

ОПТИМИЗАЦИЯ ВТОРИЧНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ В МАШИНЕ НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ ЗАГОТОВОК

S. V. Lookin, A. V. Gofman, N. G. Bashiroff

OPTIMIZATION OF SECONDARY COOLING IN A CONTINUOUS CASTING MACHINE

Изложен принцип оптимизации охлаждения сляба в зоне вторичного охлаждения криволинейной роliko-форсуночной машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) по критерию минимума эксплуатационных затрат, позволяющий минимизировать механические воздействия на ролики МНЛЗ, увеличить срок их службы и повысить надежность работы МНЛЗ в целом.

Машина непрерывного литья заготовок, зона вторичного охлаждения, оптимальное охлаждение.

The paper presents the principle of the secondary cooling optimization in a continuous casting machine by the criterion of exploitation costs minimum. The principle allows minimization of the mechanical effect to the machine rolls, increasing their service lifetime and reliability of the continuous casting machine in whole.

Continuous casting machine, secondary cooling, optimal cooling.

В настоящее время организация охлаждения стального сляба в зоне вторичного охлаждения (ЗВО) большинства криволинейных роliko-форсуночных машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) осуществляется на основе технологических карт, в которых указаны расходы воды на охлаждающие форсунки i -й зоны G_i ($i = 1, 2, \dots, n$ – число секций) в зависимости от стационарной скорости разлива v и ширины сляба $2A$. Главными требованиями при составлении технологических карт являются обеспечение заданной производительности МНЛЗ и разлива металла допустимого качества. Кроме данных требований могут быть также и другие, например, увеличение срока службы поддерживающих и тянущих роликов, снижение расхода электроэнергии на привод роликов, уменьшение числа поверхностных и внутренних трещин в металле, снижение расхода охлаждающей воды и т.п. Поскольку данные требования являются взаимосвязанными друг с другом, то можно ставить задачи оптимизации охлаждения сляба в ЗВО МНЛЗ.

При движении сляба вдоль технологической оси его затвердевшая оболочка испытывает механические воздействия со стороны роликов, поэтому для исключения трещинообразования

оболочка должна быть достаточно пластичной. Для большинства марок стали опасным считается диапазон температур $700 \div 900$ °С – так называемая область «красноломкости». При температуре ниже 900 °С сталь резко теряет пластичность, поэтому для исключения появления поверхностных трещин в оболочке температура поверхности сляба в ЗВО должна быть не ниже 900 °С. Кроме того, в работах [1, 2] отмечено, что при рациональном охлаждении сляба в МНЛЗ температура его поверхности в ЗВО должна быть постоянной вдоль технологической оси, т. е. $t_n(z) = t_{ЗВО}$, где $t_{ЗВО}$ – значение, подлежащее оптимизации.

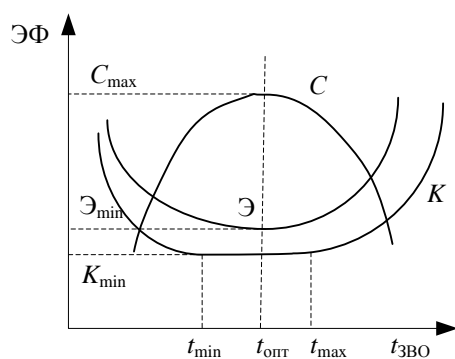
Чем ниже температура поверхности сляба в ЗВО, тем быстрее нарастает толщина оболочки сляба вдоль технологической оси и тем меньше ее пластичность, при этом увеличиваются механические нагрузки на ролики в зоне разгиба криволинейной МНЛЗ и возрастает расход электроэнергии на привод роликов.

Чем выше температура поверхности сляба в ЗВО, тем медленнее нарастает толщина оболочки сляба, а пластичность оболочки возрастает, что ведет к выпучиванию оболочки сляба между роликами в результате действия ферростатического давления жидкого металла. Чем больше выпучивание, тем больше

механические нагрузки на поддерживающие и тянущие ролики из-за роста усилий на деформацию металла и тем больше расход электроэнергии на привод роликов. Кроме того, при значительном выпучивании возникают внутренние трещины на границе твердой и жидкой фаз из-за хрупкости твердой стали в двухфазной области.

Чем больше механические нагрузки на ролики, тем меньше их стойкость и срок службы и тем чаще они подлежат замене.

На рисунке показана зависимость качественного влияния температуры поверхности сляба $t_{ЗВО}$ в ЗВО на эффективность работы МНЛЗ (ЭФ) при некоторой стационарной скорости разливки.



Зависимость эффективности работы МНЛЗ от $t_{ЗВО}$

Под эффективностью ЭФ будем понимать количество поверхностных и внутренних трещин K , обратно пропорциональное качеству металла, срок службы роликов C , расход электроэнергии \mathcal{E} на привод роликов при данной скорости разливки. Параметры C и K имеют статистический характер, тогда как величина \mathcal{E} является практически детерминированной, так как при стационарном режиме разливки имеются лишь несущественные колебания \mathcal{E} относительно своего среднего значения.

Минимальное количество трещин K_{\min} в разливаемом металле обеспечивается в некотором рациональном диапазоне температур поверхности сляба $t_{\min} \div t_{\max}$, причем нижней границей данного диапазона для низкоуглеродистых сталей можно считать значение $t_{\min} = 900^\circ\text{C}$. Для других марок стали нижняя граница может быть другой.

В настоящее время качество разлитого металла определяется за пределами МНЛЗ, причем визуально можно определять лишь поверхностные дефекты, а внутренние дефекты можно определять, например, с помощью ультразвука. Минимальный расход электроэнергии \mathcal{E}_{\min} должен коррелировать с максимальным сроком службы роликов C_{\max} , так как эти величины соответствуют минимальным механическим нагрузкам на ролики. Расход электроэнергии на ролики \mathcal{E} непрерывно измеряется в системе автоматизации МНЛЗ, а срок службы роликов C является статистической величиной, определяемой в процессе эксплуатации МНЛЗ.

Расходы воды G_i влияют на среднюю температуру поверхности сляба в зонах, а также на параметры K , C и \mathcal{E} . Также на данные величины влияют скорость разливки v , марка стали M , параметры жидкой стали, подаваемой в кристаллизатор Π . Поэтому можно записать:

$$\mathcal{E} = f(v, G_1, G_2, \dots, G_n, M, \Pi),$$

где f — функция, имеющая практически детерминированный характер. Отметим, что величина \mathcal{E} изменяется в переходных процессах разливки, связанных с изменением параметров разливки (v , Π и др.), от одного стационарного значения до другого в течение некоторого переходного времени.

В связи с вышеизложенным, в качестве оптимизируемого параметра, который достаточно просто измеряется, можно принять расход электроэнергии \mathcal{E} на привод роликов при условии обеспечения минимального количества трещин в разливаемом металле. При оптимизации охлаждения сляба в ЗВО значения G_i должны выбираться из условия обеспечения максимальной эффективности работы МНЛЗ, которая соответствует минимальному количеству трещин в металле и максимальному сроку службы роликов при данной скорости разливки. Если исходить только из максимальной стойкости роликов, то должно выполняться условие экстремума:

$$\delta\mathcal{E}/\delta G_i = 0, \quad i = 1, 2, \dots, n; \quad v, M, \Pi = \text{const.} \quad (1)$$

При выполнении условия (1) средняя температура поверхности сляба в ЗВО может выйти за пределы рационального диапазона $t_{\min} \div t_{\max}$, в результате качество разлитого металла существенно снизится. Поэтому условие (1) не подходит в качестве условия оптимального охлаждения сляба в ЗВО. Качество разлитого металла является наиболее важным критерием, который должен находиться на требуемом уровне в процессе оптимизации. Ограничительными условиями являются также максимальные расходы воды на охлаждающие форсунки зоны вторичного охлаждения.

За основу алгоритма оптимизации можно принять способ динамического охлаждения сляба, изложенный в работах [1, 2], который можно применять при стационарных и нестационарных режимах разлива. Расход воды в i -й зоне в текущий момент времени τ определяется выражением

$$G_i \tau = g \alpha \tau^*(z_i, \tau) \cdot l_i \cdot A, \quad (2)$$

где l_i – длина i -й зоны; A – ширина сляба; $g \alpha$ – обратная функция зависимости коэффициента теплоотдачи α от удельного расхода воды на поверхность сляба g ; $\alpha \tau^*$ – зависимость коэффициента теплоотдачи от времени затвердевания τ^* , определяемая из численного расчета задачи затвердевания сляба при заданном изменении температуры поверхности сляба $t_n(\tau^*)$, причем в ЗВО $t_n(\tau^*) = t_{\text{ЗВО}}$; z_i – координата середины i -й зоны, отсчитываемая от базового уровня вдоль технологической оси МНЛЗ; $\tau^* = \tau^*(z_i, \tau)$ – время затвердевания элемента сляба, который в момент τ находится на отметке z_i , определяемой из решения интегрального уравнения

$$\int_{\tau-\tau^*}^{\tau} v(\tau') d\tau' = z_i - \Delta H \tau - \tau^*,$$

где $v(\tau)$ – скорость разлива в зависимости от текущего времени τ ; $\Delta H(\tau)$ – расстояние от базового до текущего уровня мениска жидкого металла в кристаллизаторе.

В алгоритме оптимизации предлагается

варьировать температуру $t_{\text{ЗВО}}$ в диапазоне $t_{\min} < t_{\text{ЗВО}} < t_{\max}$ и определять величину

$$\varepsilon = \delta \mathcal{E} / \delta t_{\text{ЗВО}}; \quad v, \Pi = \text{const}, \quad (3)$$

где $\delta \mathcal{E}$ – изменение расхода электроэнергии на ролики при изменении температуры поверхности сляба в ЗВО на $\delta t_{\text{ЗВО}}$. При уменьшении температуры поверхности сляба в ЗВО ($\delta t_{\text{ЗВО}} < 0$), теплоотдача в ЗВО, характеризуемая коэффициентом α , должна возрасти, соответственно расходы воды G_i также должны увеличиться. Если при этом расход электроэнергии возрастет, т. е. $\delta \mathcal{E} > 0$, то значение ε будет отрицательным ($\varepsilon < 0$). На следующем шаге следует повысить температуру на $\delta t_{\text{ЗВО}} > 0$ (соответственно, уменьшить расходы воды в ЗВО), чтобы значение \mathcal{E} уменьшилось на $\delta \mathcal{E} < 0$; в этом случае также $\varepsilon < 0$.

Наоборот, если при увеличении температуры на $\delta t_{\text{ЗВО}} > 0$ расход электроэнергии возрастет, т. е. $\delta \mathcal{E} > 0$, то значение ε будет положительным ($\varepsilon > 0$). На следующем шаге следует понизить температуру на $\delta t_{\text{ЗВО}} < 0$, чтобы расход электроэнергии снизился на $\delta \mathcal{E} < 0$; при этом $\varepsilon > 0$.

Из проведенного анализа вытекает следующее правило оптимизации:

1. Если $\delta t_{\text{ЗВО}} > 0$ и $\varepsilon > 0$, то следует уменьшить $t_{\text{ЗВО}}$;
2. Если $\delta t_{\text{ЗВО}} > 0$ и $\varepsilon < 0$, то следует увеличить $t_{\text{ЗВО}}$;
3. Если $\delta t_{\text{ЗВО}} < 0$ и $\varepsilon > 0$, то следует уменьшить $t_{\text{ЗВО}}$;
4. Если $\delta t_{\text{ЗВО}} < 0$ и $\varepsilon < 0$, то следует увеличить $t_{\text{ЗВО}}$.

Оптимизацию следует производить на действующей МНЛЗ, целью оптимизации является нахождение $t_{\text{ЗВО}} = t_{\text{опт}}$, при которой обеспечивается минимум расхода электроэнергии \mathcal{E} на привод роликов при необходимом качестве металла. Значения t_{\min} и t_{\max} определяются при контроле качества разлитого металла. После изменения расхода воды в i -й секции (без изменения скорости разлива) перестройка толщины оболочки слитка в ЗВО МНЛЗ продлится в течение

$\tau_{\text{пер}} = L_{\text{ЗВО}} - z_i / v$, где $L_{\text{ЗВО}}$ – длина ЗВО вместе кристаллизатором, z_i – координата i -й секции; при одновременном изменении расходов воды во всех секциях ЗВО $\tau_{\text{пер}} = L_{\text{ЗВО}} - H / v$, где H – рабочая высота кристаллизатора. При изменении температуры на величину $\delta t_{\text{ЗВО}}$, измерение расхода электроэнергии $\delta \mathcal{E}$ и расчет значения ε следует проводить лишь через время $\tau_{\text{пер}}$.

В данной статье изложен принцип оптимизации охлаждения сляба в ЗВО криволинейной ролико-форсуночной МНЛЗ, позволяющий минимизировать механические воздействия на ролики МНЛЗ и увеличить срок их службы.

Список литературы

1. Пат. 2286863 Российская Федерация, МПК⁷ B22 D 11/22, 11/124. Способ управления вторичным охлаждением сляба в машине непрерывного литья заготовок при стационарных и переходных режимах разлива / С. В. Лукин, Ю. А. Калягин, В. Г. Ордин, Н. И. Шестаков и др. – № 2004135842/02; заявл. 07.12.04; опубл. 10.11.06, Бюл. № 31. – С. 289 – 290.
2. Лукин, С. В. Тепловые процессы при разливе стали на машинах непрерывного литья заготовок: Моногр. / С. В. Лукин. – Череповец: ГОУ ВПО ЧГУ, 2008. – 418 с.

Лукин Сергей Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной теплоэнергетики Череповецкого государственного университета, e-mail: sergej-lukin19@yandex.ru

Гофман Андрей Викторович – аспирант кафедры подъемно-транспортных машин Череповецкого государственного университета.

Баширов Навак Гаслитдинович – кандидат технических наук, доцент кафедры теплогазоснабжения и вентиляции Вологодского государственного технического университета.

Lookin, Sergey Vladimirovich – Candidate of Science (Technology), Associate Professor, Department of Industrial Thermal Engineering, Cherepovets State University, e-mail: sergej-lukin19@yandex.ru

Goffman, Andrey Victorovich – Postgraduate student, Department of Lifting and Transporting Machines, Cherepovets State University.

Bashirov, Navac Gaslitdinovich – Candidate of Science (Technology), Associate Professor, Department of Heat and Gas Supply and Ventilation, Vologda State Technical University.