



The article contains materials, dedicated to theoretical investigations of thermostressed state of rolls of MNLZ with the purpose of estimation of their durability. The worked out methods enable to determine the roll durability (number of loading cyclic processes) depending on speed of the ingot stretching.

В. И. ТИМОШПОЛЬСКИЙ, НАН Беларуси, Ю. А. САМОЙЛОВИЧ, НПП «Платан» (Россия),
В. А. ГОРЯИНОВ, ЗАО «БИТЕК»

УДК 669

АНАЛИЗ ТЕРМОНАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ОПОРНЫХ РОЛИКОВ МНЛЗ

Введение

Роликовая поддерживающая система является важнейшей частью технологического оборудования МНЛЗ, от технического состояния которой зависит производительность машины и качество отливаемых слитков. В современных конструкциях МНЛЗ криволинейного типа принято различать ролики поддерживающие, направляющие, выпрямляющие и транспортирующие [1, 2].

Радиальный участок МНЛЗ начинается так называемой нулевой секцией, которая устанавливается непосредственно под кристаллизатором. Главное назначение этой секции – предотвратить выпучивание оболочки слитка и прорывы жидкой стали под кристаллизатором. Ролики нулевых секций не имеют каналов охлаждения, но интенсивно охлаждаются по наружной поверхности водой, которая подается на широкие грани слитка и стекает по ним на ролики. Тепловой режим системы «слиток–ролики» на этом участке характеризуется высокой температурой поверхности слитка (1200–1300 °С [3]) и интенсивным парообразованием. Внешняя нагрузка на ролики, вызываемая ферростатическим давлением жидкой фазы слитка, относительно невелика.

На следующем участке радиальной зоны МНЛЗ могут применяться как сплошные, так и полые ролики с внутренним каналом охлаждения (диаметр внутреннего канала составляет 25–30% от наружного диаметра ролика). Ферростатическое давление на этом участке достаточно велико (высота столба жидкой фазы изменяется от 3 до 10 м) и передается через корку слитка к опорным роликам. Сочетание высокой температуры поверхности слитка, с которой соприкасаются ролики радиальной зоны, значительных механических нагрузок, воды и водяных паров, приводит к наименьшей стойкости роликов в данной зоне МНЛЗ. Классификация дефектов опорных роликов включает в себя две основные группы повреждений – износ роликов и термоусталост-

ное разрушение в виде трещин разгара. Интенсивное изнашивание роликов является следствием двух процессов: коррозирования в атмосфере водяного пара и механического взаимодействия поверхности ролика со слитком при воздействии внешней механической нагрузки.

По мере удаления вдоль технологической линии от кристаллизатора, начиная с роликовых секций радиального участка, преобладающим видом повреждения становятся термоусталостные трещины (трещины разгара). Их появление связывают с периодической сменой температур в поверхностном слое ролика при его входе в контакт с нагретой поверхностью заготовки и последующим выходом из контакта с ней.

Процесс трещинообразования усугубляется нарушениями стабильности режимов литья, т.е. кратковременным снижением скорости разливки для выполнения необходимых технологических операций (смены разливочного стакана или перековшовки) и даже остановкой процесса литья. Например, для роликов диаметром 270–300 мм из стали 25Х1М1Ф (МНЛЗ комбината «Азовсталь», Украина) длина трещин разгара может достигать 8–10 мм, а в отдельных случаях 15–20 мм, после чего разрушение ролика (долом) происходит под действием внешних механических нагрузок [4].

Анализ, выполненный специалистами металлургического комбината «Азовсталь» (Украина), показал, что в зависимости от условий эксплуатации МНЛЗ криволинейного типа средняя стойкость роликов радиального участка составляет 500 плавов, а криволинейного и горизонтального участков – 1000 плавов [4], что, безусловно, свидетельствует о необходимости решать проблему повышения продолжительности их эксплуатации.

Традиционный путь повышения долговечности роликов состоит в подборе соответствующих материалов для их изготовления, обладающих высокими показателями пластичности и твердо-

сти. Ряд марок стали, успешно работающих при повышенных температурах и переменных нагрузках (теплоустойчивые стали 15X1M1Ф, 25X1M1Ф и ряд других), обладает достаточно высокой долговечностью, но подвержен ускоренному износу при повышенных температурах.

Стали с повышенным содержанием хрома (до 12–14%) обладают высокой твердостью и повышенной коррозионной стойкостью, однако характеризуются недостаточной длительной пластичностью, что определяет их низкую сопротивляемость развитию термоусталостных трещин.

В последние годы получил распространение способ изготовления роликов с наплавленным поверхностным слоем, сердцевина которых соответствует составу теплоустойчивых сталей типа 15X1M1Ф, а поверхностный слой образован наплавочным материалом, износостойкость и разгаростойкость которого выше, чем стали 25X1M1Ф [5, 6]. К таким материалам относятся низкоуглеродистые стали мартенситного класса типа 20X6MФ, низкоуглеродистые высокохромистые типа X12–X17 и хромомарганцевые аустенитно-мартенситного и аустенитного классов типа X6ГЗ-X13Г12. Упрочняющая наплавка роликов может осуществляться простым электродуговым методом либо с использованием современных технологий (в частности, при сочетании наплавки с плазменным напылением) [5, 6].

Настоящая работа содержит материалы, посвященные теоретическим исследованиям термонапряженного состояния опорных роликов МНЛЗ с целью оценки их долговечности.

Температурное поле опорных роликов МНЛЗ

Непосредственные измерения температурного поля роликов МНЛЗ отражают факт периодического изменения температуры во времени в отдельных точках его наружной поверхности.

В наиболее завершеном виде аналитическое решение задачи термоупругости для вращающегося ролика представлено в работах Ю.В. Денисова с соавторами [7, 8].

Весьма важный результат анализа, полученный в работе [7], состоит в том, что периодическое изменение температур и термических напряжений ограничено поверхностным слоем ролика, толщина которого зависит от скорости (частоты) его вращения и составляет, по оценке авторов [9], от 1% при угловой скорости $14,3 \text{ с}^{-1}$ до 15% при угловой скорости $0,062 \text{ с}^{-1}$. «Высокие значения компонент тензора напряжений локализируются в слое периодического изменения температуры», отмечают авторы [7, с. 63].

Упомянутые выше результаты, полученные аналитическим путем, представляют несомненный теоретический интерес, однако реальная картина термонапряженного состояния опорных роликов МНЛЗ нуждается в уточнении. Прежде

всего необходимо выяснить, в какой мере на результаты расчетов влияет зависимость теплофизических и механических характеристик материала ролика от температуры. Нуждается в детализации зависимость термонапряженного состояния роликов от режима вращения, определяемого, в свою очередь, скоростью вытягивания заготовки (скоростью литья).

Если определить меру долговечности ролика как число циклов нагружения N до момента разрушения, то взаимосвязь между числом N и размахом деформаций на поверхности ролика $\Delta\epsilon$ определяется известной формулой Коффина [9]:

$$\Delta\epsilon N^{0.5} = 0,5 \ln(1-\psi), \quad (1)$$

где ψ – относительное сужение материала ролика (мера его пластичности). Для выполнения оценки долговечности опорных роликов необходимо установить зависимость размаха деформаций ролика от его геометрических и физических характеристик, а также от режима вращения ролика. Решение этой задачи нуждается в использовании математического аппарата для определения термонапряженного состояния опорных роликов, более общего по сравнению с упомянутыми выше аналитическими решениями.

Вместе с тем уравнение Коффина (1) недостаточно учитывает специфику изменения пластичности материала роликов в ходе циклического нагружения. В связи с этим предпринимается попытка обобщения уравнения (1) для описания «длительной пластичности» материала опорных роликов.

Математическая формулировка задачи

В качестве объекта исследования рассмотрим сплошной однородный ролик цилиндрической формы с полым отверстием для подвода охлаждающей воды, продольное и поперечное сечения которого показаны на рис. 1, а, б. Ролик R на участке D – E соприкасается с поверхностью стальной заготовки S , которая движется со скоростью V .

При решении задачи нестационарной теплопроводности для опорного ролика используется следующая система уравнений:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (\lambda \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\lambda \frac{\partial T}{\partial y}), \quad (2)$$

$$\alpha(\Gamma_i, t)(T - T_s) = -(\lambda \frac{\partial T}{\partial n})_{\text{пов}}, \quad (3)$$

$$T(t_0) = f(x, y), \quad (4)$$

где $T = T(x, y, t)$ – температура; x, y – координаты; t – время; ρ, c_p, λ – массовая плотность, удельная (истинная) теплоемкость и теплопроводность материала ролика; $\alpha = \alpha(\Gamma, t)$ – коэффициент теплоотдачи на поверхности ролика и $T_s = T_s(\Gamma, t)$ – температура внешней для ролика среды, заданные как функция времени для отдельных зон (Γ) на поверхности ролика.

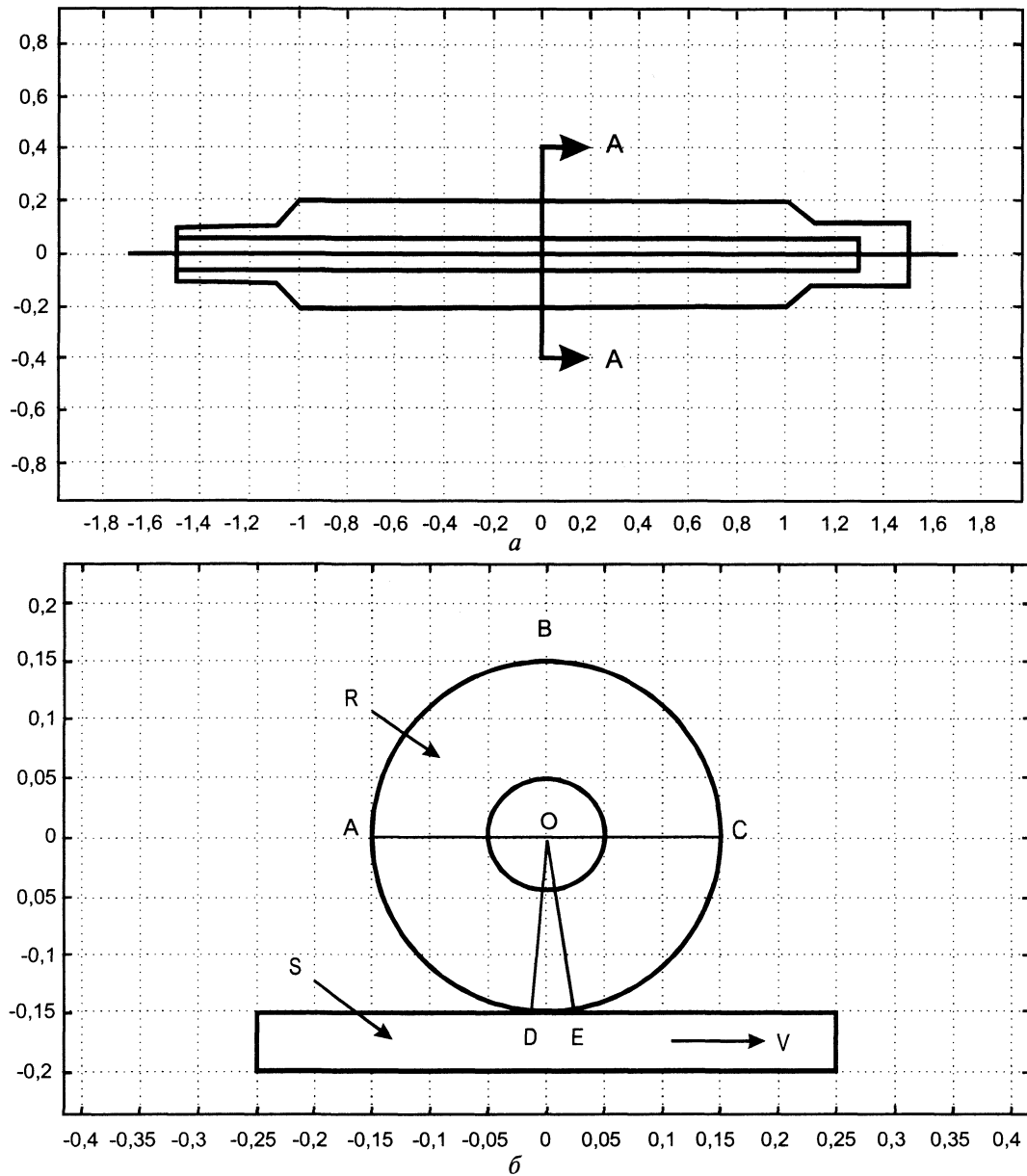


Рис. 1. Продольное (а) и поперечное (б) сечения объекта исследования – сплошного однородного ролика наружным диаметром D с полым цилиндрическим отверстием для подвода охлаждающей воды

Выбор зон определяется различными условиями теплообмена на поверхности ролика; в соответствии со схемой на рис. 1, б принято: $\alpha=5000-7000$ Вт/(м²·К) для участка DE в зоне контакта ролика с заготовкой, $\alpha=50-70$ Вт/(м²·К) для внешней стороны ролика (теплообмен излучением и конвекцией), $\alpha=2000$ Вт/(м²·К) на поверхности полости ролика, где имеет место интенсивный теплообмен с проточной водой.

Для решения задачи используем метод конечных элементов. В конечном итоге, проведя ряд математических преобразований, приходим к следующей системе дифференциальных матричных уравнений:

$$[C] \frac{\partial \{\Phi\}}{\partial t} + [K] \{\Phi\} + \{f\} = 0, \quad (5)$$

где матрицы $[K]$, $[C]$ и $\{f\}$ определяем по формулам:

(матрица жесткости):

$$[K] = \int_{(V)} [B]^T \lambda(T) [B] dV + \int_{(S)} \alpha [N]^T [N] dS, \quad (6)$$

(матрица демпфирования):

$$[C] = \int_{(V)} \rho c_p [N]^T [N] dV, \quad (7)$$

(вектор нагрузки):

$$\{f\} = - \int_{(S)} \alpha \Phi_s [N]^T dS. \quad (8)$$

При численном решении задачи теплопроводности расчетный интервал времени Δt_p принимали равным 1–2 с при задании полной длительности режима нагружения ролика в пределах 10–12 тыс. с.

Расчеты проведены с учетом зависимости теплофизических и механических характеристик стали марки 15X1M1Ф от температуры в соответствии со справочными данными [10].

В ходе расчетов варьировали следующие показатели изучаемого процесса: размеры поперечного сечения ролика (наружный диаметр, диаметр полости для охлаждающей воды), теплофизические свойства стали, скорость вытягивания заготовки V и зависящее от нее значение периода оборота ролика $\Delta t_0 = 2\pi R/V$.

В качестве примера на рис. 2, а, б, в приведены результаты расчета температур, деформаций и напряжений на поверхности ролика наружным диаметром 270 мм (диаметр полости – 75 мм) из теплоустойчивой стали 15X1M1Ф при скорости литья заготовки $V=1$ м/мин (период оборота ролика – 50,89 с) и задании начальной температуры ролика, равной 623 К.

Из рисунка следует, что в поверхностном слое ролика преобладают сжимающие напряжения, амплитуда которых изменяется от –100 до –400 МПа, а размах компоненты деформаций ϵ_x для установившейся стадии процесса ($t > 200$ с) составляет 0,27–0,30%.

Литература

1. Машины непрерывного литья слывовых заготовок / В.М. Нисковских, С.Е. Карлинский, А.Д. Беренов. М.: Металлургия, 1991.
2. Исследование непрерывной разливки стали / Под ред. Дж. Б. Линна: Пер. с англ. М.: Металлургия, 1982.
3. Тепловые процессы при непрерывном литье стали / Ю.А. Самойлович, С.А. Крулевецкий, В.А. Горяинов, З.К. Кабаков. М.: Металлургия, 1982.
4. Повышение работоспособности роликов машин непрерывного литья заготовок / А.П. Кравченко, Л.К. Лещинский, Л.С. Лепихов и др. // Металлург. 1984. №4. С. 25–27.
5. Garbett G. Major improvements hard-surfacing steel rolls for continious Casting using Philips Plasma // Steel Times. 1981. Vol. 209. Pt. 9. P. 472–473.
6. Kuroki H. et al. Wavy surfacing technique extends the survice life of Continuous Casting Rolls // Tetsu-to-Hagane. 1985. Vol. 71.
7. Денисов Ю.В., Комиссаров М.Л., Константинов Г.В., Нисковских В.М. Температурные напряжения и их влияние на характер разрушения роликов установок непрерывной разливки стали // Проблемы прочности. 1977. №5. С. 59–64.
8. Нисковских В.М., Денисов Ю.В., Карлинский С.Е. Влияние термоупругих колебаний роликов зоны вторичного охлаждения МНЛЗ на качество слитка // Сталь. 1981. № 3. С. 22–24.
9. Дульнев Р.А., Котов П.И. Термическая усталость металлов. М.: Машиностроение, 1980.
10. Марочник сталей и сплавов / Под ред. В.Г. Сорокина. М.: Машиностроение, 1989.

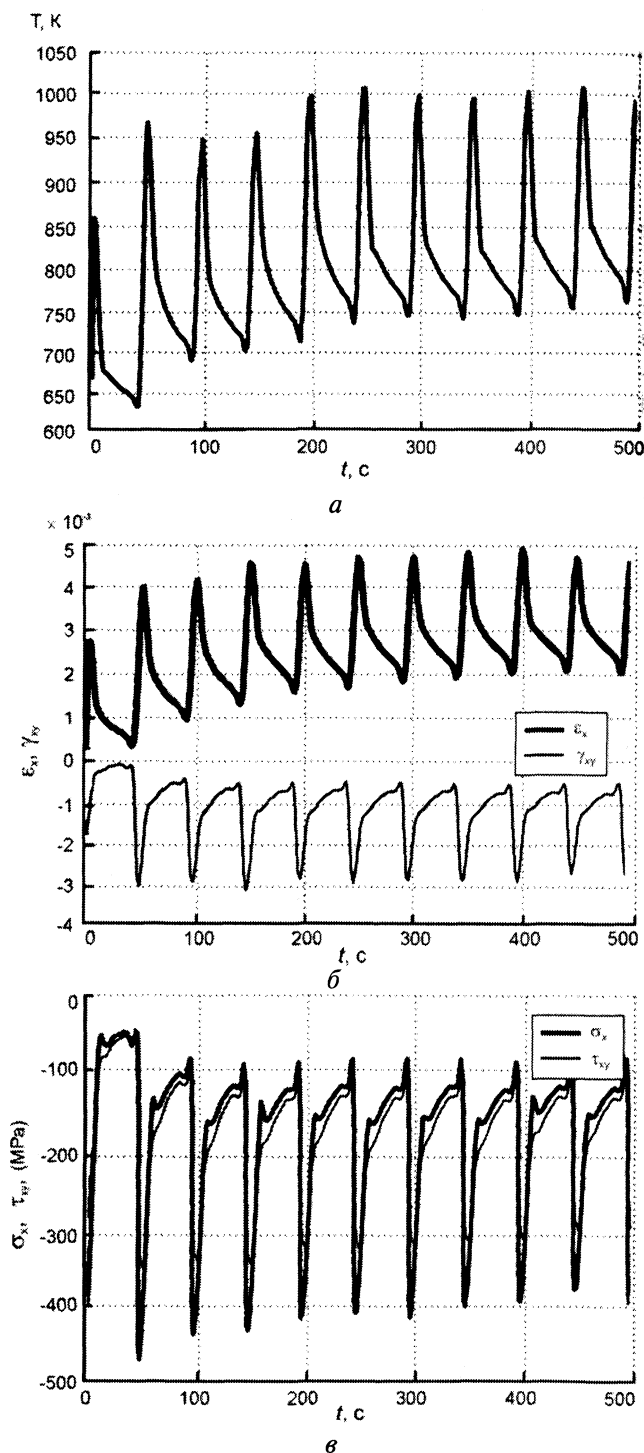


Рис. 2. Изменение во времени температуры (а) и компонент тензоров деформаций (б) и напряжений (в) для ролика из стали 15X1M1Ф диаметром 270 мм при скорости литья заготовки $V=1$ м/мин и начальной температуре ролика 623 К