

УДК 621.746.62:669.189

Федосов А.В.¹, Казачков Е.А.²

РАСЧЕТ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ В ЗОНЕ ВТОРИЧНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ КРИВОЛИНЕЙНОЙ МНЛЗ С УЧЕТОМ ЭКРАНИРУЮЩЕГО ДЕЙСТВИЯ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖИВАЮЩИХ РОЛИКОВ

Предложен усовершенствованный подход к заданию граничных условий третьего рода на поверхности непрерывно-литого слитка в зоне вторичного охлаждения (ЗВО) криволинейной МНЛЗ. Предложенный подход учитывает эффект экранирования факелов форсунок поддерживающими роликами ЗВО, зависимость коэффициента теплоотдачи от температуры поверхности слэбов и площади воздействия стекающей воды по малому и большому радиусам заготовки.

Ключевые слова: машина непрерывного литья заготовок, зона вторичного охлаждения, форсунка, водовоздушный факел, слэб.

Федосов А.В., Казачков Е.О. *Розрахунок граничних умов в зоні вторинного охолодження криволінійної МБЛЗ з врахуванням екрануючої дії системи підтримуючих роликів. Запропоновано вдосконалений підхід до завдання граничних умов третього роду на поверхні безперервно-литого зливка в ЗВО МНЛЗ. Запропонований підхід враховує ефект екранування факелів форсунок підтримувальними роликами ЗВО, залежність коефіцієнта тепловіддачі від температури поверхні слэбів і площі дії стікаючої води по малому і великому радіусам заготовки.*

Ключові слова: машина безперервного лиття заготовок, зона вторинного охолодження, форсунка, водоповітряний факел, слэб.

A.V.Fedosov, E.A. Kazachkov. *Evaluation of boundary conditions in secondary cooling zone of curved CCM taking into account screening effect of the system of guide rolls. An advanced approach was suggested for modification of boundary conditions of the third type on the surface of a continuously cast ingot inside the area of secondary cooling (SCA) of a curved continuous cast machine (CCM). The suggested approach takes into account the screening effect of slab sprayers by secondary cooling zone guide wheels, dependence of heat transfer coefficient on slabs surface temperature and the area of influence of flowing down water on small and big slab radia.*

Keywords: continuous casting machine, secondary cooling zone, nozzle, water and air spray, slab.

Постановка проблемы. Развитие компьютерных технологий обусловило широкое применение методов численного математического моделирования при изучении сложных технологических систем, что позволяет проводить исследования, не вмешиваясь в технологический процесс и представлять рекомендации с максимально уточненными параметрами. Однако адекватность результатов численных расчетов в значительной степени зависит от точности заданных граничных условий, определение которых зачастую бывает затруднено. Поэтому вопросу определения граничных условий уделяется большое внимание в процессе создания математических моделей.

Машина непрерывного литья заготовок представляет собой сложную техническую систему. При математическом моделировании данной системы описание граничных условий процесса охлаждения слитка разделяют на два этапа – расчет условий теплообмена в кристаллизаторе и в ЗВО МНЛЗ. Основными элементами ЗВО МНЛЗ являются форсунки и поддерживающие ролики, параметры и конструктивное расположение которых определяют комплексную картину охлаждения поверхности слитков. Поэтому для приближения результатов расчетов математической модели к реальным условиям тепловой работы ЗВО, а также для анализа термонапряженного состояния непрерывного слитка, необходимо учитывать распределение ло-

¹ канд. техн. наук, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

² д-р техн. наук, профессор, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

кальных значений коэффициентов теплоотдачи по охлаждаемой поверхности. Для этого необходимо рассмотреть распределение коэффициентов теплоотдачи, учитывая влияние всех элементов ЗВО на процесс охлаждения поверхности слитка.

Анализ последних исследований и публикаций. Описанные в литературе методики задания граничных условий в зоне действия факела форсунки предполагают расчет коэффициента теплоотдачи от поверхности с учетом параболического закона распределения [1, 2]. Однако в этих методиках температура поверхности полагается постоянной на всей площади действия факела, что приводит к погрешности определения локальных значений коэффициента теплоотдачи.

Наряду с этим у описанных в литературе [1-4] методик расчета локальных коэффициентов теплоотдачи есть еще два важных недостатка:

- не проводится учет возможного экранирования факела форсунки поддерживающими роликами ЗВО;
- не учитывается зависимость площади свободно стекающей воды от угла наклона охлаждаемой поверхности к горизонтальной плоскости.

Отсутствие учета этих моментов может привести к серьезным искажениям реальной картины теплоотдачи от поверхности непрерывно-литых слитков в процессе их охлаждения в ЗВО изучаемых МНЛЗ.

Цель статьи – разработка усовершенствованной методики расчета локальных коэффициентов теплоотдачи от поверхности слябовых заготовок отливаемых на криволинейной МНЛЗ, которые позволят учитывать эффект экранирования факелов форсунок поддерживающими роликами ЗВО и неравноценное воздействие свободно стекающей воды по малому и большому радиусам непрерывно-литой заготовки.

Изложение основного материала. На охлаждаемой поверхности слябов можно выделить несколько различных по характеру теплоотвода участков: зона активного воздействия факелов форсунок ЗВО, зона свободного натекания воды и участки поверхности, не орошаемые водой [1]. Первый из перечисленных участков следует выделить особо, поскольку значения коэффициентов теплоотдачи на этих участках зависят от распределения плотности орошения по площади воздействия водовоздушных факелов. Распределение плотности орошения зависит не только от расходов воды, но и от конструктивных параметров ЗВО. Поэтому в данной работе предложено процесс расчета коэффициента теплоотдачи в зоне действия факела условно разделить на два этапа: расчет распределения плотности орошения по поверхности слитка в соответствии с заданными технологическими и конструктивными параметрами и вычисление собственно коэффициента теплоотдачи в зависимости от плотности орошения и температуры охлаждаемой поверхности [2].

На первом этапе расчетов задаются хорошо известные технологические параметры - расход воды на секцию, количество и пропускные способности форсунок. В соответствии с этим рассчитывается расход воды через заданную форсунку:

$$g_i = G \cdot d_i,$$

где g_i – расход воды через i -тую форсунку, $\text{м}^3/\text{ч}$; G – расход воды на секцию, $\text{м}^3/\text{ч}$; d_i – доля воды проходящей через i -тую форсунку.

Доля воды проходящей через форсунку определяется по уравнению:

$$d_i = l_i / \sum_{k=1}^{n\phi} l_k,$$

где l_i – пропускная способность i -той форсунки, $\text{м}^3/\text{ч}$.

Средняя плотность орошения на единицу охлаждаемой поверхности определяется отношением расхода воды к площади орошаемой поверхности [1]. Для перераспределения среднего значения плотности орошения в соответствии с заданным законом орошения авторами предложено использовать зависимость вида $g_{(x,y)} = f(x,y,g_i)$. Определение наибольшего значения плотности орошения g_0 , при котором общий расход воды при заданном законе распределения будет соответствовать расходу воды через рассматриваемую форсунку, осуществляется методом приближения, реализованным на алгоритмическом языке Object Pascal.

Форма участка действия факелов форсунок принимается в виде эллипса [2]. Разработчики

форсунок для машин непрерывной разливки стремятся получить максимально равномерное распределение воды по охлаждаемой поверхности. При использовании плоскофакельных форсунок наилучшие результаты показывает параболическое распределение водовоздушной смеси [5,6]. Поэтому применяемое ранее для описания распределения охлаждающей смеси уравнение нормального распределения требует усовершенствования. В уравнение нормального распределения (1) введен показатель прямоугольности (n), который позволяет выполнять расчет плотности орошения для современных водовоздушных форсунок:

$$g_{(x,y)} = q / \exp \left(\left(\left(x \cdot \frac{Lx}{Ly} \right)^2 + y^2 \right)^n / \delta \right); \quad (1)$$

$$\delta = \frac{Lx^{2n}}{\ln(1/a)}; \quad Lx = h \cdot \operatorname{tg}(\alpha/2); \quad Ly = h \cdot \operatorname{tg}(\beta/2),$$

где $g_{(x,y)}$ – плотность орошения в заданной точке поверхности, $\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$; q – коэффициент пропорциональности, $\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$; h – высота расположения форсунки, м ; α, β – углы раскрытия форсунки, град; n – показатель прямоугольности; a – допустимая погрешность.

Экранирование факела форсунки поддерживающими роликами ЗВО может происходить в случае, когда ширина факела, определяемая малым углом раскрытия, больше межроликового промежутка. Тогда часть воды факела форсунки попадает на поверхность ролика, тем самым не оказывая активного воздействия на охлаждаемую поверхность. В расчетах систем ЗВО допускают орошение роликов с целью дополнительного охлаждения поддерживающей системы, поэтому в большинстве конструкций ЗВО присутствует эффект экранирования. Вода, попадающая на ролик, стекает с его поверхности на охлаждаемую непрерывно-литую заготовку, тем самым изменяя эффективность своего воздействия до уровня свободно стекающей воды. В связи с этим отмечается важность учета экранирующего действия роликов ЗВО при расчете локальных коэффициентов теплоотдачи.

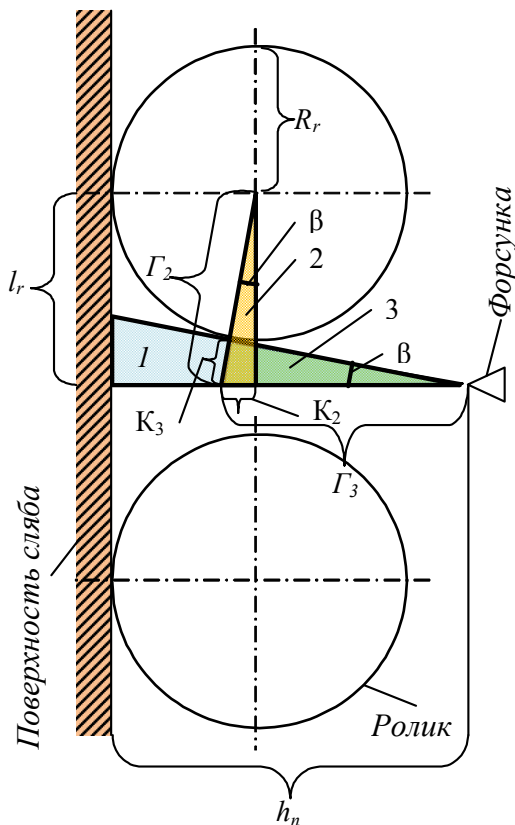


Рис. 1 – Схема определения оптимального расстояния от поверхности сляба до форсунки: h_n – расстояние от поверхности сляба до форсунки; R_r – радиус ролика; l_r – половина шага между роликами; β – угол раскрытия форсунки по малой оси; Γ_3 – гипотенуза треугольника №3; Γ_2 – гипотенуза треугольника №2; K_3 – катет треугольника №3; K_2 – катет треугольника №2

Для расчета экранирующего эффекта роликов необходимо иметь информацию о радиусах поддерживающих роликов и межроликовом расстоянии, высоте расположения и углах раскрытия факела форсунок ЗВО. На рис. 1 представлена схема расчета взаимодействия факела форсунки с поддерживающей системой. Определение максимального расстояния от поверхности сляба до форсунки, исключая эффект экранирования, представляет собой геометрическую задачу, решение которой заключается в рассмотрении трех условных прямоугольных треугольников (рис. 1).

Для расчета экранирующего эффекта роликов необходимо иметь информацию о радиусах поддерживающих роликов и межроликовом расстоянии, высоте расположения и углах раскрытия факела форсунок ЗВО. На рис. 1 представлена схема расчета взаимодействия факела форсунки с поддерживающей системой. Определение максимального расстояния от поверхности сляба до форсунки, исключая эффект экранирования, представляет собой геометрическую задачу, решение которой заключается в рассмотрении трех условных прямоугольных треугольников (рис. 1).

В соответствии с приведенной схемой (рис. 1) ниже представлен вывод конечного уравнения определения максимального расстояния от поверхности сляба до форсунки, исключая эффект экранирования:

$$h_n = R_r + (l_r \cdot \cos(\beta) - R_r) / \sin(\beta).$$

Использование предложенной схемы расчета также позволяет определять реальное воздействие факела форсунки (с учетом

его экранирования) при определении локальных коэффициентов теплоотдачи.

Второй этап расчета – это определение коэффициента теплоотдачи в зависимости от плотности орошения слитка и температуры охлаждаемой поверхности. В связи со сложностью процесса и невозможностью точной оценки влияния всех факторов при теоретических расчетах часто в конкретных условиях экспериментально оценивают зависимость коэффициента теплоотдачи от плотности орошения. В большинстве случаев при определении зависимости коэффициента теплоотдачи от плотности орошения используют простое произведение эмпирического коэффициента на значение плотности орошения в степени. Такой подход не учитывает влияния температуры охлаждаемой поверхности, поэтому с целью учета данного влияния автором была внесена в уравнение дополнительная составляющая.

В результате статистической обработки обобщенных данных была выведена эмпирическая зависимость коэффициента теплоотдачи от плотности орошения и температуры орошаемой поверхности:

$$\alpha_{охл} = \alpha_0 + \alpha_\phi,$$

где $\alpha_{охл}$ – коэффициент теплоотдачи к охлаждающему агенту, Вт/(м²·К); α_0 – коэффициент теплоотдачи стекающей воды, Вт/(м²·К); α_ϕ – коэффициент теплоотдачи при заданной плотности орошения, Вт/(м²·К).

Здесь $\alpha_0 = 10^4 / A_T$; $\alpha_\phi = 1128 \cdot q^{0,7} / A_T$; $A_T = (6,83 \cdot 10^{-8} \cdot t_{ПС}^3 - 2 \cdot 10^{-4} \cdot t_{ПС}^2 + 0,2 \cdot t_{ПС})$; q – плотность орошения, м³/(ч·м²); A_T – коэффициент учитывающий изменение коэффициента теплоотдачи при изменении температуры охлаждающей поверхности; $t_{ПС}$ – температура поверхности сляба, К.

Сопоставление расчетов зависимости коэффициента теплоотдачи от температуры охлаждаемой поверхности по представленной формуле и экспериментальных данных различных авторов [5-7] при различных плотностях орошения показало хорошее совпадение результатов при изменении варьируемых величин в пределах: температура 650 – 1300, °С; плотность орошения 0 – 35, м³/(ч·м²).

По результатам различных авторов значение коэффициента теплоотдачи в зоне свободно натекающей воды колеблется незначительно, в пределах 120 – 190 Вт/(м²·К). Эти колебания вызваны изменениями температуры охлаждаемой поверхности. Для разработанной авторами модели это влияние учитывается через принятую в уравнениях составляющую A_T .

С целью анализа различных условий охлаждения малого и большого радиусов слябов авторами предложено усовершенствование методики определения локальных коэффициентов теплоотдачи путем определения примерных максимально возможных площадей воздействия стекающей воды по малому и большому радиусам.

Схема определения площадей натекания представлена на рис. 2. В результате для получения значения длин зон стекающей воды (шириной зоны является ширина сляба) необходимыми данными являются радиус ролика, возле которого определяется длина, и угол наклона поверхности сляба к вертикальной оси. Уравнения для определения длины имеют вид:

$$\begin{aligned} x_R &= R_r / \cos(\gamma) \cdot (1 - \sin(\gamma)), \\ x_r &= R_r / \cos(\gamma) \cdot (1 + \sin(\gamma)), \end{aligned}$$

где R_r – радиус ролика, м; x_r – поверхность контакта сляба и натекающей воды по малому радиусу, м; x_R – поверхность контакта сляба и натекающей воды по большому радиусу, м; γ – угол наклона поверхности сляба к

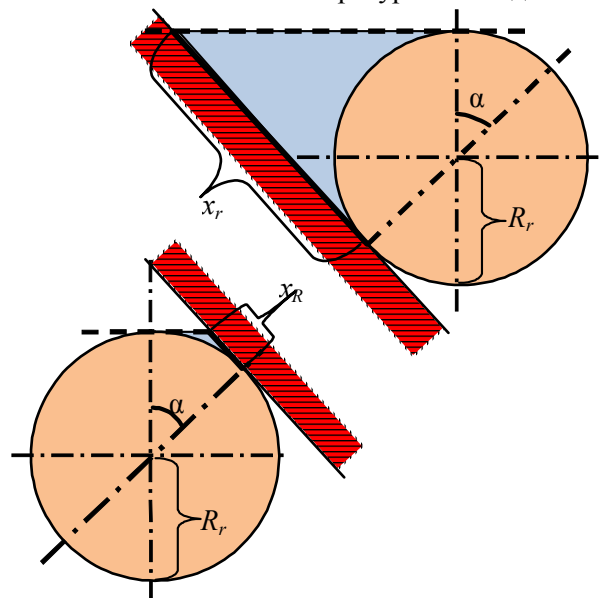


Рис. 2 – Определение площади натекания воды по большому и малому радиусам ЗВО МНЛЗ: R_r – радиус ролика; x_r – поверхность контакта сляба и натекающей воды по малому радиусу; x_R – поверхность контакта сляба и натекающей воды по большому радиусу; γ – угол наклона поверхности сляба к вертикальной оси в месте контакта ролика

вертикальной оси в месте контакта ролика, град.

При определении коэффициентов теплоотдачи в зоне свободного охлаждения на воздухе авторами предлагается использование хорошо известных зависимостей, которые широко представлены в литературе [1,4]. Основное количество тепла отводится от слитка за счет излучения в окружающее пространство, и лишь незначительная часть тепла передается за счет свободной конвекции, а также теплопроводностью в ролики по механизму контактного теплообмена.

Разработанная методика является эффективным средством задания граничных условий, учитывающих локальную неравномерность отвода тепла в ЗВО для математических моделей непрерывной разливки, что позволяет детально исследовать влияние технологических и конструктивных параметров ЗВО на процесс охлаждения непрерывно-литого сляба. Полученные по предложенной методике расчетные данные будут более точно отражать действительное распределение коэффициентов теплоотдачи по сравнению с упрощенными моделями.

Выводы

1. Применение разработанных уравнений при расчете локальных коэффициентов теплоотдачи позволяет учитывать влияние эффекта экранирования факелов форсунок поддерживающими роликами ЗВО и неравноценное воздействие свободно стекающей воды по малому и большому радиусам непрерывно-литой заготовки, что значительно повышает адекватность математического моделирования процессов охлаждения слябов в ЗВО криволинейных МНЛЗ.
2. Предложенные усовершенствования методики расчета граничных условий в ЗВО МНЛЗ позволяют с помощью математических моделей более детально изучать влияние технологических и конструктивных параметров МНЛЗ на формирование различных дефектов непрерывно-литых слитков.

Список использованных источников:

1. Емельянов В. А. Тепловая работа машин непрерывного литья заготовок / В. А. Емельянов. – М.: Металлургия, 1988. – 143 с.
2. Федосов А. В. Определение локальных коэффициентов теплоотдачи от поверхности слябовой заготовки МНЛЗ в зоне вторичного охлаждения / А. В. Федосов, Е. А. Казачков // Вісник Приазовського державного технічного університету. – 2008. – № 18. – С. 44–49.
3. Simulation of the solidification process during continuous casting / Y. Khadraoui, A. Kort, A. Seddini [e.a.] // International Journal of Applied Engineering Research. – 2007. – Vol. 2, N 3. – P. 395–409.
4. Дюдкин Д. А. Качество непрерывно-литой стальной заготовки / Д. А. Дюдкин. – К.: Техніка, 1988. – 253 с.
5. Новый стенд для исследования характеристик факела щелевых форсунок слябовых МНЛЗ / Ю. М. Айзин, А.В. Куклев, В.А. Капитанов [и др.] // Сталь. – 2003. – № 12. – С. 25–26.
6. Patrick B. Practical aspects of the design, operation and performance of caster spray systems / B. Patrick, B. Barber, D. Brown // La Revue de Metallurgie. – 2001. – April. – P. 383–390.
7. Reiners H. Heat transfer during continuous casting cooling because of spray water / H. Reiners, R. Jescher, R. Scholz // Steel Research. – 1989. – V. 60, N 10. – P. 442–450.

Рецензент: С.Л. Макуров
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ЛГТУ»

Статья поступила 02.12.2010