



УДК 536.2: 621.981.635

Н.В. Телин, А.А. Збродов, А.С.Фомин
ФГБОУ ВО «Череповецкий государственный университет»
г. Череповец, Россия
E-mail: telin_nv@mail.ru
Дата поступления: 05.10.2016

ДИАГНОСТИКА ТЕМПЕРАТУРНЫХ УСЛОВИЙ СЛУЖБЫ ПОЛЫХ РОЛИКОВ МАШИН НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ ЗАГОТОВОК

Аннотация

Предложена методика диагностики температурных условий эксплуатации полых роликов машин непрерывного литья заготовок по максимальной температуре поверхности роликов. Максимальная температура бочки ролика определяется с учетом величины и характера тепловой нагрузки, угловой скорости вращения, расхода и температуры охлаждающей жидкости, состава и концентрации накипеобразователей в охлаждающей жидкости.

Наибольшую опасность для роликов представляет сочетанное действие высокой температуры охлаждающей жидкости на входе в ролик, падение давления в системе охлаждения роликов и использовании для охлаждения роликов жесткой воды

Методика может быть использована для выявления критических температурных условий эксплуатации роликов МНЛЗ.

Ключевые слова: МНЛЗ, ролик, температура, теплообмен, охлаждение, канал охлаждения, накипь.

Введение

В соответствие с «Правилами технической эксплуатации механического оборудования машин непрерывного литья заготовок» [1] система охлаждения роликов должна обеспечивать температуру поверхностного слоя бочки не вызывающую выход состояния материала за пределы упругой области ($\sim 650^\circ\text{C}$), а температуру поверхности канала охлаждения – парение охлаждающей жидкости ($\sim 100^\circ\text{C}$). Поэтому к выбору температурных условий службы роликов, поддержанию их на проектном уровне предъявляют очень высокие требования, так как они определяют нормальную работу МНЛЗ, ее производительность и качество готовых заготовок. В настоящее время срок службы роликов отечественных МНЛЗ весьма ограничен и составляет для большинства роликов около полугода [2,3].

В производственной практике применяется визуальное наблюдение за состоянием поверхности канала охлаждения и поверхности бочки и контроль величины износа бочки и прогиба роликов во всех слу-

чаях остановок и проверок МНЛЗ. Критериями замены роликов является износ поверхности более 2 мм, прогиб роликов - 1,0 мм/м и наличие на бочке ролика кольцевых и продольных трещин глубиной от 1 до 3 мм [1]. Внешний осмотр позволяет своевременно выявлять неисправности и предельные дефекты роликов: сетку разгара на бочке ролика, величину износа бочки и шеек ролика, остаточный прогиб бочки и разрушение подшипников, оценивать толщину и состав отложений на поверхности канала охлаждения. Однако внешний осмотр роликов только констатирует возникающие повреждения, а ролики продолжают работу в неблагоприятных условиях. А поскольку причины возникновения ранних дефектов в большинстве случаев не устраняются, то по достижении критериев дефектов своих предельных значений ролики заменяются. Такую раннюю замену роликов можно предупредить, если внешний осмотр роликов дополнить диагностикой температурных условий службы полых роликов МНЛЗ, учитывающей параметры работы системы охлаждения роликов и

условия их взаимодействия со слитком. Целью данной работы является разработка метода диагностики температурных условий службы полых роликов машин непрерывного литья заготовок по максимальной температуре бочки ролика.

Основная часть

При длительной эксплуатации роликов машин непрерывного литья заготовок (даже при соблюдении технологической дисциплины) неизбежно возникают нарушения в условиях их охлаждения, обусловленные изменениями температуры и расхода охлаждающей жидкости, условий теплового взаимодействия ролика со слитком, а также ростом отложений на поверхности канала охлаждения. Эти нарушения в условиях охлаждения вызывают временное или постоянное повышение температуры бочки до значений температуры отпуска материала роликов ($\sim 650^\circ\text{C}$) и выше. Возникающий перегрев металла увеличивает износ бочки, способствует появлению сетки разгара и, следовательно, значительно сокращает срок их службы. Наибольшие изменения температуры на поверхности ролика наблюдаются в зоне контакта ролика со слитком на установившемся режиме работы. Максимальная температура поверхности ролика наблюдается на выходе его из зоны контакта со слитком ($\varphi = \varphi_0$), а минимальная температура – на входе ролик в зону контакта ($\varphi = -\varphi_0$). Поэтому диагностику критического температурного режима эксплуатации ролика удобно проводить по температуре поверхности ролика на выходе его из зоны контакта со слитком.

В основу метода диагностики критического температурного режима службы полых роликов МНЛЗ по максимальной температуре поверхности положен постоянный или периодический контроль расхода охлаждающей жидкости через ролик, ее химического состава, температуры жидкости на входе и выходе из ролика, температуры поверхности слитка на входе в ролик и химического анализа состава отложений на поверхности канала охлаждения ролика. Для контроля этих параметров могут быть использованы штатные приборы машины непрерывного литья заготовок.

Теоретические и экспериментальные исследования показывают, что температурное поле роликов машин непрерывного литья заготовок условно можно разделить на две составляющие: осесимметричную и неосесимметричную. При этом максимальная температура бочки в зоне контакта ролика со слитком на установившемся режиме работы определяется выражением [4,5]:

$$t(\varphi_0) = t_2 + q_2 \cdot \frac{R_2}{\lambda_2} \cdot \frac{1}{\pi} \cdot \frac{2}{\sqrt{Pd}} \times \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n\sqrt{n}} \cdot \sin n\varphi_0 \cdot \cos \left[n\varphi_0 - \frac{\pi}{4} \right], \quad (1)$$

где t_2 – осесимметричная составляющая температуры поверхности бочки ролика; q_2 – плотность теплового потока в зоне контакта ролика и слитка; R_2 – радиус бочки ролика; $Pd = \omega \cdot R_2^2 / a_2$ – критерий Предводителя; ω – угловая скорость вращения ролика; a_2 – коэффициент температуропроводности материала ролика; λ_2 – коэффициент теплопроводности материала ролика; $2\varphi_0$ – угол контакта ролика со слитком.

Осесимметричная составляющая температуры поверхности бочки ролика формируется под действием осесимметричной составляющей теплового воздействия. На установившемся тепловом режиме работы при известной толщине слоя накипи на поверхности канала охлаждения осесимметричная температура рабочей поверхности ролика определяется из уравнения [6]:

$$t_2 = t_{ж} + \frac{Q}{\pi \cdot L} \left(\frac{1}{\alpha \cdot (d_1 - \delta)} + \frac{1}{2\lambda_n} \cdot \ln \frac{d_1}{(d_1 - \delta)} + \frac{1}{2\lambda_2} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1} \right), \quad (2)$$

где $t_{ж}$ – средняя по длине канала охлаждения температура воды; Q – тепловой поток; α – коэффициент теплоотдачи; λ_n – коэффициент теплопроводности накипи; δ – толщина слоя накипи; d_1 – диаметр канала охлаждения ролика; d_2 – наружный диаметр бочки ролика; L – длина бочки ролика.

В соотношении (2) принято, что время наступления установившегося теплового состояния ролика значительно меньше времени роста накипи. Тепловой поток на по-

верхности канала охлаждения Q определяется по расходу и температуре охлаждающей воды на входе и выходе из ролика.

Для случая использования жесткой воды с большим количеством накипеобразователей прогноз толщины слоя накипи на поверхности канала охлаждения ролика можно сделать по соотношению [7]:

$$\delta(\tau) = \frac{D}{\Delta \cdot \gamma_n} \cdot (C - C_n) \cdot \tau, \quad (3)$$

где D - коэффициент диффузии; Δ - толщина теплового пограничного слоя; γ_n - плотность накипи; C, C_n - концентрация накипеобразователя в осевой части потока и около поверхности канала охлаждения; τ - время.

В соотношении (3) применяется линейная зависимость, описывающая процесс роста толщины слоя накипи во времени, поскольку она позволяет прогнозировать предельную толщину слоя накипи, требующую обязательную очистку поверхности канала охлаждения ролика. Для практических приложений наибольший интерес представляет исследование влияние динамики роста накипи на максимальную температуру рабочей поверхности, а, следовательно, на планируемый срок службы роликов (т.е. время достижения максимальной температуры поверхности ролика своего критического значения).

Неосесимметричная составляющая температуры рабочей поверхности бочки ролика с внутренним охлаждением формируется, в основном, под действием неосесимметричной составляющей теплового воздействия в зоне контакта ролика со слитком. Плотность теплового потока, выходящего из слитка и поступающего в ролик в зоне контакта, определяется по формуле [7,8]:

$$q_2 = \frac{1}{2} \frac{\varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2} \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot \omega}{2\varphi_0}} \cdot (t_1 - t_2), \quad (4)$$

где $\varepsilon_1 = \lambda_1 / \sqrt{a_1}$ и $\varepsilon_2 = \lambda_2 / \sqrt{a_2}$ - тепловая активность материала слитка и ролика; λ_1, a_1 - коэффициенты теплопроводности и температуропроводности материала слитка; t_1 - температура поверхности слитка на входе в ролик.

Неосесимметричная составляющая теплового воздействия формирует максимальную и минимальную температуру на поверхности ролика. Соотношение между максимальной и минимальной температуры поверхности за время оборота определяет стойкость ролика против образования сетки разгара. С увеличением угловой скорости вращения и выравнивания тепловых воздействий по образующей ролика выравнивается.

Используя соотношения (1 – 4) произведем оценку влияния температуры воды на входе в ролик, интенсивности охлаждения и накипеобразования на поверхности канала охлаждения на максимальную температуру поверхности. Для проведения расчетов принято: материал ролика - сталь 25Х1МФ, материал слитка - углеродистая сталь; $t_1 = 950^\circ\text{C}$; $\omega = 53 \cdot 10^{-3} \text{ 1/c}$; $R_2 = 0,19\text{м}$; $R_1 = 0,045\text{м}$; $2\varphi_0 = 0,042 \text{ рад}$; $\lambda_1 = 29,1 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$; $\lambda_2 = 40 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$; $\lambda_n = 1,7 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$; $\gamma_n = 2710 \text{ кг/м}^3$ - плотность накипи; $a_1 = 5,83 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$; $a_2 = 11,59 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$; $t_{\text{вх}} = 20^\circ\text{C}$ - температура воды на входе в ролик; $t_{\text{вых}} = 29^\circ\text{C}$ - температура воды на выходе из ролика; $G = 2,25 \text{ кг/с}$ - расход охлаждающей жидкости; $\delta = 0 \text{ мм}$ толщина слоя накипи. Кольцевой канал охлаждения ролика полностью заполнен охлаждающей жидкостью. Угол контакта ролика со слитком по данным расчётно-конструкторской лаборатории НИИтяжмаша и УПИ может находиться в диапазоне $2 \dots 7^\circ$ [9].

Для принятых условий тепловой поток воспринимаемый охлаждающей жидкостью составляет $84,7 \cdot 10^3 \text{ Вт}$, коэффициент теплоотдачи от поверхности канала охлаждения к жидкости - $2280 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$. Максимальная температура поверхности ролика составляет 619°C . Расчет максимальной температуры поверхности ролика выполненный по соотношению (1) согласуется с расчетом температуры зоны контакта системы ролик – металл по соотношению, полученному из решения системы одномерных дифференциальных уравнений в частных производных при граничных условиях IV рода [8].

Влияние температуры воды на входе в ролик. Изменения температуры воды на входе в ролик обусловлены, в основном, сезонными колебаниями температуры. В холодный период года температура охлаждающей воды на входе в ролик уменьшается, а в теплый период года – увеличивается. На рис. 1. показана зависимость максимальной

температуры поверхности бочки от температуры охлаждающей жидкости на входе в ролик. С повышением температуры охлаждающей жидкости на входе в ролик максимальная температура поверхности ролика увеличивается. При температуре воды на входе в ролик $t_{вх} = 15^{\circ}\text{C}$ максимальная температура поверхности составит 617°C , а для $t_{вх} = 30^{\circ}\text{C}$ – 625°C .

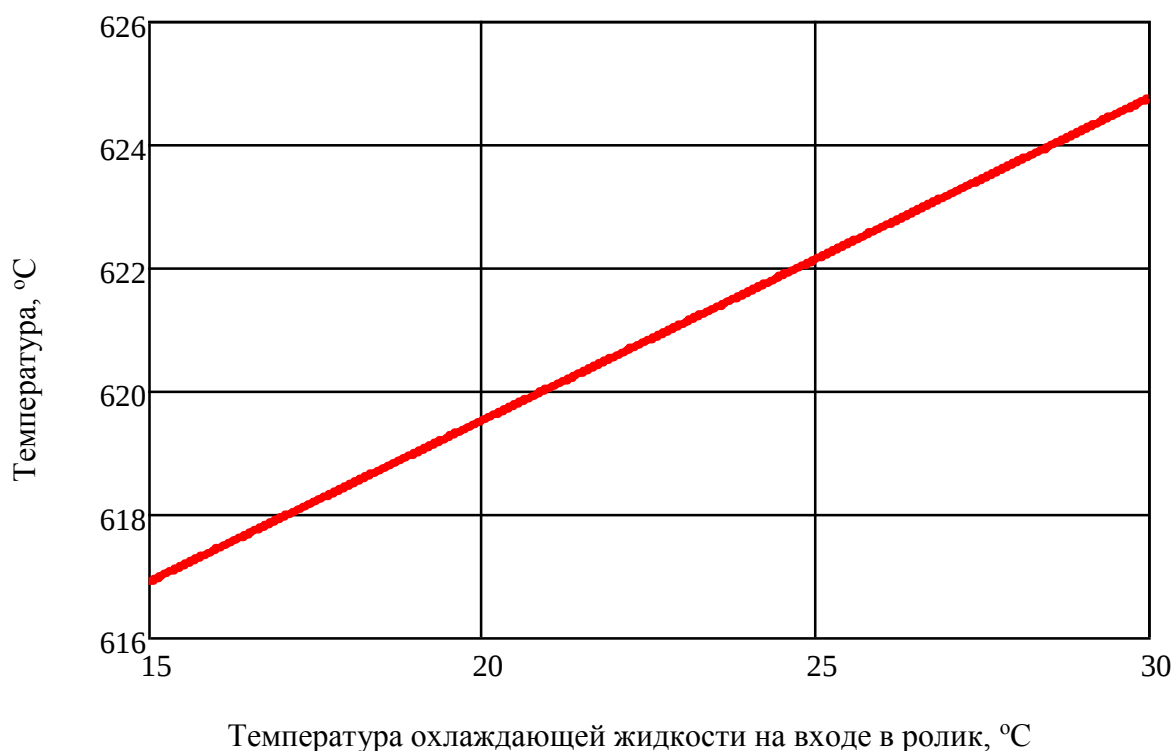


Рисунок 1. Зависимость максимальной температуры поверхности бочки от температуры охлаждающей воды на входе в ролик

Влияние интенсивности охлаждения на поверхности канала. Изменения коэффициента теплоотдачи на поверхности канала охлаждения могут быть обусловлены, например, падением давления в системе охлаждения роликов. На рис. 2. показана зависимость максимальной температуры поверхности ролика от коэффициента теплоотдачи на поверхности канала охлаждения. С понижением коэффициента теплоотдачи на поверхности канала охлаждения максимальная температура поверхности ролика увеличивается. При значении коэффициента теплоотдачи на поверхности канала охлаждения $\alpha = 1100 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ максимальная температура поверхности ролика достигает своего критического значения

($\sim 650^{\circ}\text{C}$). С увеличением интенсивности охлаждения максимальная температура поверхности ролика уменьшается.

Влияние накипи на поверхности канала охлаждения. При проектировании систем охлаждения и оценке теплового состояния роликов металлургических машин термическое сопротивление слоя накипи обычно принимается величиной постоянной во времени, а чаще – равной нулю. При этом не принимается во внимание тот факт, что в начальный период эксплуатации ролика канал охлаждения чистый и работает в условиях, резко отличающихся от условий конечного периода эксплуатации. Толщина и характеристики слоя накипи на поверхно-

сти охлаждения являются функцией времени и изменяющихся величин: состава воды, режима движения воды и температуры поверхности охлаждения и тепловой нагрузки. Накипь на поверхности охлаждения образуется в результате сложных физико-химических процессов и при понижении растворимости солей с повышением температуры воды, приводящих к образованию нерастворимых соединений. Накипь,

возникающая на поверхности канала охлаждения, имеет высокие механические свойства и низкий коэффициент теплопроводности. Например, по данным работы [2] слой накипи толщиной 0,5 мм может вызвать повышение температуры рабочих поверхностей роликов до 735 °С. На рис. 3. показана зависимость максимальной температуры поверхности ролика от толщины слоя накипи на поверхности канала охлаждения.

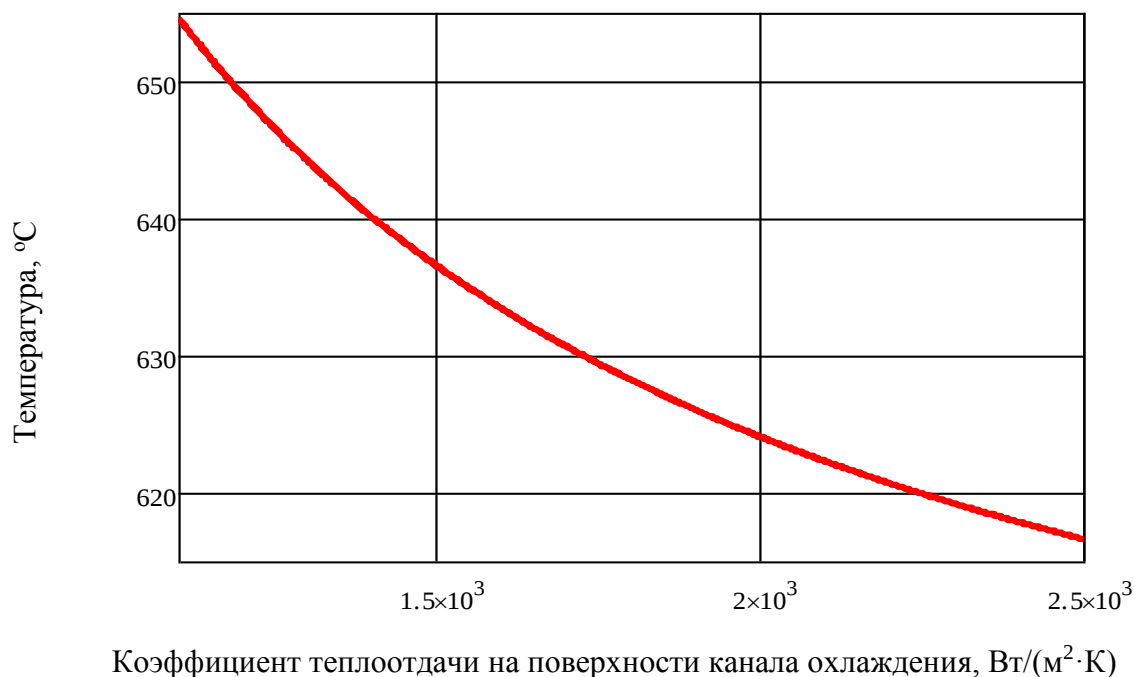


Рисунок 2. Зависимость максимальной температуры поверхности ролика от коэффициента теплоотдачи на поверхности канала охлаждения

С увеличением толщины слоя накипи на поверхности канала охлаждения максимальная температура поверхности ролика увеличивается. При значении толщины слоя накипи на поверхности канала охлаждения $\delta = 1,35$ мм максимальная температура поверхности ролика достигает своего критического значения (650°C).

Кроме того, непрерывно растущий слой накипи на поверхности канала охлаждения нарушает гидродинамический режим.

В настоящее время для снижения интенсивности накипеобразования на поверхности канала охлаждения для охлаждения роликов применяется химически очищенная вода, имеющая карбонатную жесткость

0,7 мг-экв/л. Основное вещество, образующее накипь на охлаждаемых поверхностях - карбонат кальция. Для выбранных значений параметров работы ролика и качества применяемой воды скорость образования толщины слоя накипи на поверхности канала охлаждения роликов, определенная по соотношению (3), составляет $7,8 \cdot 10^{-2}$ мм/мес. Время достижения максимальной температуры поверхности ролика своего критического значения составит ~17 мес. Толщина теплового пограничного слоя оценивается с использованием формулы Нуссельта-Крауссольтца, а коэффициент диффузии в охлаждающей жидкости определяется по формулам Стокса и Эйнштейна.

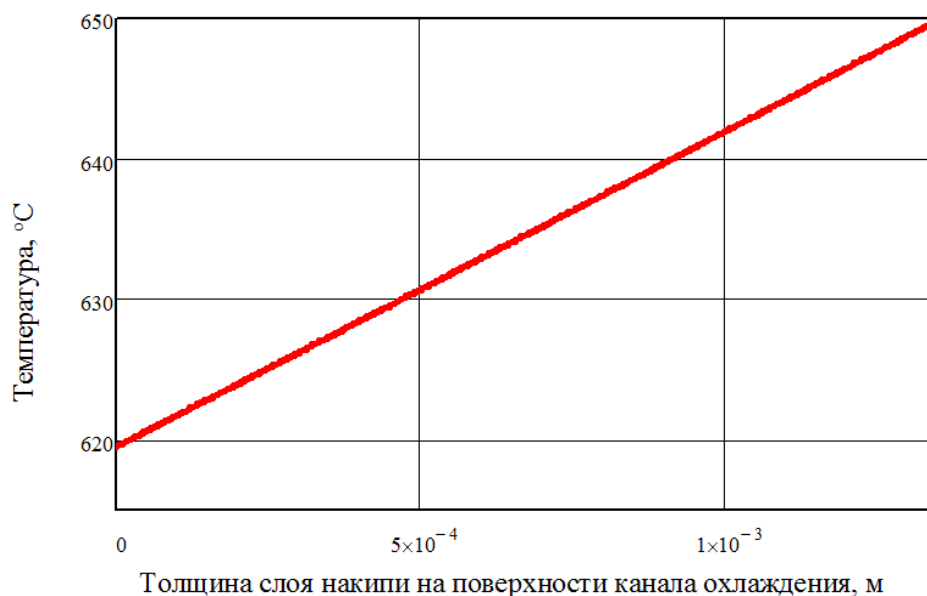


Рисунок 3. Зависимость максимальной температуры поверхности ролика от толщины слоя накипи на поверхности канала охлаждения.

Наибольшую опасность для роликов представляет сочетанное действие высокой температуры охлаждающей жидкости, падение давления в системе охлаждения роликов и использовании для охлаждения роликов жесткой воды. При выборе допустимого перепада температур ($t_{\text{вых}} - t_{\text{вх}}$) в охлаждающей жидкости следует учитывать процесс накипеобразования в канале роликов. В пределах температур $t = 20 \dots 60^\circ\text{C}$ растворимость в воде соединений кальция и магния (CaSO_4 , CaCO_3 , $\text{Ca}(\text{OH})_2$, $\text{Mg}(\text{OH})_2$) изменяется не очень существенно. В связи с этим во избежание интенсивного накипеобразования на поверхности канала охлаждения температура охлаждающей воды, покидающая ролик, не должна превышать $50 \dots 60^\circ\text{C}$. В реальных условиях следует стремиться к тому, чтобы, нагрев воды в ролике не превышал $20 \dots 25\text{K}$. Это требование выполняется определенным выбором сечения кольцевого канала охлаждения и скорости течения охлаждающей воды [10].

Заключение

Результаты представленных исследований позволяют заключить следующее:

- предложена методика диагностики температурных условий эксплуатации полых роликов машин непрерывного литья

заготовок по максимальной температуре поверхности роликов;

- предлагаемая методика диагностики температурных режимов эксплуатации роликов по максимальной температуре поверхности позволяет повысить эффективность и надежность работы роликов и МНЛЗ в целом;

- наибольшую опасность для роликов представляет сочетанное действие высокой температуры охлаждающей жидкости, падение давления в системе охлаждения роликов и использовании для охлаждения роликов жесткой воды;

- использованные в настоящей работе методы и полученные результаты могут быть применимы к проектированию новых и анализу работы существующих систем охлаждения роликов машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ), выбору материала для их изготовления и прокатных валков непрерывных широкополосных станов горячей прокатки (НШСП) и организации временных и скоростных режимов разлива или прокатки.

Библиографический список

1. Правила технической эксплуатации механического оборудования машин непрерывного литья заготовок. — М.: Металлургия, 1991. — 219с.

2. Буланов, Л.В. Машины непрерывного литья заготовок. Теория и расчет/Буланов, Л.Г. Корзунов, Е.П. Парфенов, Н.А. Юровский, В.Ю. Авдонин, под общей редакцией Г.А. Шалаева. - Екатеринбург: Уральский центр ПР и рекламы. - 2003. - 320с.
3. Ловчинский, Э.В. Эксплуатационные свойства металлургических машин/Э.В. Ловчинский, В.С. Вагин. - М.: Металлургия. - 1986. - 160с.
4. Телин, Н.В. Динамика неосесимметричного температурного поля полого вращающегося цилиндра/Н.В. Телин, Н.И. Шестаков // Теплоэнергетика.- 2005. - №.8 - С.72-76.
5. Телин, Н.В. Оценка температурных условий службы роликов металлургических машин в условиях накалиеобразования/Н.В. Телин, Н.Н. Сини-

цын//Известия Высших Учебных Заведений. Черная Металлургия. - 2016.- №59(7). -С.465-469.

6. Исаченко, В.В. Теплопередача/В.В. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. - М.: Энергоатомиздат. - 1981. - 416с.
7. Телин, Н.В. Моделирование внутреннего охлаждения роликов МНЛЗ//Н.В. Телин, Н.Н. Синицын // Сталь.- 2016.- № 6. - С.54 – 58.
8. Лыков, А.В. Теория теплопроводности. - М.: Высшая школа, 1967. - 599с.
9. Математическое обеспечение ЕС ЭВМ/ Ю.В. Денисов, В.М. Нисковских, В.Г. Житомирский и др. - Свердловск: СГПИ, 1983. - 266с.
10. Телин, Н.В. Оценка ресурса роликов металлургических машин в условиях накалиеобразования//Безопасность труда в промышленности. - 2013.- №2.- С.52-54.



УДК 621.893

В.С. Славин, Е.А. Пузик, Е.К. Чумичёв
 ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный
 технический университет им. Г.И. Носова»
 г. Магнитогорск, Россия
 E-mail: girkin@yandex.ru
 Дата поступления: 05.11.2016

ВЛИЯНИЕ КАРБОНИТРИРОВАНИЯ НА ХАРАКТЕР ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРЕНИЯ ЗУБЬЕВ В ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧАХ

Аннотация

Приведены результаты исследования на экспериментальной установке с замкнутым силовым контуром по изучению характера взаимодействия карбонитрированных поверхностей зубьев зубчатых колёс цилиндрических редукторов. Установлена зависимость величины силы тока электродвигателя на преодоление сил трения в зубчатых зацеплениях и подшипниках качения от величины нагрузок воспринимаемых испытательным стендом. Использование данной зависимости позволило выявить закономерность изменения величины коэффициента трения от величины номинального давления на контакте в зубчатом зацеплении. Исследование показало, что карбонитрирование поверхностей трения приводит к формированию упругого контакта между ними, и что при увеличении параметров шероховатости и величины номинального давления это ведёт к снижению величины коэффициента трения.

Ключевые слова: карбонитрирование поверхностей, зубчатое зацепление, коэффициент трения, экспериментальная установка, упругий контакт.

Введение

За последние годы для повышения эксплуатационных характеристик поверхностей трения применяется их карбонитрирование, что ведёт к повышению поверх-

ностной твердости и изменению параметров шероховатости поверхностей трения [1, 2]. Проведённые на машине трения исследования карбонитрированных образцов показали снижение величины коэффици-