

УДК 621.771.07

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ ВАЛКОВ ПРИ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКЕ СОРТОВЫХ ПРОФИЛЕЙ НА СТАНЕ 370/150 ОАО «БЕЛОРУССКИЙ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЙ ЗАВОД — УКХ «БЕЛОРУССКАЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКАЯ КОМПАНИЯ»

А. В. СТРЕЛЬЧЕНКО¹, инженер-технолог лаборатории прокатного производства исследовательского центра – отраслевой лаборатории технологий металлургического и сталепроволочного производств, gtp1.icm@bmtz.gomel.by; И. В. АСТАПЕНКО², доцент кафедры “Металлургия и технологии обработки материалов”, astapenko@tut.by
(¹ ОАО “Белорусский металлургический завод – управляющая компания холдинга “Белорусская металлургическая компания”, Республика Беларусь, г. Жлобин; ² Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого, Республика Беларусь, г. Гомель)

Аннотация. В сортопрокатном производстве широко применяются валки с ящичными калибрами, что объясняется лучшей захватывающей способностью и высоким коэффициентом вытяжки. Однако наряду с указанными преимуществами есть и существенные недостатки — образование сетки разгара по дну калибра и боковых трещин на боковых выпусках, поскольку горячая сортовая прокатка металлов и сплавов сопровождается интенсивным износом рабочих валков и привалковой арматуры, что обусловлено воздействием на них высоких температур и напряжений. Поэтому задача разработки рационального температурного режима, обеспечивающего не только устойчивую работу стана, но и высокую стойкость валков, весьма актуальна и требует своего решения. Это тем более важно потому, что в настоящее время имеется тенденция повышения скоростей прокатки непрерывных станов, которая приведет к более тяжелым температурным условиям работы валков. Представлены результаты исследования влияния основных технологических параметров процесса прокатки на образование сетки разгара по дну калибра, величину и характер распределения по поверхностным слоям дна калибра термоциклических напряжений. Исследования теплового состояния валков черновой группы клетей непрерывного мелкосортно-проволочного стана 370/150 ОАО “Белорусский металлургический завод” показали, что в отличие от валков промежуточных и чистовых групп клетей они значительно более подвержены термоциклическому разрушению поверхности калибров, а не механическому. В результате компьютерного моделирования получены новые данные о характере и особенностях динамики теплового состояния поверхности калибров валков. Показаны возможности снижения термоциклических напряжений путем усовершенствования режима охлаждения валков. С использованием моделирования по методу конечных элементов выполнено исследование динамики нагрева и напряженного состояния поверхности и подповерхностных слоев дна калибра. На основе анализа результатов численных экспериментов и аналитических расчетов составлены изотермы поверхностных слоев дна калибра для выбора оптимального режима охлаждения. Полученные данные могут быть использованы для управления системой охлаждения валков черновых групп клетей непрерывных сортовых и трубных станов горячей прокатки.

Ключевые слова: сортопрокатное производство, прокатные валки, ящичные калибры, износ калибров, термоциклические напряжения, сетка разгара, моделирование по методу конечных элементов.

Ссылка для цитирования: Стрельченко А.В., Астапенко И.В. Исследование теплового состояния валков при горячей прокатке сортовых профилей на стане 370/150 ОАО “Белорусский металлургический завод – УКХ “Белорусская металлургическая компания” // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2019. Т. 75. № 8. С. 962–970.

Doi: 10.32339/0135-5910-2019-8-962-970

STUDY OF ROLLERS THERMAL STATE AT HOT ROLLING OF LONG PRODUCTS PROFILES AT 370/150 MILL OF OJSC "BELORUSSKY STEEL-WORKS – UKKH "BELORUSSKAYA METALLURGICAL COMPANY"

A. V. STREL'CHENKO¹, engineer-technologist, Rolling production Lab., Res. Center-industry lab. of metallurgical and wire production technologies, gtp1.icm@bmz.gomel.by;

I. V. ASTAPENKO², Prof. Ass., Dpt. "Metallurgy and technology of materials processing", astapenko@tut.by
(¹ OJSC "Belorussky steel-works – managing company of holding "Belorusskaya metallurgical company", Republic of Belarus', Zhlobin, ² Gomel' State Technical University after P.O. Sukhoy, Republic of Belarus', Gomel')

Abstract. In the rolling production, rolls with box passes are widely used, which is explained by the best gripping ability and high draw ratio. However, along with these advantages, there are significant drawbacks - the formation of an erosion net along the bottom of the pass and side cracks on the side outlets, since hot rolling of metals and alloys is accompanied by intense wear of the working rollers and welding fixtures, which happens due to exposure to high temperatures and stresses. Therefore, the task of elaboration of rational temperature regime to provide not only stable mill operation, but also high rollers endurance, is rather actual and requires its solution. It is very important to follow the today's trend to increase continuous mills rolling speed, which will result in still heavier temperature conditions of rollers operation. Results of the study of the rolling process main technological parameters influence on the formation of erosion net across the bottom of the pass presented, as well as magnitude and nature of the distribution of thermal cyclic stresses along the surface layers of the bottom of pass. Study of the thermal state of roughing stands rollers of OJSC "Belorussky steel-works" 370/150 continuous wire-rod mill show, that comparing with intermediate and finished stands rollers they subject more to thermo-cyclic destruction of passes surface, but not to mechanical one. As a result of the computer simulation new data obtained on the character and peculiarities of dynamics of surface thermal state of rollers passes. The possibilities to reduce thermal cyclic stresses by improving the cooling regime of the rolls shown. Using the simulation by the finite elements method, the study of the dynamics of heating and stress state of the surface and subsurface layers of the pass bottom was accomplished. Based on the analysis results of numerical experiments and analytical calculations, isotherms of the surface layers of the bottom of the pass were compiled to select the optimal cooling mode. The data obtained can be used to control the cooling systems of roughing stands rollers of continuous section and pipe hot rolling mills.

Keywords: long products rolling, mill rollers, box passes, pass wear, thermal cyclic stresses, erosion net, modeling.

For citation: Strel'chenko A.V., Astapenko I.V. Study of rollers thermal state at hot rolling of long products profiles at 370/150 mill of OJSC "Belorussky steel-works – UKKh "Belorusskaya metallurgical company". *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoi i ekonomicheskoi informatsii = Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*, 2019, vol. 75, no. 8, pp. 962–970. (In Russ.).

Doi: 10.32339/0135-5910-2019-8-962-970

Влияние температурного режима на стойкость валков горячей прокатки

При горячей прокатке высоких полос в ящичных калибрах возникают характерные зоны очага деформации, отличные от прокатки на гладких валках. Они влияют на характер и длительность стадий процесса прокатки, формирование механических свойств полосы, а также на степень и характер износа поверхности калибра [1].

В поверхностных слоях калибров бочки валков возникают высокие контактные напряжения, близкие по величине к значениям пределов текучести и прочности. Кроме того, в валках имеются значительные остаточные напряжения, возникшие главным образом в результате термической обработки. Поэтому сравнительно небольшие дополнительные напряжения, сами по себе не представляющие серьезной опасности для материала валков, накладываясь на контактные и остаточные напряжения, приводят к превышению предела прочности и появлению очагов усталостного разрушения, которые, развиваясь, могут вызвать местные разрушения поверхности, в результате чего валок выходит из строя. Причиной местных разрушений является разность температур как в поперечном сечении, так и по длине бочки

рабочего валка, приводящая к появлению термических напряжений [2, 3].

Рассмотрим более подробно возникновение напряжений, появляющихся в рабочих валках из-за неравномерности температур по их сечению во время прокатки.

В начале прокатки, когда металл поступает в холодные валки, происходит довольно быстрый нагрев поверхностных слоев бочки за счет тепла, выделяющегося в очаге пластической деформации, и вследствие контактного теплопереноса от нагретой полосы, внутренние же слои остаются еще холодными. При этом перепад температур по сечению может достигать 150–200 °С. Горячие наружные слои стремятся расширяться, и из-за сдерживающего влияния холодных внутренних зон в поверхностных слоях возникают сжимающие окружные и осевые напряжения. Соответственно внутри, у поверхности осевого камина, возникают растягивающие напряжения [4].

Как известно, при наличии в поверхностных слоях высоких контактных сжимающих напряжений, направленных по радиусу, дополнительные сжимающие окружные и осевые напряжения являются "полезными", т. е. снижают величину эк-

вивалентного напряжения, определяющего близость материала валка к предельному напряженному состоянию.

Наоборот, у внутренней поверхности растягивающие температурные напряжения являются "вредными". Однако, как уже отмечалось выше, сами по себе они не могут вызвать разрушение валка, тем более что контактные напряжения там весьма малы. При дальнейшей работе стана в связи с тем, что отвод тепла осуществляется только снаружи, температура внутренних зон постепенно повышается, происходит выравнивание температур по сечению и, как следствие, уменьшается благоприятное воздействие сжимающих окружных и осевых напряжений в поверхностных слоях [5, 6].

Во время паузы между проходами, а также при внезапных остановках стана вследствие охлаждения валков эмульсией может оказаться, что температура их внутренней поверхности станет выше температуры поверхности бочки. В поверхностном слое температурные напряжения станут теперь растягивающими. Это отрицательно отразится на усталостной прочности валка, уменьшая срок его службы.

Из приведенных рассуждений следует, что прогрев внутренних зон, происходящий при одностороннем (наружном) отводе тепла, сказывается неблагоприятно на стойкости рабочих валков. Поэтому задача разработки рационального температурного режима, обеспечивающего не только устойчивую работу стана, но и высокую стойкость валков, весьма актуальна и требует своего решения. Это тем более важно потому, что в настоящее время имеется тенденция повышения скоростей прокатки непрерывных станов, которая приведет к более тяжелым температурным условиям работы валков.

При термических воздействиях прокатываемого металла на поверхности отбеленного слоя бочки валка появляется мелкая сетка трещин. Это дефекты усталостного характера, которые возникают в результате нагрева поверхностного тонкого слоя валка во время его контакта с металлом, достигающего до 600 °С и выше, и последующего почти немедленного охлаждения водой до 50–150 °С. Образовавшаяся сетка разгара развивается, и окисленные края трещин образуют характерную картину мелкого выкрашивания (рис. 1).

Структура рабочей поверхности валков сортопрокатных станов достаточно неоднородна. Наряду с крупными выделениями твердого и хрупкого цементита в валке могут присутствовать большие участки перлита различной дисперсности и графита шаровидной или пластинчатой формы. Поэтому износ поверхности валка не может быть равномерным. При работе валка частицы графита истираются, выпадают или выгорают. В результате появляется много мелких впадин на той части валка, которая соприкасается с прокатываемым металлом. Эти точечные углубления увеличиваются и соединяются под совместным влиянием высокого давления горячего металла, охлаждающей жидкости и окисляющего действия воздуха, образуя сетку желобков – разгаров. Если не произвести своевременно переточку валка, то в глубине желобков развиваются мелкие трещинки. Сетку разгара далеко не всегда можно устранить, поэтому большое значение имеет правильность выбора валков, наиболее отвечающих условиям эксплуатации [7].



Рис. 1. Сетка разгара на чугунных валках

Fig. 1. Erosion net at the cast-iron rollers

Поверхность стальных прокатных валков, так же как и чугунных, в процессе работы подвергается длительному попеременному нагреванию и охлаждению. При этом поверхность стальных валков гораздо слабее противостоит образованию сетки термических трещин. Грубая сетка со временем трансформируется в кольцевые трещины, снижающие прочность валка.

Исследование теплового состояния валков черновой группы клетей мелкосортно-проволочного стана 370/150

Исследование теплового состояния валков проходило в три этапа. На первом экспериментальном этапе производилось измерение темпе-

ратуры поверхности валков в сортопрокатном цехе № 2 на мелкосортно-проволочном стане горячей прокатки 370/150 ОАО "Белорусский ме-

таллургический завод” (БМЗ). Температуру валков клетей № 1, 3, 5 измеряли при помощи тепловизионной камеры Flir T640 с точностью измерения $\pm 2\%$ от показаний. Результаты измерений представлены на рис. 2–4.

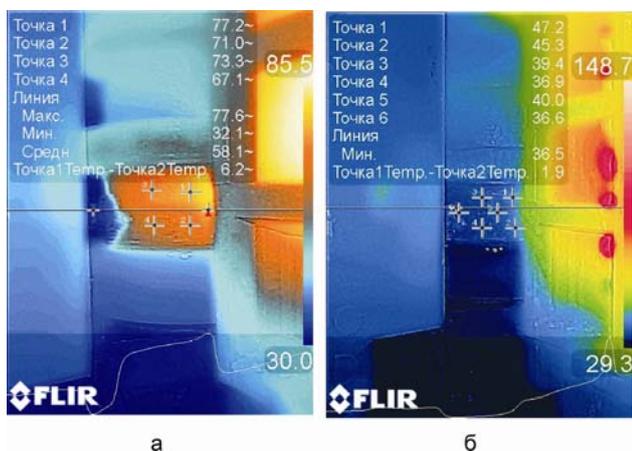


Рис. 2. Тепловое состояние калибра валка в вертикальной клетей № 1:
а — установившийся режим; б — между проходами

Fig. 2. Thermal state of a roller pass in the vertical stand No. 1:
a — steady regime; б — between passes

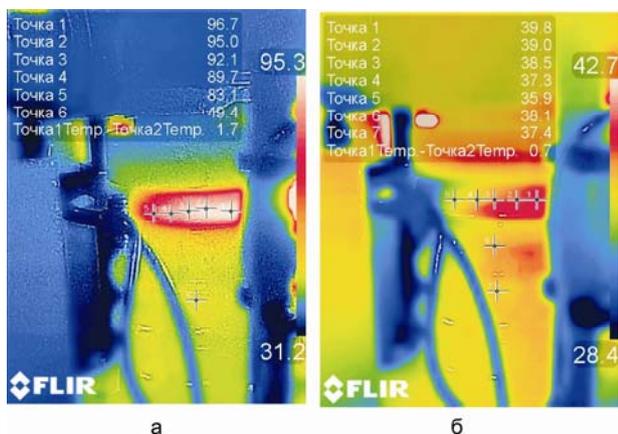


Рис. 3. Тепловое состояние калибра валка в вертикальной клетей № 3:
а — установившийся режим; б — между проходами

Fig. 3. Thermal state of a roller pass in the vertical stand No. 3:
a — steady regime; б — between passes

На втором этапе исследования температуры рабочих валков применялась разработанная математическая модель прокатки полосы в клетях черновой группы стана 370/150. На основании хронометрических замеров времени выполнили расчет изменения температуры валков клетей № 1, 3, 5 и сравнили с измеренной температурой валков, находившихся на различных стадиях (установившийся режим/между проходами).

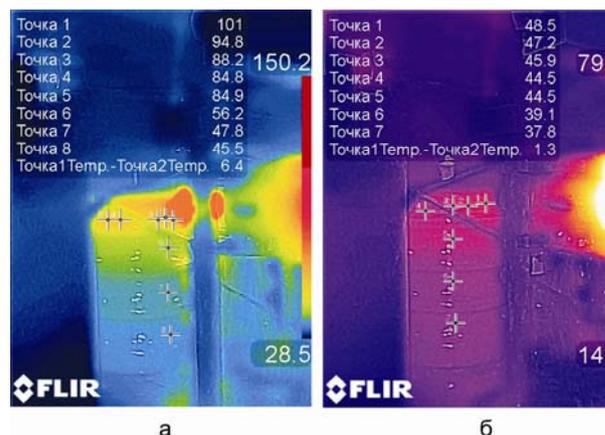


Рис. 4. Тепловое состояние калибра валка в вертикальной клетей № 5:
а — установившийся режим; б — между проходами

Fig. 4. Thermal state of a roller pass in the vertical stand No. 5:
a — steady regime; б — between passes

Для моделирования температурных условий ведения процесса прокатки создана математическая модель температурного поля в очаге деформации. Задача решена методом конечных элементов на основе дифференциального уравнения теплопроводности. С этой целью очаг деформации разбивается на трехмерные комплекс-элементы. Ввиду невозможности аналитического решения задачи для ее приближенного решения также использовалась разновидность проекционного метода — метод Галеркина [8].

При горячей прокатке теплообмен с окружающей средой в очаге деформации осуществляется в основном за счет контактного теплообмена с валками прокатного стана, теплопередачи излучением в окружающую среду и конвективной теплопередачи. Поскольку, согласно известным исследованиям, конвективной теплопередачей можно пренебречь, для решения температурной задачи примем следующие граничные условия:

- на входе в очаг деформации температура металла считается известной;
- на свободной поверхности имеет место теплопередача излучением в окружающую среду, которая описывается формулой Стефана–Больцмана;
- на контактной поверхности имеет место теплообмен между деформируемым металлом и поверхностью валков;
- на остальных поверхностях, ограничивающих часть очага деформации, тепловой поток равен нулю.

Математическая модель позволяет выполнять численное моделирование температурного поля в очаге деформации и может служить частью комплекса для моделирования и проекти-

рования технологии прокатки сортовых профилей. Моделирование температурных полей проведено для разных схем прокатки.

Исходные данные для численного моделирования процесса прокатки в клетях № 1, 2, 3 представлены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

TABLE 1. INITIAL DATA OF THE QUANTITY MODELLING

Параметр процесса	Клеть		
	№ 1	№ 3	№ 5
Катающий диаметр вала, мм	795	659,3	677,5
Угол захвата полосы, град.	23	26,2	27
Высота полосы, мм	300	265	230
Скорость прокатки, м/с	0,126	0,26	0,46
Температура, °С:			
полосы перед прокаткой	999	999	999
валков перед прокаткой	32	33	34

Так как на формирование термоциклических напряжений оказывает влияние температура поверхности контакта валков и полосы при нагреве в очаге деформации и остывании на выходе из него, то отдельно анализировались изменения величины температуры поверхности контакта валков клетей № 1 (базовый эксперимент), 2 и 3 за полный оборот вала.

За сравнительно малый промежуток времени поверхность вала в очаге деформации прогревается до значительных температур, а после выхода из очага деформации мгновенно начинает охлаждаться, тем самым меняя знак и величину термических напряжений поверхностных и внутренних слоев вала.

$$t = \frac{2q_c \sqrt{\tau}}{\sqrt{\pi c \gamma \lambda}} \left\{ 1 - \frac{x^2}{4a\tau} - \frac{x}{2\sqrt{a\tau}} \sqrt{\pi} \left[1 - G\left(\frac{x}{2\sqrt{a\tau}}\right) \right] \right\} = \frac{2q_c \sqrt{\tau}}{\sqrt{\pi c \gamma \lambda}} F\left(\frac{x}{2\sqrt{a\tau}}\right), \quad (1)$$

где τ — время от начала нагрева, с; x — расстояние от поверхности, м; t — температура в рассматриваемой точке, °С; q_c — тепловой поток через единицу поверхности в единицу времени, ккал/(м²·град.); λ — коэффициент теплопроводности, ккал/(м·ч·град.); c — удельная теплоемкость, ккал/(кг·град.); γ — плотность, кг/м³; $a = \frac{\lambda}{c\gamma}$ — коэффициент температуропроводности, м²/с;

$G(\mu) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^\mu e^{-z^2} dz$ — интеграл вероятности.

При $x = 0$ выражение в фигурных скобках равно единице, следовательно, выражение перед скобками представляет собой изменение температуры на поверхности калибра:

С момента выхода из очага деформации до его повторного контакта поверхность активно охлаждается, и при очередном контакте градиент температур достаточно большой, что в совокупности с попаданием воды в зону контакта оказывает серьезное влияние на образование сетки разгара и поверхностных дефектов вала.

По результатам моделирования был построен график теплового состояния поверхности валков (рис. 5).

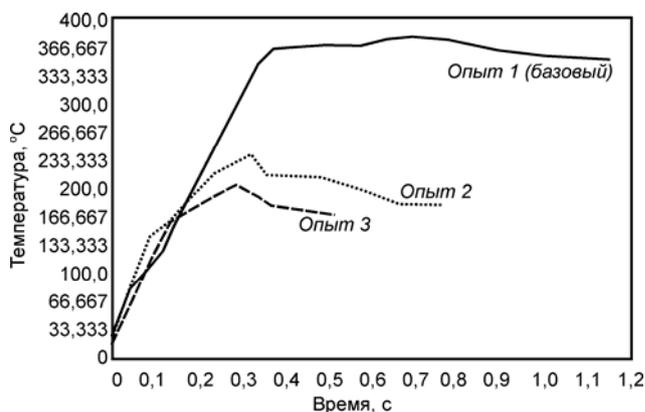


Рис. 5. График изменения теплового состояния поверхности валков

Fig. 5. Graf of rollers surface heat state variation

На третьем этапе выполнен расчет теплового состояния валков при помощи известных теоретических и эмпирических зависимостей [7–10].

Температура в толще вала в очаге деформации определяется по формуле

$$t_{x=0} = \frac{2q_c \sqrt{\tau}}{\sqrt{\pi c \gamma \lambda}}. \quad (2)$$

Используем выражение (2) для расчета температуры поверхности вала в очаге деформации. При этом направленный в сторону вала суммарный тепловой поток q_c состоит из двух составляющих: теплового потока, вызванного разностью температур металла и вала q_t , и теплового потока, вызванного работой сил трения $q_{тр}$:

$$q_c = q_t + q_{тр}. \quad (3)$$

Тепловой поток, вызванный разностью температур металла и валка, согласно выражению (2) равен

$$q_t = \alpha \frac{(t_{m0} - t_{b0}) + [(t_{m0} - \Delta t_m) - (t_{b0} - \Delta t_b)]}{2}, \quad (4)$$

где q_t — тепловой поток, ккал/(м²·ч); t_{m0} и t_{b0} — исходные температуры металла и валков, °С; Δt_m — понижение температуры поверхности металла после соприкосновения с валками, град.; Δt_b — повышение температуры поверхности валка после соприкосновения с металлом, град.; α — коэффициент теплопередачи через окалину, ккал/(м²·ч·град.).

Величины t_{m0} и t_{b0} известны. Для нахождения Δt_m и Δt_b воспользуемся следующими зависимостями:

$$\Delta t_m = (t_{m0} - t_m) \varphi(a_2 h_2^2 \tau) - t_{пл}; \quad (5)$$

$$\Delta t_b = (t_m - t_{b0}) \varphi(a_1 h_1^2 \tau), \quad (6)$$

где t_m — температура в плоскости соприкосновения в идеальном случае, т. е. без учета промежуточной прослойки; a_2 — температуропроводность металла, м²/с; a_1 — температуропроводность валка, м²/с; τ — длительность контакта металла с валками, с.

Тепловой поток, вызванный работой силы трения:

$$q_{тр} = \mu p v_{ск}, \quad (7)$$

где $q_{тр}$ — тепловой поток, возникающий при трении, ккал/(м²·ч); μ — коэффициент трения; p — среднее удельное давление при прокатке, кг/мм²; $v_{ск}$ — скорость скольжения, м/с.

Тогда температура на поверхности калибра валка:

$$t_{x=0} = \frac{2 q_1 \sqrt{\tau_s}}{\sqrt{\pi c \gamma \lambda}} \left[\frac{\Delta t}{2 \tau_s} - \frac{q_2 - q_1}{q_1} \right]. \quad (8)$$

Возникающие напряжения по сечению калибра валка равны [10]:

$$\sigma_0 = E \alpha \Delta t \frac{1}{2(1-\nu)} \left(1 - 2 \frac{r^2}{R^2} \right). \quad (9)$$

Радиальное напряжение:

$$\sigma_r = E \alpha \Delta t \frac{1}{4(1-\nu)} \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right). \quad (10)$$

Тангенциальное напряжение:

$$\sigma_t = E \alpha \Delta t \frac{1}{4(1-\nu)} \left(1 - 3 \frac{r^2}{R^2} \right), \quad (11)$$

где r — радиус данного кольцевого слоя, м; R — радиус валка, м; ν — коэффициент Пуассона металла валка; α — коэффициент линейного расширения металла валка, принятый равным $10,5 \times 10^{-6}$ 1/град.; E — модуль упругости металла валка, равный 19×10^3 кг/мм²; Δt — перепад температур, °С.

Результаты аналитического расчета теплового состояния валков клетки № 1 после первого и четвертого оборота сведены в табл. 2.

ТАБЛИЦА 2. РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИТИЧЕСКОГО РАСЧЕТА ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ВАЛКА

TABLE 2. RESULTS OF ANALYTICAL CALCULATION OF ROLLER SURFACE HEAT STATE

Температура, °С	Толщина слоя, мм	
	после первого оборота	после четвертого оборота
50	3,80	10,50
100	2,55	3,80
150	1,35	1,85
250	0,50	0,60
350	0,35	0,45

Разница температур между поверхностными и подповерхностными слоями вызывает значительные термические напряжения, причем в подповерхностном слое (нагретом незначительно) — радиальные и осевые растягивающие, а на поверхности — тангенциальные и осевые сжимающие, причем в течение одного оборота они меняют и знак, и направление, обуславливая тем самым усталостные явления.

Накопление усталостных изменений в структуре валка является предпосылкой разрушения в месте возникновения очага и вблизи него, поэтому кроме технологических причин, ускоряющих выход валков из строя, следует принимать во внимание механизм накопления усталости в материале валка, который определяется схемой напряженного состояния на различных глубинах в процессе циклического нагружения.

Для удобства анализа теплового состояния валков были построены изотермы температур для быстроходной (рис. 6) и тихоходной (рис. 7) клеток после первого и четвертого оборотов.

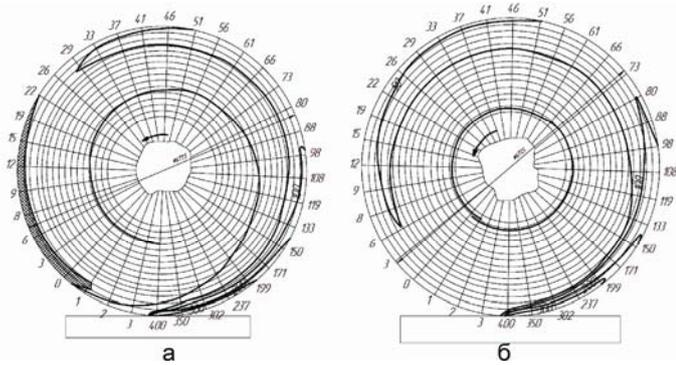


Рис. 6. *Изотермы скоростной клетки № 5 в сечении валка:*
а — после первого оборота;
б — после четвертого оборота

Fig. 6. *Isotherms of the high-speed stand No. 5 in the roller cross-section:*
a — after the first turn; б — after the fourth turn

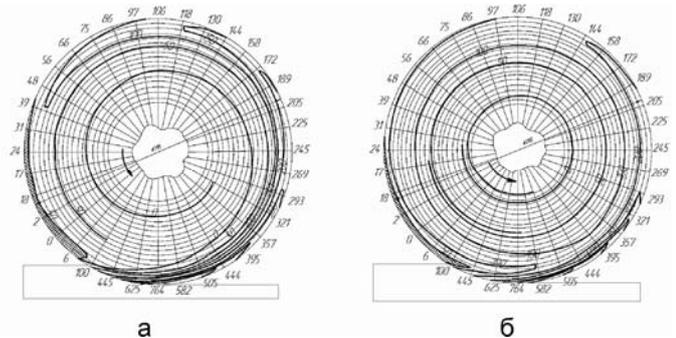


Рис. 7. *Изотермы тихоходной клетки № 1 в сечении валка:*
а — после первого оборота;
б — после четвертого оборота

Fig. 7. *Isotherm of the low-speed stand No. 1 in the roller cross-section:*
a — after the first turn; б — after the fourth turn

Заключение

В работе проведены исследования теплового состояния валков черновой группы клетей непрерывного мелкосортно-проволочного стана 370/150 ОАО БМЗ. В отличие от валков промежуточных и чистовых групп клетей они значительно более подвержены термоциклическому разрушению поверхности калибров, а не механическому. Высокая температура нагрева поверхности калибра в очаге деформации и быстрое охлаждение на выходе из него приводят к появлению в подповерхностных слоях значи-

тельных циклических напряжений, вызывающих образование поверхностной сетки разгара.

В результате действия усталостных напряжений в подповерхностном слое образуются трещины (сетка разгара), что значительно снижает ресурс валка из-за необходимости переточки путем съема металла по всей поверхности бочки валка.

После детального анализа теплового режима работы валков черновой группы клетей стана 370/150 были предложены конструктивные мероприятия по снижению влияния нагрева и охлаждения валков при прокатке на образование сетки разгара по поверхности калибров в тихоходных черновых клетях путем усовершенствования арматуры охлаждения валков (рис. 8).

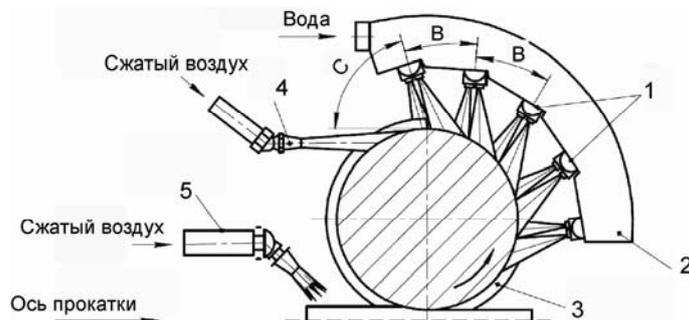


Рис. 8. *Схема усовершенствованной арматуры охлаждения валков черновой группы клетей стана 370/150:*
1 — форсунки подачи охлаждающей жидкости;
2 — арматура охлаждения; 3 — поверхность калибра валка; 4 — форсунка подачи сжатого воздуха для отсечки воды; 5 — форсунка подачи сжатого воздуха для подогрева поверхности калибра

Fig. 8. *Diagram of the modernized cooling piping of the rollers of the 370/150 mill roughing group stands:*
1 — cooling liquid supply sprayers; 2 — cooling pipes; 3 — roller pass surface; 4 — compressed air supply sprayer for water cutting; 5 — compressed air supply sprayer for pass surface heating

тельного циклических напряжений, вызывающих образование поверхностной сетки разгара.

В результате компьютерного моделирования получены новые данные о характере и особенностях динамики теплового состояния поверхности калибров валков.

Получены данные о качественных и количественных характеристиках, определены скорости нагрева и охлаждения поверхности калибров в различных его слоях по толще бочки валка.

Определены зависимости значений скорости нагрева и охлаждения калибров от скорости про-

катки, площади сечения раската, диаметра валков. Кроме того, определен эффект прогрева поверхности калибра после выхода из зоны охлаждения за счет теплопередачи от внутренних слоев тела валка.

При исследовании теплового состояния валков выявлено, что избыточное охлаждение поверхности калибров и попадание остатков охлаждающей жидкости на поверхность полосы на входе в очаг деформации являются ключевыми факторами образования сетки разгара.

Полученные данные могут быть использованы для управления системой охлаждения валков черновых групп клетей непрерывных сортовых и трубных станов горячей прокатки (например, станов 150, 320, 370/150 ОАО БМЗ).

Методика компьютерного моделирования теплового состояния валков при прокатке в черновой группе клетей непрерывного стана внедрена в учебный процесс ГГТУ им. П.О. Сухого.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Byon S.M., Park H.S., Lee Y. Experimental Study for Roll Gap Adjustment due to Roll Wear in Single-Stand Rolling and Multi-Stand Rolling Test // *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2008. V. 22. № 5. P. 937–945. doi: 10.1007/s12206-008-0121-6.
2. Jie Zhou, Chuan Xiao, Yingyan Yu, Zhi Jia. Influence of Tool Parameters on Tool Wear in Two-Roll Cross-Wedge Rolling // *International Journal Advanced Manufacturing Technology*. 2013. V. 65. № 5–8. P. 745–753. doi: 10.1007/s00170-012-4213-1.
3. Стрельченко А.В., Зуев И.А., Астапенко И.В. Исследование влияния геометрии ящичных калибров валков на образование термоциклических трещин в условиях мелкосортно-проволочного стана горячей прокатки 370/150 ОАО «Белорусский металлургический завод – управляющая компания холдинга «БМК» // *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. 2019. Т. 75. № 1. С. 80–85. doi: 10.32339/0135-5910-2019-1-80-85.
4. Мурзаева Е.А. Влияние напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя прокатных валков на появление сетки разгара на станах горячей прокатки // *Моделирование и развитие процессов ОМД*. 2011. № 1. С. 42–51.
5. Клименко П.Л., Данченко В.Н. Контактные напряжения при прокатке. — Днепропетровск: Пороги, 2007. — 285 с.
6. Астапенко И.В., Васильков Д.М. Особенности горячей прокатки высоких полос в ящичном калибре // *Современные проблемы машиноведения: материалы XII Междунар. научно-технич. конф., Гомель, 22–23 ноября 2018 г.* — Гомель: ГГТУ им. П. О. Сухого, 2018. С. 114–117.
7. Эксплуатация валков обжимных и сортовых станов / Н.М. Воронцов, В.Т. Жадан, Б.Я. Шнееров и др. — М.: Металлургия, 1973. — 288 с.
8. Гарбер Э.А., Хлопотин М.В. Моделирование и совершенствование теплового режима и профилировок валков широкополосных станов горячей прокатки. — Череповец: ЧГУ; М.: Теплотехника, 2013. — 114 с.
9. Прокатные валки из высокоуглеродистых сплавов / Т.С. Скобло, Н.М. Воронцов, С.И. Рудюк и др. — М.: Металлургия, 1994. — 336 с.
10. Стриженко А.О., Астахов А.А., Мазур И.П. Исследование изменения температуры валка после вывалки из клетки // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия»*. 2016. Т. 16. № 2. С. 133–136. doi: 10.14529/met160221.

Поступила 16 июля 2019 г.

REFERENCES

1. Byon S.M., Park H.S., Lee Y. Experimental Study for Roll Gap Adjustment due to Roll Wear in Single-Stand Rolling and Multi-Stand Rolling Test. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2008, vol. 22, no. 5, pp. 937–945. doi: 10.1007/s12206-008-0121-6.
2. Jie Zhou, Chuan Xiao, Yingyan Yu, Zhi Jia. Influence of Tool Parameters on Tool Wear in Two-Roll Cross-Wedge Rolling. *International Journal Advanced Manufacturing Technology*, 2013, vol. 65, no. 5–8, pp. 745–753. doi: 10.1007/s00170-012-4213-1.
3. Strel'chenko A.V., Zuev I.A., Astapenko I.V. Study of influence of roller box passes on formation thermo-cycling cracks under conditions of 350/150 hot rod-wire mill of OJSC «Belorussky steel-works – managing company of holding «БМК». *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoi i ekonomicheskoi informatsii = Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*, 2019, vol. 75, no. 1, pp. 80–85. doi: 10.32339/0135-5910-2019-1-80-85. (In Russ.).
4. Murzaeva E.A. Influence of mode of deformation of the rolling rollers surface layer on formation erosion net at hot rolling mills. *Modelirovanie i razvitie protsessov OMD*, 2011, no. 1, pp. 42–51. (In Russ.).
5. Klimenko P.L., Danchenko V.N. *Kontaktnye napryazheniya pri prokatke* [Contact stresses at rolling]. Dnepropetrovsk: Porogi, 2007, 285 p. (In Russ.).

6. Astapenko I.V., Vasil'kov D.M. *Osobennosti goryachei prokatki vysokikh polos v yashchichnom kalibre* [Peculiarities of hot rolling of high strips in the box pass]. *Sovremennye problemy mashinovedeniya: materialy XII Mezhdunar. nauchno-tekhnich. konf., Gomel', 22–23 noyabrya 2018* [Modern problems of machine science: materials of the XII Intern. scientific and technical conf., Gomel, Nov. 22–23. 2018]. Gomel': GGTU im. P. O. Sukhogo, 2018, pp. 114–117. (In Russ.).
7. Vorontsov N.M., Zhadan V.T., Shneerov B.Ya. etc. *Ekspluatatsiya valkov obzhimnykh i sortovykh stanov* [Using of rollers of roughing and section mills]. Moscow: Metallurgiya, 1973, 288 p. (In Russ.).
8. Garber E.A., Khlopotin M.V. *Modelirovanie i sovershenstvovanie teplovogo rezhima i profilirovok valkov shirokopolosnykh stanov goryachei prokatki* [Simulation and perfection of thermal regime and rollers passes of hot wide-strip rolling mills]. Cherepovets: ChGU; Moscow: Teplotekhnika, 2013, 114 p. (In Russ.).
9. Skoblo T.S., Vorontsov N.M., Rudyuk S.I. etc. *Prokatnye valki iz vysokouglerodistykh splavov* [Rolling rollers made of high-carbon alloys]. Moscow: Metallurgiya, 1994, 336 p. (In Russ.).
10. Strizhenko A.O., Astakhov A.A., Mazrur I.P. Study of roller temperature changes after falling out of stand. *Vestnik YuUrGU. Seriya "Metallurgiya"*, 2016, vol. 16, no. 2, pp. 133–136. doi: 10.14529/met160221. (In Russ.).

Received July 16, 2019