delta x = L/n$ , решаем вспомогательную задачу. Строим график зависимости  $q_{\text{сжм.}} = f(q)$ , используя для расчёта деформации сжатия (сближения осей) соприкасающихся цилиндров (валков) решение Б. С. Ковальского:

$$\delta = \frac{2q_M}{\pi} \left[ \frac{1 - g_1^2}{E_1} \left( \ln \frac{2R_1}{b} + 0,407 \right) + \frac{1 - g_2^2}{E_2} \left( \ln \frac{2R_2}{b} + 0,407 \right) \right], \quad (7)$$

где  $\delta$  – деформация сжатия (сближения осей) соприкасающихся цилиндров (валков);  
 $b$  – полуширина площадки контакта валков;

$$b = 1128 \sqrt{\eta q_M \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}}; \quad \eta = \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2}, \quad (8)$$

где  $\nu_1, \nu_2, E_1, E_2, R_1, R_2$  – соответственно коэффициенты Пуассона, модули упругости и радиусы соприкасающихся цилиндров (валков);  $q_M = P/L$  – погонная нагрузка на единицу длины валков.

При данном подходе деформация сжатия (сближения осей) будет соответствовать расстоянию, на которое необходимо сблизить оси валков, чтобы контакт произошёл по всей длине, т. е. будет зависеть от профиля контакта между рабочим и опорным валком, или от угла перекрещивания.

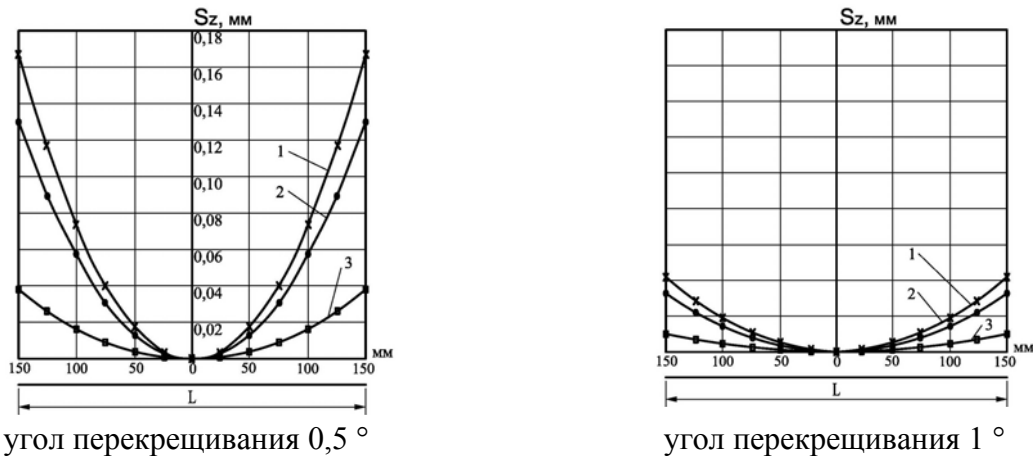


Рис. 3. Расчетные распределения межвалкового зазора для различных схем перекрещивания: 1 – только рабочие; 2 – попарно; 3 – только опорный

Затем по графику зависимости  $q_{всп. n} = f(q)$  получаем значения межвалкового давления  $q_{всп. n}$  для каждой части  $n$ .

Уменьшив силу прокатки на силу, требуемую для сближения валков по всей длине бочки, нужно из оставшейся силы рассчитать межвалковое давление  $q_M$  для цилиндрических валков.

Исходя из геометрических данных валкового узла, имеем [4]:

$$q_m = a_0 + 4a_2(\xi - 0,5)^2; \quad (9)$$

$$\text{где } a_0 = \frac{(8252 - 34\alpha)q_{M.CP} - 13440B_0\alpha}{13440 + 29\alpha};$$

$$a_2 = 3(q_{M.CP} - a_0);$$

$$q_{M.CP} = P/L;$$

$$B_0 = \frac{q_{II}}{120}(\beta_k^5 - \beta_n^5) - \frac{q_{II}}{96}(\beta_k - \beta_n) - \frac{q_{II}}{24}(0,5 - \beta_n)^4;$$

$$\beta_n = l_n/L;$$

$$\beta_k = l_k/L;$$

$$q_{II} = P/B;$$

$$\alpha = \frac{1 - \nu_{раб}^2}{1 - \nu_{он}^2} \cdot \frac{E_{он}}{E_{раб}} \times \left[ \left( 3260 \frac{L}{D_{он}} - 38,5 \right) \left( \frac{D_{раб}}{D_{он}} \right)^2 - \left( 5330 \frac{L}{D_{он}} - 127 \right) \left( \frac{D_{раб}}{D_{он}} \right) + \left( 2300 \frac{L}{D_{он}} - 127 \right) \right].$$

Если наложить полученные эпюры межвалкового давления, получим суммарную картину распределения межвалкового давления на контакте между рабочим и опорным валками. Результаты приведены на рис. 4.

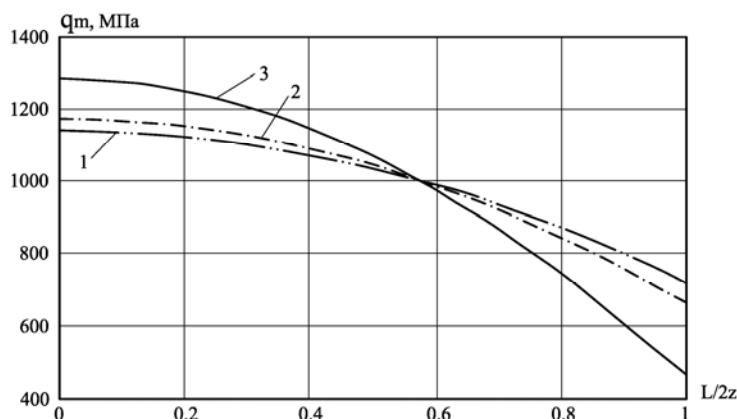


Рис. 4. Результаты расчёта межвалкового давления в зависимости от угла перекрещивания осей между рабочим и опорным валками:

1 – 0,00 °; 2 – 0,5 °; 3 – 1,0 °

### ВЫВОДЫ

Наиболее рациональным является использование схемы одновременного перекрещивания комплекта рабочего и опорного валков. Это становится очевидным ввиду того, что при перекрещивании только рабочего валка, помимо максимально возможных для рассматриваемых схем диапазона и степени изменения профиля межвалкового зазора, наблюдается достаточно существенное возрастание межвалкового давления между рабочим и опорным валком, что чревато неравномерным износом валкового узла и сокращением его срока службы. Перекрещивание только опорного валка представляется наименее целесообразным ввиду того, что при наименьшем диапазоне изменения профиля межвалкового зазора данный способ обладает теми же недостатками, что и способ с перекрещиванием только рабочего валка. Использование перекрещивания комплекта рабочего и опорного валков является компромиссным в плане диапазона регулирования профиля межвалкового зазора и, ко всему, не приводит к изменению эпюры межвалкового давления в сравнении с валковым узлом кварто без перекрещивания.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Совершенствование производства холоднокатаной листовой стали / Ю. Д. Железнов, В. А. Чёрный, А. П. Кошка, Л. А. Кузнецов, В. А. Кляпицын. – М. : Металлургия, 1982. – 232 с.
2. Управление качеством тонколистового проката / В. Л. Мазур, А. М. Сафьян, И. Ю. Приходько, А. И. Яценко. – К. : Техника, 1997. – 384 с.
3. Реконструкция и исследование механического оборудования промышленно-лабораторного стана 55/260 × 200 / В. Ф. Потапкин, В. А. Федоринов, А. В. Сатонин [и др.] // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні. – Краматорськ-Слов'янськ : ДДМА. – 2000. – С. 5–10.
4. Целиков А. И. Машины и агрегаты металлургических заводов. В 3-х томах. Т. 3. Машины и агрегаты для производства и отделки проката : учебник для вузов / А. И. Целиков, П. И. Полухин, В. М. Гребенник [и др.] – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Металлургия, 1988. – 680 с.

Юрков К. Ю. – инженер ДГМА;  
Чуруканов А. С. – аспирант ДГМА;  
Сатонин А. А. – студент ДГМА.

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.

E-mail: amm@dgma.donetsk.ua