

бицька, Л. Т. Бойко, А. І. Белькова, Т. В. Кураєва // Математичне моделювання Дніпродзержинськ. — 2009. — № 1 (20). — С. 68–72.
 6. Меньшиков Ю. Л. Идентификация параметров моделей термодинамических свойств

металлургических расплавов с неточно заданной априорной информацией / Ю. Л. Меньшиков, Н. П. Тогобицкая, Е. И. Сысоев, А. Ю. Гринько // Проблемы математического моделирования. Тезисы доповідей. — Дніпродзержинськ, 2002. — С.90-91.

пост.15.06.12

Математическая модель расчета условий охлаждения поверхности непрерывнолитых заготовок в ЗВО МНЛЗ

А. В. ФЕДОСОВ, Е. А. КАЗАЧКОВ, В. И. БУРЛАКОВ

ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет»

Усовершенствована методика задания граничных условий на поверхности непрерывно-литого слитка в зоне вторичного охлаждения (ЗВО) МНЛЗ. На основе усовершенствованной методики расчета граничных условий разработана математическая модель прогнозирования условий охлаждения поверхности непрерывнолитых заготовок в ЗВО МНЛЗ. Модель позволяет проводить анализ распределения охладителя в ЗВО МНЛЗ заданной конструкции.

Вдосконалена методика завдання граничних умов на поверхні безперервнолитого злитку у зоні вторинного охолодження (ЗВО) МБЛЗ. На підставі вдосконаленої методики розрахунку граничних умов розроблена математична модель прогнозування умов охолодження поверхні безперервнолитого злитку у (ЗВО) МБЛЗ. Модель дозволяє проводити аналіз розподілу охолоджувача у (ЗВО) МБЛЗ заданої конструкції.

The procedure of setting boundary conditions on the continuous-casted slab surface in CCM secondary cooling zone is improved. On the basis of the improved procedure of boundary conditions calculation a mathematical model of calculation of strand surface cooling conditions in CCM secondary cooling zone is developed. The model allows to analyze cooler distribution in CCM secondary cooling zone of set design.

Постановка проблемы. Применение методов математического моделирования при решении задач формирования непрерывнолитых заготовок позволяет эффективно проводить оптимизацию многочисленных технологических параметров такой сложной технической системы как МНЛЗ. Основной физико-математической задачей рассматриваемого процесса является описание теплообменных процессов протекающих при формировании непрерывнолитых заготовок. 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.

При описании граничных условий процесса охлаждения непрерывнолитых слитков, как правило, расчеты условий теплообмена разделяют на две отдельные задачи: расчет в кристаллизаторе и в ЗВО МНЛЗ. Основными элементами ЗВО 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, необходимо при определении локальных коэффициентов теплоотдачи учитывать как технологические параметры, так и конструктивные особенности ЗВО. Уточнение граничных условий и повышение их локализации позволяют получить

подробную картину распределения тепла в слитке, что имеет большое значение при анализе термических напряжений.

Анализ последних исследований и публикаций. Описанные в литературе методики задания граничных условий в ЗВО МНЛЗ предусматривают расчет коэффициентов теплоотдачи в зависимости от значений расходов охлаждающей воды заданных по секциям МНЛЗ. В зоне действия факела форсунок современных конструкций расчет коэффициента теплоотдачи от поверхности производится с учетом параболического закона распределения охлаждающей среды [1, 2]. Однако в этих методиках температура поверхности полагается постоянной на всей площади действия факела, что приводит к погрешности определения локальных значений коэффициента теплоотдачи. Также следует отметить, что в существующих моделях не учитывается изменение характеристик факела охлаждающей среды при изменении давления воды в коллекторах ЗВО.

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 значительным отклонениям расчетных

граничных условий теплообмена в ЗВО МНЛЗ от реальных, что в результате снижает адекватность исследований и выводов сделанных на базе таких моделей.

Цель статьи – разработка усовершенствованной методики расчета плотности орошения и локальных коэффициентов теплоотдачи от поверхности слябовых заготовок в ЗВО МНЛЗ, которая позволит учитывать технологические характеристики форсунок и конструкционные особенности поддерживающей системы ЗВО.

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 именно через эти участки производится управление интенсивностью охлаждения непрерывнолитых заготовок. Значения коэффициентов теплоотдачи на этих участках зависят от распределения плотности орошения по площади воздействия водовоздушных факелов. Распределение плотности орошения зависит от расходов воды, технологических характеристик форсунок и от конструкционных параметров ЗВО (расположение форсунок и роликов). Поэтому предложено процесс расчета коэффициента теплоотдачи в зоне действия факела условно разделить на два этапа: расчет распределения плотности орошения по поверхности сляба в соответствии с заданными технологическими и конструкционными параметрами, и вычисление собственно коэффициента теплоотдачи в зависимости от плотности орошения и температуры охлаждаемой поверхности [2].

Обычно, не возникает проблем с определением исходных данных для первого этапа расчета: расход воды на секцию, количество и пропускные способности форсунок. Если конструкция рассматриваемой секции ЗВО предусматривает установку форсунок одного типа, тогда расход воды через i -тую форсунку (g_i) рассчитывается как отношение общего расхода воды на секцию (G) к количеству форсунок.

Однако с целью оптимизации распределения охлаждающей среды по поверхности слябов, современные конструкции ЗВО часто предусматривают установку в секции ЗВО форсунок с различными технологическими характеристиками. В этом случае при заданном давлении в системе форсунки могут обладать различной пропускной способностью. Поэтому расход воды i -той форсунки определяется из уравнения:

$$G = \sum_{i=1}^n g_i(P),$$

где $g_i(P)$ – расход воды через i -тую форсунку при заданном давлении, $\text{м}^3/\text{ч}$.

Зависимость расходов воды от давления определяется экспериментальным путем, и, как правило, предоставляется производителем форсунок. Применение такого подхода к определению пропускной способности форсунок позволяет не только проводить расчеты распределения охладителя в секциях ЗВО на которых установлены форсунки различных типов, но и адекватно учитывать перераспределение плотности орошения в

случае колебаний давления воды, вызванных либо утечками, либо засорением системы.

Средняя плотность орошения на единицу охлаждаемой поверхности определяется отношением расхода воды к площади орошаемой поверхности [1]. Для расчета локальных значений плотности орошения в соответствии с заданным законом распределения, авторами предложено использовать зависимость вида $g_{(x,y)} = f(x,y,G)$.

Форма участка активного воздействия 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. Для этого в уравнение введен показатель прямоуглольности (n), позволяющий корректировать расчетное распределение плотности орошения, приближая его к фактически имеющему место при использовании современных водовоздушных форсунок.

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

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

где $g_{(x,y)}$ – плотность орошения в заданной точке поверхности, $\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$; q – коэффициент пропорциональности (определяется из отношения расхода воды через i -тую форсунку (g_i) к величине площади орошения), $\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$; h – высота расположения форсунки, м ; α, β – углы раскрытия форсунки, град; n – показатель прямоуглольности; ε – 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 непрерывнолитую 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.

Для расчета экранирующего эффекта роликов необходимо иметь информацию о радиусах поддерживающих роликов и межроликовом расстоянии, высоте расположения и углах раскрытия факелов 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).

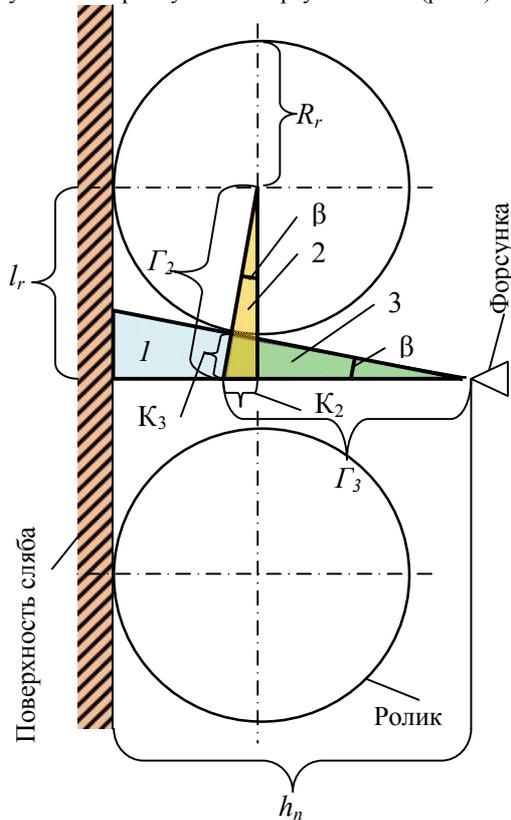


Рис. 1. Схема определения максимального расстояния от поверхности сляба до форсунки, которое обеспечивает отсутствие экранирующего эффекта: h_n – расстояние от поверхности сляба до форсунки; R_r – радиус ролика; l_r – половина шага между роликами; β – угол раскрытия форсунки по малой оси; Γ_3 – гипотенуза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

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 позволяет приблизить расчетные значения локальных коэффициентов теплоотдачи к реальным в ЗВО заданной конструкции.

Второй этап расчета – это определение коэффициента теплоотдачи в зависимости от плотности орошения слитка и температуры охлаждаемой поверхности. В связи со сложностью процесса взаимодействия капель охлаждающей среды с поверхностью сляба, зависимость коэффициента теплоотдачи от плотности орошения определяют экспериментально. В большинстве случаев при определении зависимости коэффициента теплоотдачи от плотности орошения используют простое произведение

эмпирического коэффициента на значение плотности орошения в некоторой степени. Такой подход не позволяет учитывать влияния температуры охлаждаемой поверхности на значение коэффициента теплоотдачи, поэтому авторами в уравнение была внесена дополнительная составляющая.

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

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

$$\alpha_0 = 10^4 / A_T, \quad \alpha_\phi = 1128 \cdot q^{0,7} / A_T,$$

$$A_T = (6,83 \cdot 10^{-8} \cdot t_{ПС}^3 - 2 \cdot 10^{-4} \cdot t_{ПС}^2 + 0,2 \cdot t_{ПС}),$$

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); 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 максимально возможных площадей воздействия стекающей воды по малому и большому радиусам заготовки.

Схема определения площадей натекания представлена на рис. 2. В результате для получения значения длин зон стекающей воды (за ширину зоны принимается ширина сляба) необходимыми данными являются радиус ролика и угол наклона поверхности сляба относительно вертикали. Уравнения для определения длины имеют вид:

$$x_R = R_r / \cos(\gamma) \cdot (1 - \sin(\gamma)),$$

$$x_r = R_r / \cos(\gamma) \cdot (1 + \sin(\gamma)),$$

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 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.

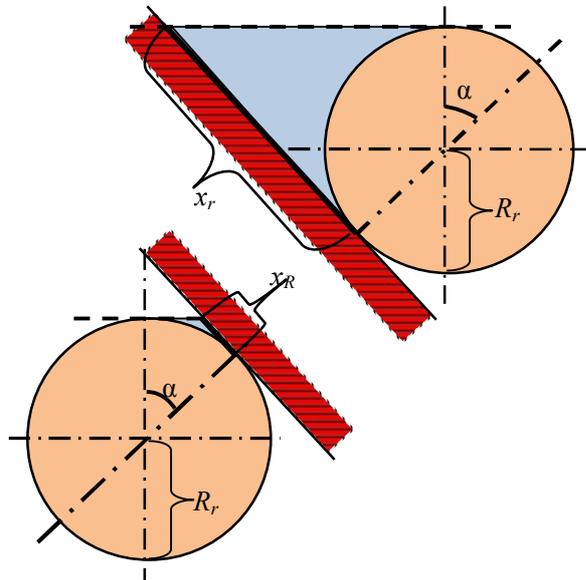


Рис. 2. Определение площади натекания воды по большому и малому радиусам ЗВО МНЛЗ: R_r – радиус ролика; x_r – поверхность контакта сляба и натекающей воды по малому радиусу; x_R – поверхность контакта сляба и натекающей воды по большому радиусу; γ – угол наклона поверхности сляба к вертикальной оси в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

Разработанная модель 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 непрерывнолитого сляба. Полученные по предложенной методике расчетные данные будут более точно отражать действительное распределение коэффициентов теплоотдачи по сравнению с упрощенными моделями.

На базе ГВУЗ «ПГТУ» разработано компьютерное приложение, базирующееся на разработанной математической модели распределения плотности орошения по охлаждаемой поверхности непрерывнолитой заготовки. Работа с приложением позволяет адекватно анализировать влияние основных технологических и конструктивных параметров зоны вторичного охлаждения на распределение воды по поверхности непрерывнолитых слитков.

Подробный расчет условий охлаждения потребовал определения большого количества технологических и конструктивных параметров ЗВО. Для некоторых систем ЗВО количество параметров составляло несколько тысяч, поэтому удачным решением на этапе задания условий было применение электронных таблиц, что позволило не только значительно упростить интерфейс приложения, но и

использовать средства автоматизации при задании необходимых данных. Для сохранения результатов расчетов также использовался формат электронных таблиц, что в свою очередь позволило максимально эффективно проводить дальнейшую обработку, хранение и визуализацию полученных данных.

Примеры рабочих окон разработанного приложения представлены на рис. 3. Для повышения наглядности представления результатов расчета и визуализации взаимного расположения основных элементов ЗВО используются средства OpenGL.

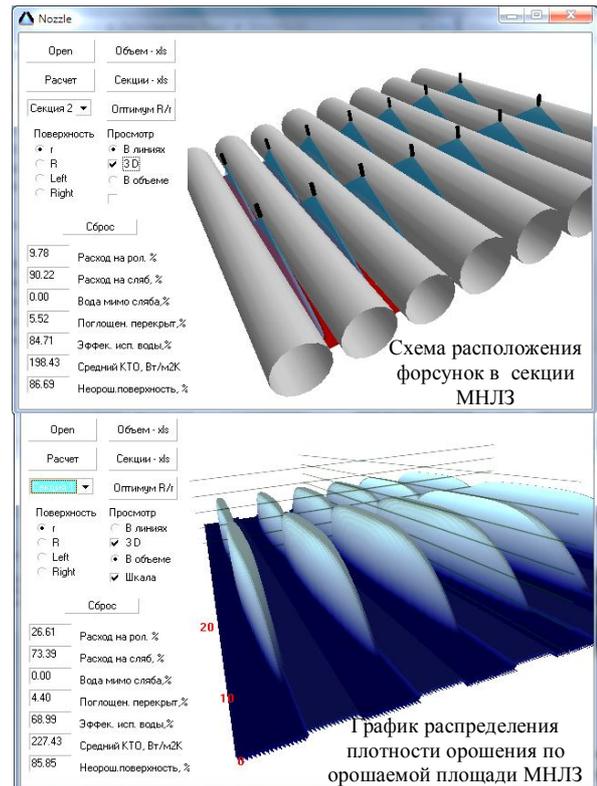


Рис. 3. Рабочие окна математической модели расчета распределения плотности орошения по охлаждаемой поверхности слябов

С помощью схемы расположения форсунок в секции ЗВО МНЛЗ возможна визуальная оценка процесса взаимодействия факелов охлаждающей среды с поддерживающими роликами и поверхностью слитка. Интерфейс программы позволяет рассматривать ЗВО отдельно по секциям и в зависимости от выбранной плоскости охлаждения (малый, большой радиусы и левая и правая грани).

Результаты расчета представлены в виде объемного графика распределения плотности орошения по охлаждаемой поверхности сляба. Другими полезными результатами расчета являются: расход воды на ролики (доля охлаждающей воды, поглощенная перекрытием поддерживающей системы), расход воды между роликами (доля охлаждающей воды, проникающей в межроликовый промежуток), вода, расходуемая мимо слитка, поглощение перекрытием факелов (часть охлаждающей воды, попадающая на участки перекрытия факелов форсунок), эффективное использование воды (доля охлаждающей воды, пошедшая на охлаждение

непосредственно поверхности сляба), средний КТО (оценка среднего коэффициента теплоотдачи при заданной температуре поверхности сляба в секции, Вт/м²К), неорошаемая поверхность (доля охлаждаемой поверхности, на которую не воздействуют факела форсунок).

Полученные в результате работы предложенной математической модели данные представляют несомненный интерес, как при анализе эффективности работы действующих систем ЗВО МНЛЗ, так и при решении задач их разработки, реконструкции и оптимизации.

Выводы

1. Предложенные уравнения для расчета граничных условий в ЗВО позволяют при расчете локальных коэффициентов теплоотдачи учесть эффект экранирования факелов охладителя поддерживаемыми роликами ЗВО, различие в условиях охлаждения по малому и большому радиусам непрерывнолитой заготовки и температуру поверхности заготовки.
2. Учет перечисленных параметров повышает адекватность математического моделирования процессов охлаждения слябов в ЗВО криволинейных МНЛЗ и позволяет значительно расширить возможности виртуальных исследований работы системы ЗВО с целью оптимизации ее конструкции и технологических параметров.
3. Разработанная математическая модель основанная на усовершенствованной методике расчета граничных условий, позволяет в кратчайшие сроки проводить анализ распределения охладителя в ЗВО МНЛЗ заданной конструкции и более детально изучать

влияние технологических и конструкционных параметров МНЛЗ на формирование различных дефектов непрерывнолитых слитков и эффективность работы ЗВО.

ЛИТЕРАТУРА

1. Емельянов В. А. Тепловая работа машин непрерывного литья заготовок / В. А. Емельянов. — М. : Metallurgia, 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 непрерывнолитой 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.

пост. 15.06.12.