



УДК 621.771.01

DOI 10.17073/0368-0797-2023-3-283-289



Оригинальная статья

Original article

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА РАБОЧИХ ВАЛКОВ СТАНА ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ С ЦЕЛЮ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ РАСЧЕТА ТЕМПЕРАТУР ПОВЕРХНОСТЕЙ ИХ БОЧЕК

Д. Л. Шалаевский

■ Череповецкий государственный университет (Россия, 162600, Вологодская обл., Череповец, пр. Луначарского, 5)

✉ shal-dmitrij@yandex.ru

Аннотация. Тепловой режим бочки рабочего вала непрерывного стана горячей прокатки – значимый фактор технологии, который влияет на качество формы стальной полосы, ее поперечное сечение, стойкость рабочих валков. Достоверный расчет параметров температурного режима позволяет определить форму теплового профиля и наилучшую профилировку поверхности бочки вала, добиться уменьшения дефектов планшетности готового проката. Наиболее распространенной является балансная модель теплового режима вала, точность которой в значительной степени определяется теплофизическими постоянными, в частности коэффициентами теплообмена валков: контактного – с полосой и конвективного – с охлаждающей водой. Имеются различные сведения о значениях и методах расчета этих коэффициентов, но большинство из них не учитывают наличие пауз в ритме прокатки чистой группы клетей, длительность которых значительна. Отсутствие учета этого фактора влечет за собой существенные ошибки в расчетах теплового режима бочки вала. Проведен пассивный эксперимент, в ходе которого с помощью термопары измерены температуры поверхностей бочек рабочих валков в нескольких точках по их длине сразу же после вывалки. Также определены параметры прокатки стальных полос перед перевалкой: коэффициенты ритма прокатки, обжатия полосы в клетях, расходы воды на охлаждение валков и некоторые другие параметры. В результате получено эмпирическое уравнение для расчета коэффициента контактного теплообмена, учитывающее основные факторы технологии, в том числе длительность пауз в ритме прокатки. Использование уточненных коэффициентов для расчета температур бочки вала значительно повысило точность прогнозирования теплового режима, в частности теплового профиля рабочего вала, по значениям параметров прокатки.

Ключевые слова: непрерывный стан, тепловой режим, горячая прокатка, стальные полосы, плоскостность, форма поперечного профиля, коэффициент контактного теплообмена, бочка рабочего вала, температура поверхности, тепловой профиль, уравнения теплового баланса

Для цитирования: Шалаевский Д.Л. Исследование теплового режима рабочих валков стана горячей прокатки с целью повышения точности расчета температур поверхностей их бочек. *Известия вузов. Черная металлургия.* 2023;66(3):283–289.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-3-283-289>

INVESTIGATION OF THERMAL MODE OF HOT-ROLLING MILL WORKING ROLLS IN ORDER TO IMPROVE THE ACCURACY OF CALCULATING THE THERMAL PROFILE OF THEIR BARRELS' SURFACE

D. L. Shalaevskii

■ Cherepovets State University (5 Lunacharskogo Ave., Cherepovets, Vologda Region 162600, Russian Federation)

✉ shal-dmitrij@yandex.ru

Abstract. Thermal mode of the working roll barrel in a hot-rolling mill is a significant technological factor that affects the steel strip quality, its cross section, and durability of working rolls. A reliable calculation of the temperature mode parameters makes it possible to determine the thermal profile shape and the best profiling of the roll barrel surface, as well as to reduce defects in steel strip flatness. The most common is the balance model of roll thermal mode. Its accuracy is largely determined by thermophysical constants, in particular, the heat transfer coefficients of the rolls: contact – with the strip and convective – with cooling water. There are various data on the values and methods for calculating these coefficients, but most of them do not take into account the presence of pauses in rolling rhythm of the finishing group of stands, the duration of which is significant. Failure to take this factor into account entails significant errors in calculations of the thermal mode. A passive experiment was carried out, during which surface temperatures of the working rolls' barrels were measured using a thermocouple at several points along their length immediately after they fell out. Also, the parameters of steel strip rolling before roll change were determined: rolling rhythm coefficients, strip reduction in stands, water consumption for cooling rolls and some others. As a result, an empirical equation was obtained for calculating the contact heat transfer coefficient, taking into

account the main technological factors. The use of refined coefficients for calculating the temperatures of the roll barrel significantly increased the accuracy of predicting the thermal mode, in particular, the thermal profile of the working roll, based on values of the rolling parameters.

Keywords: CCM, thermal mode, continuous hot rolling, steel strip, flatness, cross section shape, contact heat transfer coefficient, working roll barrel, surface temperature, thermal profile, balance equations

For citation: Shalaevskii D.L. Investigation of thermal mode of hot-rolling mill working rolls in order to improve the accuracy of calculating the thermal profile of their barrels' surface. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2023;66(3):283–289.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-3-283-289>

ВВЕДЕНИЕ

Проблеме исследования теплового профиля бочки рабочего валка непрерывного стана прокатки стальных полос уделяется достаточное внимание в периодической литературе, что говорит об актуальности рассматриваемого вопроса. В работе [1] изложена методика теплового расчета валков широкополосного стана горячей прокатки (ШПСГП), основанная на уравнениях теплового баланса рабочих и опорных валков с учетом их теплообмена друг с другом, полосой, охлаждающей водой и окружающей средой. Точность модели в большей степени будет определяться значениями коэффициентов теплообмена, которые в свою очередь рассчитываются по эмпирическим формулам. В качестве недостатка модели можно отметить невысокую точность учета пауз в ритме прокатки. Учет пауз предлагается осуществлять путем простого умножения доли машинного времени в ритме прокатки на расчетную величину температуры поверхности бочки. При значительных паузах в ритме прокатки расчет по предложенной методике приводит к ошибочным результатам. В качестве достоинства упомянутой модели можно отметить ее относительную простоту использования, достаточную обоснованность и высокий потенциал для совершенствования.

В исследовании [2] рассмотрена упрощенная методика расчета теплового профиля рабочих валков стана горячей прокатки. Методика основана на точном решении уравнения теплопроводности и измерении распределения температуры вдоль бочки рабочих валков после вывалки.

В докладе [3] представлен опыт изменения конструкции коллекторов системы охлаждения с целью снижения температур бочки рабочих валков до допустимого уровня. В указанном докладе, однако, отсутствует теоретическое обоснование выбранного принципа реконструкции и возможность распространения аналогичного принципа на конструкцию систем охлаждения других прокатных станов.

Решение проблемы прогнозирования теплового профиля поверхности бочки рабочего валка является важным, так как этот тепловой профиль может оказать значительное влияние на форму поперечного сечения полосы и качество ее формы [4]. Опыт расчетов показывает, что для этой цели могут быть применены результаты уже упомянутой работы [3], адаптированные для условий рабочих клетей конкретного стана с учетом реальной длительности пауз во время прокатки.

Проблема прогнозирования теплового состояния бочки прокатных валков широкополосных станов поднимается в большом количестве научных трудов.

В работе [5] приведены результаты численного моделирования температурного режима полосы. Исследование проводилось в стационарном режиме. Рабочие валки были представлены в виде двух полых цилиндров, получающих теплоту за счет контакта с заготовкой и охлаждаемых за счет конвекции на ее внешней поверхности и поверхности осевого отверстия. В работе определена зависимость теплового поведения валка от скорости вращения цилиндра и условий теплообмена с окружающей средой.

В публикации [6] представлены результаты исследования нестационарного теплового поля валка в различные моменты времени его работы. Принималось, что теплообмен происходит только по поверхности валка. Полученная по результатам изысканий модель теплового поля позволяет предсказывать температуру в любой точке объема исследуемого валка.

В статье [7] описывается математическая модель, которая в режиме реального времени позволяет рассчитать температуру и тепловое расширение рабочих валков полосовых станов горячей прокатки. Эти результаты используются в экспертной системе, которая управляет подачей охлаждающей воды на бочки рабочих валков.

В исследовании [8] определен коэффициент теплопередачи при горячей прокатке алюминий-магниевого сплава на лабораторном стане. Температура раската измерялась с помощью термопар, размещенных внутри материала. Путем обратного расчета по модели получены значения коэффициента в диапазонах от 200 до 450 кВт/(м²·°C).

В работе [9] авторы разработали конечно-разностную модель для моделирования тепловых расширений рабочих валков CVC при горячей прокатке полосы. При моделировании учитывалось влияние тепловыделения, возникающего в результате деформации и трения полосы, а также конвективного теплообмена с окружающей средой.

Прогнозирование распределения температуры в рабочих валках в процессе горячей прокатки слябов имеет большое значение для проектировщиков стана. В работе [10] проведена оценка зависимости температуры валков и коэффициентов теплообмена в условиях горячей прокатки. С помощью дифференциального уравнения теплопроводности цилиндра получена модель нестационарного теплового режима, позволив-

шая с достаточной точностью оценить температуры рабочих валков.

В работе [11] исследованы дефекты поверхности бочки рабочих валков, вызванные температурными напряжениями. Термические повреждения бочек рабочих валков стана горячей прокатки изучены с использованием лабораторной испытательной установки в условиях, соответствующих условиям первых клетей. Исследования выполнены для валков, изготовленных из двух марок стали: быстрорежущей инструментальной и высокоуглеродистой хромистой. Разработана модель, основанная на методе конечных элементов, для прогнозирования распределения температуры по объему прокатного валка.

В материалах статьи [12] представлен подход на основе метода конечных элементов для анализа термомеханического поведения материала валков при горячей прокатке полосы.

В работе [13] изучено влияние теплового режима прокатных валков на износ поверхности их бочки.

В исследовании [14] предпринята попытка изучения распределения температурного поля в прокатном валке при его взаимодействии с полосой в процессе холодной прокатки. По результатам применения метода конечных элементов предложена методология моделирования неоднородного теплового потока на границе раздела бочка валка – полоса.

В монографии [15] выполнен обзор известных математических моделей теплового режима и охлаждения валков широкополосных станов горячей прокатки. Представлена методика расчета системы охлаждения валков. Описана процедура адаптации расчетных моделей и методик к параметрам действующего стана.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Распределение температуры поверхности бочки рабочих валков в большинстве случаев имеет симметричный относительно середины бочки характер. Отмечается [1], что на длине, равной около 2/3 средней ширины полосы, в середине бочки температура почти одинаковая. На участках у кромки полосы температура поверхности бочки несколько снижается, а у торцов бочки эта температура лишь на несколько градусов выше температуры воды, подаваемой на охлаждение. Таким образом, для точного прогнозирования теплового профиля бочки рабочего валка необходимо знать достоверные температуры бочки в ее середине. Определить эти температуры позволяет ряд существующих моделей теплового поля.

Известна балансная модель [16; 17], которая позволяет определить интересующие температуры поверхности бочки рабочих валков в ее середине в клетях «кварто».

Данная модель основана на использовании уравнений теплового баланса бочек рабочего и опорного

валков, составленных из допущения, что усредненное температурное поле за отрезок времени, равный ритму прокатки, остается неизменным. Таким образом, все получаемое количество тепловой энергии передается далее контактным теплообменом опорному валку и конвективным теплообменом охлаждающей воде или окружающей среде.

Схема тепловых потоков в радиальной плоскости валков в клети «кварто» представлена на рис. 1. Согласно рис. 1 и описанному принципу теплового обмена валков друг с другом, с охлаждающей водой и окружающей средой, тепловой баланс при описанном квазистационарном режиме может быть представлен двумя уравнениями:

– для рабочего валка:

$$Q_p - Q_{охл.р}^{вх} - Q_{охл.р}^{вых} - Q_{оп} = 0; \tag{1}$$

– для опорного валка:

$$Q_{оп} - Q_{охл.оп} - Q_{окр.оп} = 0. \tag{2}$$

В этих уравнениях использованы следующие обозначения количества теплоты: Q_p – поступившей в рабочий валок от полосы путем контактного и (частично) лучистого теплообмена; $Q_{охл.р}^{вх}$ и $Q_{охл.р}^{вых}$ – отведенной от

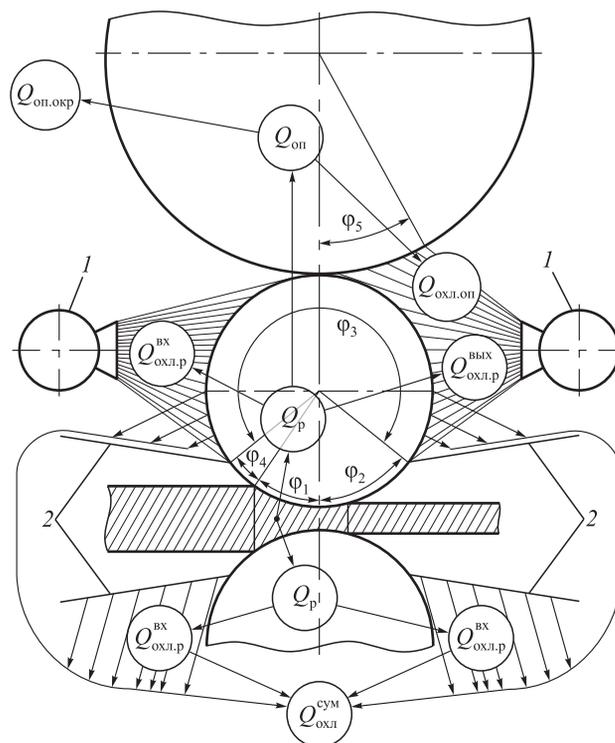


Рис. 1. Схема тепловых потоков в клети «кварто»: 1 – коллектор с форсунками системы охлаждения валков; 2 – проводки-отсекатели воды от прокатываемой полосы

Fig. 1. Scheme of heat flows in the “quarto” stand: 1 – collector with nozzles of the roll cooling system; 2 – wiring-water cutters from the rolled strip

рабочего валка охлаждающей водой с входной и выходной сторон рабочей клетки; $Q_{оп}$ – переданной от рабочего валка к опорному путем контактного теплообмена; $Q_{охл.оп}$ – отведенной от опорного валка охлаждающей жидкостью; $Q_{окр.оп}$ – отданной опорным валком окружающей среде (воздуху).

После подстановки в представленные уравнения составляющих теплового баланса они могут быть сведены к системе двух линейных уравнений относительно неизвестных средних температур рабочего и опорного валков $t_{ср.р.i}$, $t_{ср.оп.i}$:

$$\begin{cases} A_1 t_p + B_1 t_{оп} = D_1; \\ A_2 t_p + B_2 t_{оп} = D_2. \end{cases}$$

Коэффициентами системы обозначены выражения:

$$\left. \begin{aligned} A_1 &= \alpha_{кт.р} l_{ci} + \frac{\pi - \varphi_4 - \varphi_1}{2} D_{pi} \alpha_{1pi}^{вх} + \\ &+ \frac{\pi - \varphi_2}{2} D_{pi} \alpha_{1pi}^{вых} + \alpha_{кт.оп} b_{оп.i}; \\ A_2 &= B_1 = -\alpha_{кт.оп} b_{оп.i}; \\ B_2 &= \frac{\varphi_5}{2} D_{оп.i} \alpha_{1оп} + \alpha_{кт.оп} b_{оп.i} + (2\pi - \varphi_5) \frac{D_{оп.i}}{2} \alpha_{окр.оп}; \\ D_1 &= \alpha_{кт.р} l_{ci} t_{п} + \frac{\pi - \varphi_4 - \varphi_1}{2} D_{pi} \alpha_{1pi}^{вх} t_{охл.1} + \\ &+ \frac{\pi - \varphi_2}{2} D_{pi} \alpha_{1pi}^{вых} t_{охл.1}; \\ D_2 &= \frac{\varphi_5}{2} D_{оп.i} \alpha_{1оп} t_{охл.1} + (2\pi - \varphi_5) \frac{D_{оп.i}}{2} \alpha_{окр.оп} t_{окр}. \end{aligned} \right\}$$

В этих формулах приняты следующие обозначения входящих величин:

– коэффициенты теплоотдачи контактным теплообменом: $\alpha_{кт.р}$ – от полосы к рабочему валку; $\alpha_{кт.оп}$ – от рабочего валка к опорному;

– коэффициенты теплоотдачи конвективным теплообменом: $\alpha_{1pi}^{вх}$, $\alpha_{1pi}^{вых}$ – от рабочих валков к охлаждающей воде на входной и выходной сторонах рабочей клетки; $\alpha_{1оп}$ – от опорных валков к охлаждающей воде; $\alpha_{окр.оп}$ – от опорных валков к воздуху (размерность всех коэффициентов теплоотдачи Вт/(м²·°C));

– углы по окружностям бочек рабочего и опорных валков, ограничивающих зоны с разными коэффициентами теплоотдачи: $\varphi_1 - \varphi_5$ в радианах (рис. 1);

– остальные величины: D_{pi} , $D_{оп.i}$ – диаметры в середине бочки рабочего и опорного валков i -й клетки, м; l_{ci} – длина очага деформации i -й клетки, м (вычисляется заранее в модели усилия прокатки, изложенной выше); $b_{оп.i}$ – ширина площадки упругого контакта между рабочим и опорным валками, м (вычисляется по формуле Герца из теории упругости); $t_{охл.1}$ – температура охлаждающей воды, подаваемой на валки, °C; $t_{вых.i}$ – температура полосы на выходе из очага деформации i -й клетки

(рассчитывается заранее по формулам частной модели температуры полосы, изложенной выше); $t_{окр}$ – температура окружающей среды (воздуха), °C.

Решение системы уравнений теплового баланса рабочего и опорного валков может быть найдено методом Крамера в виде:

$$\left. \begin{aligned} t_p &= \frac{B_2 D_1 - B_1 D_2}{A_1 B_2 - A_2 B_1}; \\ t_{оп} &= \frac{A_1 D_2 - A_2 D_1}{A_1 B_2 - A_2 B_1}. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Наиболее важными параметрами, влияющими на достоверность расчета температур валков, являются теплофизические постоянные – коэффициенты контактного и конвективного теплообменов: $\alpha_{кт.р}$, $\alpha_{кт.оп}$, $\alpha_{1pi}^{вх}$, $\alpha_{1pi}^{вых}$, $\alpha_{1оп}$, $\alpha_{окр.оп}$.

Расчетные формулы для определения коэффициентов конвективного теплообмена и конкретные значения этих коэффициентов $\alpha_{1pi}^{вх}$, $\alpha_{1pi}^{вых}$, $\alpha_{1оп}$, $\alpha_{окр.оп}$ представлены в работах [16; 17]. Так, коэффициенты конвективного теплообмена опорного валка и охлаждающей воды, опорного валка и окружающей среды по данным этих работ составят соответственно: $\alpha_{1оп} = 1500$ Вт/(м²·°C); $\alpha_{окр.оп} = 400$ Вт/(м²·°C), а коэффициент контактного теплообмена опорного валка и рабочего $\alpha_{кт.оп} = 40$ кВт/(м²·°C).

Коэффициент конвективного теплообмена рабочего валка и охлаждающей воды может быть определен по формуле [17]

$$\alpha_{1р.вх} \approx \alpha_{1р.вых} = 21V_{11} + 21\,000p_{охл} - 0,04V_{11}^2 - 71p_{охл}^2 - 14\,590, \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{°C)}, \quad (4)$$

где V_{11} – плотность облива поверхности бочки по ширине полосы $\left(V_{11} = \frac{V}{\varphi_3 R b_{п}}, \text{ м}^3/(\text{с}\cdot\text{м}^2), V - \text{ суммарный} \right.$

расход воды, подаваемой на рабочие валки i -й клетки, м³/с; $b_{п}$ – ширина полосы, м); $p_{охл}$ – давление воды в системе охлаждения при подаче на поверхность рабочих валков, атм.

Коэффициент контактного теплообмена валка и полосы $\alpha_{кт.р}$, очевидно, будет зависеть от:

– длины очага деформации, определяемой опосредовано контактными напряжениями;

– продолжительности контакта полосы и бочки валка в ритме прокатки, которая может быть выражена коэффициентом ритма прокатки: $K_{ритма} = \frac{\tau_m}{\tau_m + \tau_{п}}$ (τ_m –

машинное время работы стана, с; $\tau_{п}$ – время пауз, когда в очаге деформации нет полосы, с);

– диаметра бочки валка (диаметр бочки валка в условиях конкретного стана и клетки будет неизменным);

– наличия окалины между материалом полосы и поверхностью валка.

Стоит отметить, что достоверное определение коэффициента контактного теплообмена $\alpha_{кт,р}$ в значительной степени определит точность расчета температуры рабочего валка и зависящих от него параметров теплового режима.

Выражение для $\alpha_{кт,р}$ может быть найдено на основании опытных данных, содержащих значения технологических и энергосиловых параметров процесса прокатки и конструктивных параметров клети, а также результаты опытного определения температур поверхности бочки валка.

Подобные исходные данные для определения коэффициента $\alpha_{кт,р}$ для условий непрерывной чистой группы клетей широкополосного стана горячей и холодной прокатки были определены из ряда источников [16 – 18]. Температуры поверхностей бочек рабочих валков, указанные в литературных источниках, измерялись с помощью термопары сразу после извлечения рабочих валков из клети. Гистограммы распределения температур в середине длины бочек рабочих валков по клетям чистой группы широкополосного стана 2000 представлены на рис. 2.

Из приведенных данных можно увидеть тенденцию по снижению температур бочек рабочих валков от первой клети чистой группы к последней, что может быть объяснено уменьшением температуры полосы в этих клетях. Исключение представляют вторая и третья клети, в которых, как следует из рис. 3, средние значения расходов воды, подаваемой на поверхности бочек валков, являются наибольшими в сравнении с расходами воды в других клетях.

Для определения уравнения, с помощью которого может быть найден коэффициент контактного теплообмена поверхности рабочего валка и поверхности полосы, были подобраны значения упомянутых коэффициентов, использование которых в балансной модели теплового режима обеспечит минимальное расхождение измеренных и расчетных температур. Далее методом регрессионного анализа определено наилуч-

шее уравнение, которое обеспечит расчет коэффициента $\alpha_{кт,р}$, проведена оценка значимости влияющих факторов и адекватности найденного выражения.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Методами регрессионного анализа экспериментальных данных получено уравнение, позволяющее определять коэффициент контактного теплообмена рабочих валков и стальной полосы в очагах деформации рабочих клетей чистой группы ШПСГП. Уравнение имеет следующий вид:

$$\alpha_{кт,р} = 6,6 p_{срi} + 10^3(70,7K_{ритма} - 48,2K_{ритма}^2 - 22,75), \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C}),$$

где $p_{срi}$ – среднее контактное давление в очаге деформации; $K_{ритма}$ – коэффициент ритма прокатки.

Диапазоны изменения значений параметров, по которым определялось выражение для расчета $\alpha_{кт,р}$, составили: $K_{ритма} = 0,46 - 0,90 \text{ б/р}$; $p_{срi} = 200 - 600 \text{ МПа}$.

В представленное уравнение включены только значимые факторы, установленные критерием Стьюдента t и уровнем значимости α .

Адекватность модели коэффициента теплообмена проверена с помощью критерия Фишера. Проверка достоверности балансной модели валков с использованием найденного уравнения для коэффициента уравнений $\alpha_{кт,р}$ на статистически значимом массиве данных показала, что средняя погрешность расчета величин $t_{ср,pi}$ (расхождения между измеренными и рассчитанными значениями) составила 8,01 %, максимальная – 16,7 %, минимальная – 1,53 %, показатель $R^2 = 0,87$.

Таким образом, найденное выражение для коэффициента контактного теплообмена, благодаря достоверности, позволяет использовать балансную модель для поиска теплового профиля валков рабочих клетей

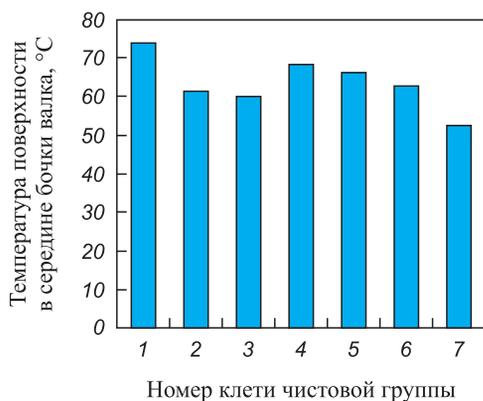


Рис. 2. Температуры поверхностей бочек рабочих валков в клетях чистой группы

Fig. 2. Temperatures of the working rolls barrels' surfaces in the stands of finishing group

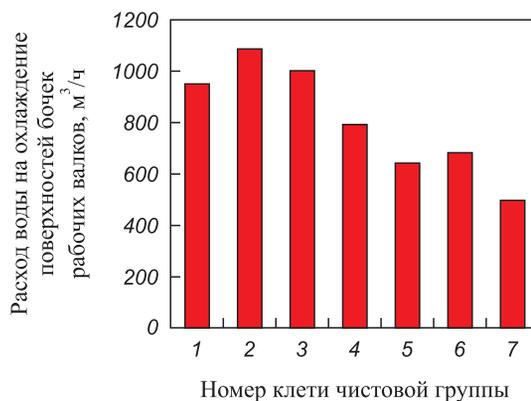


Рис. 3. Расходы воды на охлаждение поверхностей бочек рабочих валков в клетях чистой группы

Fig. 3. Water consumption for cooling the working rolls barrels' surfaces in the stands of finishing group

НШПСГП в расчетах (например, поперечного профиля или плоскостности готовой полосы или наилучшей формы исходной профилировки поверхности бочки рабочего валка) [19]. Также такой подход может быть использован для оценки поперечного профиля холоднокатанных полос [20].

Опытные данные в сочетании с найденной зависимостью позволили оценить уровень влияния ритма прокатки и контактного давления на интенсивность теплообмена рабочего валка и полосы (рис. 4). Коэффициент ритма прокатки и контактное давление, изменяющиеся в допустимых технологией диапазонах, способны существенно изменить коэффициент контактного теплообмена и, следовательно, поменять тепловой профиль валка. Наиболее значимое влияние на теплообмен полосы и поверхности бочки рабочего валка оказывает ритм прокатки. Это влияние особенно сильно проявляется при коэффициенте ритма прокатки менее 0,6.

Выводы

Тепловой режим бочки рабочего валка стана горячей прокатки – значимый фактор технологии, который влияет на качество формы стальной полосы, ее поперечное сечение и стойкость рабочих валков. Достоверный расчет параметров температурного режима позволит определить форму теплового профиля и наилучшую профилировку поверхности бочки валка, добиться уменьшения дефектов планшетности готового проката. Наиболее распространенной является балансная модель теплового режима валка, точность которой в значительной степени определяется теплофи-

зическими постоянными, в частности коэффициентами теплообмена валков: контактного – с полосой и конвективного – с охлаждающей водой. В литературе встречаются различные сведения о значениях и методах расчета этих коэффициентов, но большинство из них не учитывают наличие пауз в ритме прокатки чистой группы клетей, которые имеют большую продолжительность. Отсутствие учета этого фактора влечет за собой значительные ошибки в расчетах теплового режима бочки валка.

Проведен пассивный эксперимент, в ходе которого с помощью термопары измерены температуры поверхности бочки рабочих валков в нескольких точках по их длине сразу же после вывалки. Также определены параметры прокатки стальных полос перед перевалкой: коэффициенты ритма прокатки, обжатия полосы в клетях, расходы воды на охлаждение валков и некоторые другие параметры. В результате получено эмпирическое уравнение для расчета коэффициента контактного теплообмена, учитывающее основные факторы технологии, в том числе длительность пауз в ритме прокатки. Использование уточненных выражений для поиска теплофизических коэффициентов, необходимых для расчета температур бочки валка, значительно повысит точность прогнозирования теплового режима.

Установлено, что коэффициент ритма прокатки и контактное давление, изменяющиеся в допустимых технологией диапазонах, способны существенно изменить коэффициент контактного теплообмена и, следовательно, поменять тепловой профиль бочки. Причем наиболее значимое влияние на теплообмен полосы и поверхности бочки рабочего валка оказывает ритм прокатки. Это влияние особенно сильно проявляется при коэффициенте ритма прокатки менее 0,6.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Гарбер Э.А., Хлопотин М.В., Траино А.И., Попов Е.С., Савиных А.Ф. Моделирование теплового режима валков широкополосного стана горячей прокатки для определения эффективных режимов их охлаждения. *Металлы*. 2009;(3):34–47.
Garber E.A., Khlopotin M.V., Traino A.I., Popov E.S., Savinykh A.F. Simulation of the thermal conditions of rolls in a wide-strip hot-rolling mill to determine their effective cooling conditions. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2009;(3): 208–219.
2. Бельский С.М., Мазур И.П., Астахов А.А. Упрощенная методика вычисления тепловой профилировки рабочих валков стана горячей прокатки. *Производство проката*. 2018;(2):3–6.
Bel'skii S.M., Mazur I.P., Astakhov A.A. Simplified computational procedure of thermal profiling of working rolls of hot-rolling mill. *Proizvodstvo prokata*. 2018;(2):3–6. (In Russ.)
3. Антонюк В.В., Федин А.Г., Мустафин В.А., Дема Р.Р., Платов С.И., Амиров Р.Н., Колдин А.В. Харченко М.В.

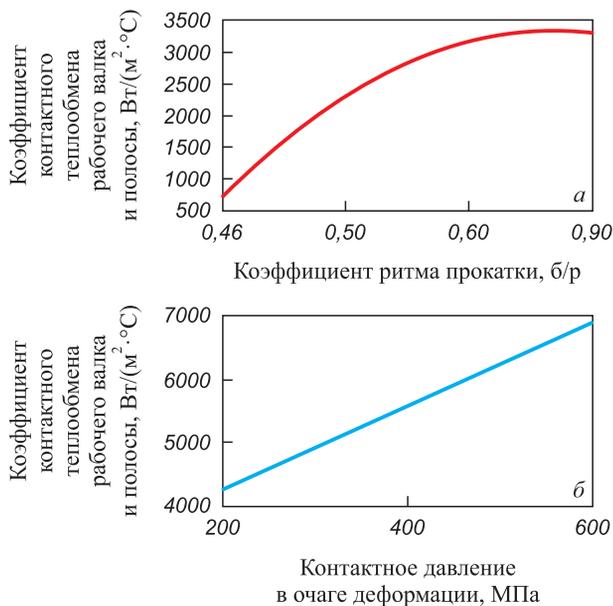


Рис. 4. Влияние факторов прокатки на коэффициент контактного теплообмена

Fig. 4. Influence of rolling factors on the coefficient of contact heat transfer

- Опыт настройки и управления тепловым состоянием рабочих валков широкополосного стана 2000 горячей прокатки ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат». *Материалы XI Международного конгресса прокатчиков. Том 2*. 2017.
4. Гарбер Э.А., Мишнев П.А., Шалаевский Д.Л., Палигин Р.Б., Михеева И.А., Болобанова Н.Л. Новые методы моделирования и уменьшения неплоскостности стальных полос при горячей прокатке на широкополосных станах. *Материалы Международного научного семинара «Научно-технический прогресс в металлургии – 2013»*. 2014:70–82.
 5. Hamraoui M. Thermal behaviour of rollers during the rolling process. *Applied Thermal Engineering*. 2009;29(11–12): 2386–2390.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2008.12.013>
 6. Johnson R.E., Keanini R.G. An asymptotic model of work roll heat transfer in strip rolling. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1995;41(6–7):871–879.
[https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(97\)00175-0](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(97)00175-0)
 7. Campos A.M., Garcia D.F., Usamentiaga R., de Abajo N., Gonzalez J.A. Real time model for the intelligent control of cooling systems for hot strip mill work rolls. *26th Annual Conference of the IEEE*. 2000.
<https://doi.org/10.1109/IECON.2000.972272>
 8. Hlady C.O., Brimacombe J.K., Samarasekera I.V., Hawbolt E.B. Heat transfer in the hot rolling of the metal. *Metallurgical and Material Transactions B*. 1995;26:1019–1027.
<https://doi.org/10.1007/BF02654104>
 9. Zhang X.M., Yiang Z.Y., Tieu A.K., Liu X.N., Wang G.D. Numerical modeling of the thermal deformation of CVC work rolls in hot strip rolling. *Journal of Material Processing Technology*. 2002;130–131:219–223.
[https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00736-7](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00736-7)
 10. Serajzadeh S., Karemi Taheri A., Mucciardi F. Unsteady state work-roll temperature distribution during continuous hot slab rolling. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2002;44(12):2447–2462.
[https://doi.org/10.1016/S0020-7403\(02\)00179-0](https://doi.org/10.1016/S0020-7403(02)00179-0)
 11. Mercado-Solis R.D., Talamantes-Silva J., Beynon J.H., Hernandez-Rodriguez M.A.L. Modelling surface thermal damage to mill rolls. *Wear*. 2007;263(17–20):1560–1567.
<https://doi.org/10.1016/j.wear.2006.12.062>
 12. Hwang S.M., Sun C.G., Ryoo S.R., Kwak W.J. An integrated FE process model for prevision analysis of the thermo-mechanical behaviours of rolls and strip in hot strip rolling. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2002;191:4015–4033.
[https://doi.org/10.1016/S0045-7825\(02\)00298-0](https://doi.org/10.1016/S0045-7825(02)00298-0)
 13. Kotrbacek P., Horsky J., Raudensky M., Pohanka M. Experimental study of heat transfer in hot rolling. *Revue de Métallurgie*. 2006;103(7–8):333–341.
<https://doi.org/10.1051/metal:2006134>
 14. Arif A.F., Khan O., Zubair S.M. Prediction of roll temperature with a non-uniform heat flux at tool and workpiece interface. *Heat and Mass Transfer*. 2004;41(1):75–94.
<https://doi.org/10.1007/s00231-004-0508-6>
 15. Гарбер Э.А. *Моделирование и совершенствование теплового режима и профилировок валков: Монография*. Череповец: ЧГУ; Москва: Теплотехник; 2013:114.
 16. Гарбер Э.А., Хлопотин М.В., Савиных А.Ф., Кожевников А.В., Голованов А.В., Смирнов В.С. Промышленные испытания усовершенствованных профилировок рабочих валков на широкополосном стане горячей прокатки. *Производство проката*. 2008;(4):18–22.
Garber E.A., Khlopotin M.V., Savinykh A.F., Kozhevnikov A.V., Golovanov A.V., Smirnov V.S. Industrial tests of improved crowning of work rolls in wide-strip hot rolling mill. *Proizvodstvo prokata*. 2008;(4):18–22. (In Russ.).
 17. Гарбер Э.А., Хлопотин М.В., Попов Е.С., Савиных А.Ф., Голованов А.В. Повышение эффективности охлаждения валков широкополосного стана горячей прокатки с использованием адаптивных математических моделей теплового баланса. *Производство проката*. 2009;(4):12–24.
Garber E.A., Khlopotin M.V., Popov E.S., Savinykh A.F., Golovanov A.V. Improving the efficiency of cooling rolls in a wide-strip hot rolling mill using adaptive mathematical models of heat balance. *Proizvodstvo prokata*. 2009;(4): 12–24. (In Russ.).
 18. Гарбер Э.А. *Станы холодной прокатки*. Москва: Черметинформация; 2004.
 19. Гарбер Э.А., Мишнев П.А., Шалаевский Д.Л., Палигин Р.Б., Михеева И.А., Болобанова Н.Л. Моделирование и уменьшение неплоскостности полос при горячей прокатке на стадии настройки широкополосного стана. *Производство проката*. 2014;(3):7–13.
Garber E.A., Mishnev P.A., Shalaevskii D.L., Paligin R.B., Mikheeva I.A., Bolobanova N.L. Modeling and reduction of strips non-flatness during hot rolling at the stage of setting up a wide-strip mill. *Proizvodstvo prokata*. 2014;(3):7–13. (In Russ.).
 20. Шалаевский Д.Л., Корепина К.П. Исследование влияния поперечного профиля холоднокатаных полос на возникновение дефектов планшетности. *Черные металлы*. 2022;(3):56–59.
Shalaevskii D.L., Korepina K.P. Influence of cross profile of cold rolled strips on occurrence of flatness defects. *Chernye metally*. 2022;(3):56–59. (In Russ.).

Сведения об авторе

Information about the Author

Дмитрий Леонидович Шалаевский, к.т.н., доцент кафедры металлургии, машиностроения и технологического оборудования, Череповецкий государственный университет
ORCID: 0000-0002-0443-4135
E-mail: shal-dmitrij@yandex.ru

Dmitrii L. Shalaevskii, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair of Metallurgy, Mechanical Engineering and Technological Equipment, Cherepovets State University
ORCID: 0000-0002-0443-4135
E-mail: shal-dmitrij@yandex.ru

Поступила в редакцию 23.11.2022
 После доработки 27.01.2023
 Принята к публикации 11.03.2023

Received 23.11.2022
 Revised 27.01.2023
 Accepted 11.03.2023