

АНАЛИТИЧЕСКИЙ СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ОХЛАЖДЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ НЕПРЕРЫВНОЛИТОЙ ЗАГОТОВКИ В ЗВО

Бирюков А.Б., Кравцов В.В, Дылева О.Ю.

(ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк)

В данной работе предложен аналитический метод определения оптимального распределения интенсивности охлаждения поверхности непрерывнолитой заготовки в ЗВО, что представляет интерес для проверки существующих режимов охлаждения заготовок и проектирования новых режимов охлаждения

Несмотря на широкие возможности, предоставляемые методом математического моделирования для исследования тепловых процессов, протекающих при затвердевании и охлаждении непрерывнолитых заготовок, в этой области остается значительное количество нерешенных проблем.

Например, решение вопроса о том, какое температурное поле будет иметь место при заданной произвольной интенсивности охлаждения, на сегодня проработано достаточно глубоко [1-3]. А обратный вопрос об определении наилучшего варианта охлаждения нельзя считать окончательно решенным.

Существует несколько вариантов решения задачи оптимизации системы охлаждения МНЛЗ. Первый основан на использовании метода перебора. При этом задается множество вариантов исходных данных, которые позволяли бы охватить весь возможный спектр наборов параметров охлаждения, и с ними при помощи математической модели проводятся численные эксперименты. Полученные характеристики температурного поля сравниваются на основании выбранных критериев оптимальности. Выбирается лучшее решение, исходные данные, при которых оно было получено, считаются оптимальными параметрами охлаждения.

Вторым способом решения задачи оптимизации системы охлаждения МНЛЗ является использование упрощенных аналитических подходов. Так, в работе [4] эта задача решалась при помощи графо-аналитического метода. Сущность решения заключается в определении такой интенсивности охлаждения, чтобы темп спада температуры был одинаков на поверхности заготовки и у фронта затвердевания.

Третьим вариантом оптимизации охлаждения является рассмотрение обратных задач. Когда в качестве исходных данных задаются требуемые характеристики температурного поля, а распределение интенсивности ох-

лаждения является однозначно определяемой искомой величиной (величинами). Такие задачи являются достаточно трудоемкими, как с математической, так и с алгоритмической точки зрения. В литературе мало информации об успешном использовании этого подхода при решении конкретных задач такого рода. Одним из примеров является работа [5], в которой высказанная выше идея о необходимости достижения равенства темпа спада температуры на поверхности заготовки и у фронта затвердевания была реализована при помощи соответствующей математической модели.

В данной работе предложен еще один вариант аналитического способа для определения оптимального распределения интенсивности вторичного охлаждения. Его суть заключается в том, что тепловой поток, отводимый от поверхности расчетного сечения заготовки в каждый момент времени, должен равняться сумме теплового потока, выделяющегося на фронте затвердевания и теплового потока, соответствующего охлаждению уже затвердевшего массива металла с заданной скоростью.

Исходя из этого плотность теплового потока, который необходимо отводить от поверхности заготовки, зависит от времени следующим образом:

$$q(\tau) = \frac{\frac{k}{2 \cdot \sqrt{\tau}} \cdot 4 \cdot (a - 2 \cdot k \cdot \sqrt{\tau}) \cdot \rho_{\text{жм}} \cdot q_{\text{кр}}}{4 \cdot a} + \frac{[a^2 - (a - 2 \cdot k \cdot \sqrt{\tau})^2] \cdot \rho_{\text{тв}} \cdot c_{\text{м}} \cdot \Delta t}{4 \cdot a}, (1)$$

где k – коэффициент затвердевания, $\text{м} \cdot \text{с}^{-0,5}$;

a – ширина грани заготовки, м ;

$q_{\text{кр}}$ – теплота затвердевания стали, Дж/кг ;

$\rho_{\text{жм}}$ – плотность жидкого металла, кг/м^3 ;

$\rho_{\text{тв}}$ – плотность затвердевшего металла, кг/м^3

$c_{\text{м}}$ – средняя теплоемкость затвердевшего металла, $\text{Дж/(кг} \cdot \text{К)}$;

Δt – заданная скорость спада среднемаховой температуры металла в ЗВО, $^{\circ}\text{C}$.

В общем случае коэффициент затвердевания металла k зависит от темпа охлаждения твердого металла Δt . В предложенной модели эта зависимость не учитывается математически, она должна быть отражена при задании исходных данных k и Δt на основании практического опыта.

Еще одним упрощением является картина затвердевания (использованная при составлении зависимости (1)), согласно которой фронты затвердевания движутся параллельно граням. При этом вносится некоторая погрешность за счет того, что не учитывается искривление фронтов затвердевания при значительной толщине корочки (Рисунок 1).

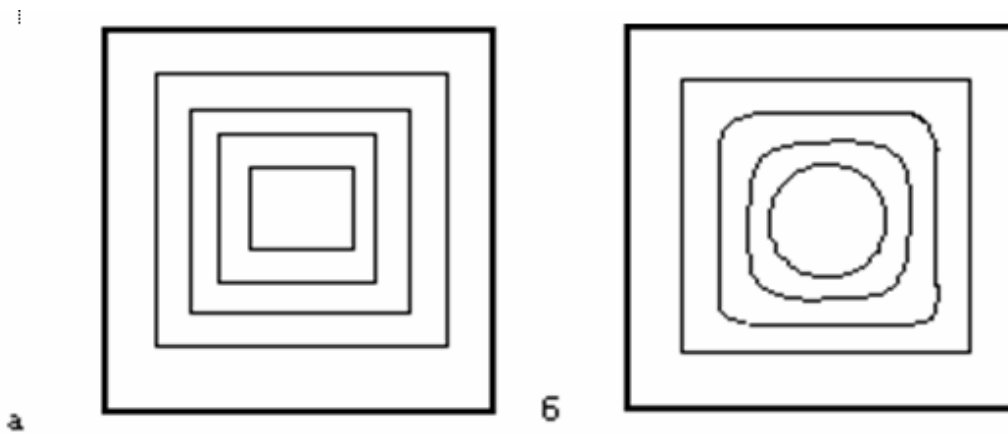


Рисунок 1 – Качественный характер продвижения фронта затвердевания в непрерывнолитой сортовой заготовке (а – упрощенный, принятый в данной работе; б – реальный)

Ниже рассмотрено использование предложенной зависимости (1) для определения оптимального распределения интенсивности охлаждения в ЗВО на примере следующих исходных данных: ширина грани сортовой заготовки 130 мм, теплота затвердевания 260 кДж/кг, плотность жидкого металла принята 6800 кг/м³, плотность затвердевшего металла 7600 кг/м³, теплоемкость затвердевшего металла 680 Дж/(кг·К), скорость разлива $v=4$ м/мин. Исследования параллельно проведено для двух вариантов охлаждения: более и менее интенсивного. Для более интенсивного принят темп падения среднемассовой температуры заготовки 2 °С/с и коэффициент затвердевания 3,2 см·мин^{-0,5}. Для менее интенсивного принят темп охлаждения 1,5 °С/с и коэффициент затвердевания 3,0 см·мин^{-0,5}.

Изменение плотности теплового потока, отводимого от поверхности заготовки, полученное при помощи зависимости (1) приведено на Рисунке 2. При отображении этих данных осуществлен переход от времени (τ) как аргумента к соответствующим продольным координатам расчетного сечения (X): $X=v \cdot \tau$.

Ниспадающий характер кривых объясняется следующим образом. Линейная скорость продвижения фронта затвердевания меняется во времени по закону квадратного корня. Кроме того, общая форма фронта затвердевания для сортовой заготовки представляет собой фигуру с уменьшающимся периметром. Поэтому составляющая теплового потока, связанная с отводом тепла затвердевания постоянно уменьшается. Зато масса затвердевшего металла с течением времени увеличивается и потому составляющая теплового потока, связанная с охлаждением твердой корочки с заданной скоростью должна увеличиваться. В результате имеем ниспадающую во времени кривую, темп падения которой заметно замедляется на конечных участках ЗВО.

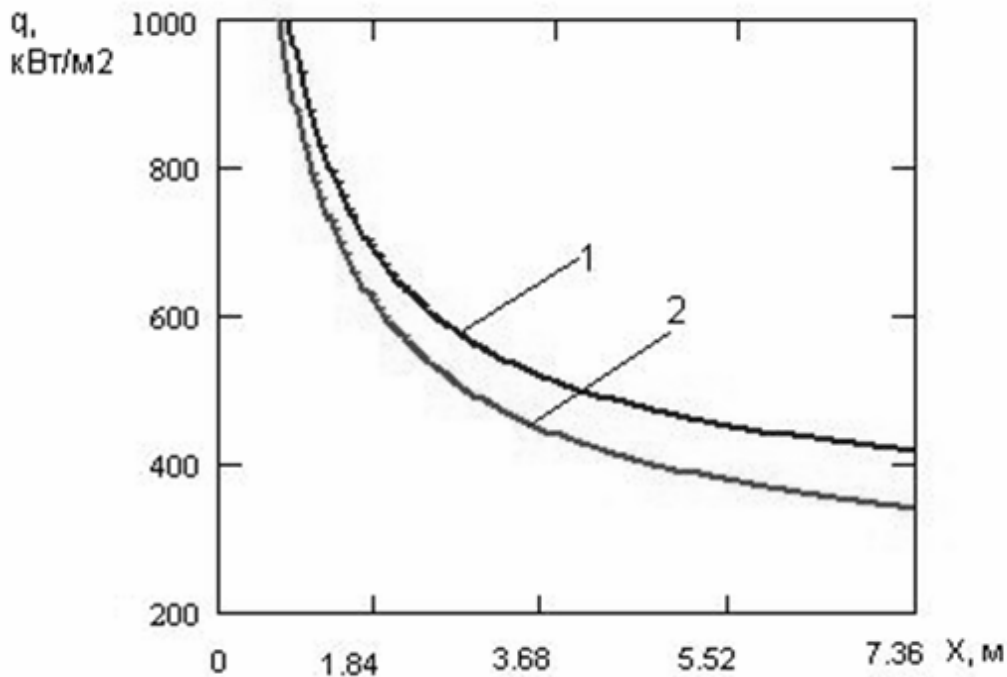


Рисунок 2 – Оптимальное распределение плотности теплового потока, отводимого от поверхности заготовки вдоль технологической оси МНЛЗ (1 – усиленное охлаждение, 2 – ослабленное охлаждение)

Определяем при помощи закона Ньютона-Рихмана изменение во времени коэффициентов теплоотдачи на основании рассмотренной выше зависимости тепловых потоков от времени (1) (Рисунок 3).

При этом предполагалась линейность закона распределения температуры по толщине заготовки, что позволило считать темп изменения температуры поверхности таким же как темп изменения среднemasсовой температуры.

Для проверки адекватности предложенной аналитической методики коэффициенты теплоотдачи, полученные с ее помощью, были заданы в качестве исходных данных в математическую модель затвердевания и охлаждения непрерывнолитых заготовок. Речь идет о классической модели, основанной на решении дифференциального уравнения нестационарной теплопроводности. Основные подходы к созданию и использованию таких моделей детально рассмотрены во множестве работ, например, [1-2] и потому здесь не приводятся.

Суть проверки заключается в том, что при проведении численных экспериментов с коэффициентами теплоотдачи, полученными при помощи аналитической методики, в случае адекватности последней, должны быть получены результаты (коэффициент затвердевания металла k и темп охлаждения твердого металла Δt), равные или близкие по значению к тем, что

были использованы как исходные данные для определения коэффициентов теплоотдачи.

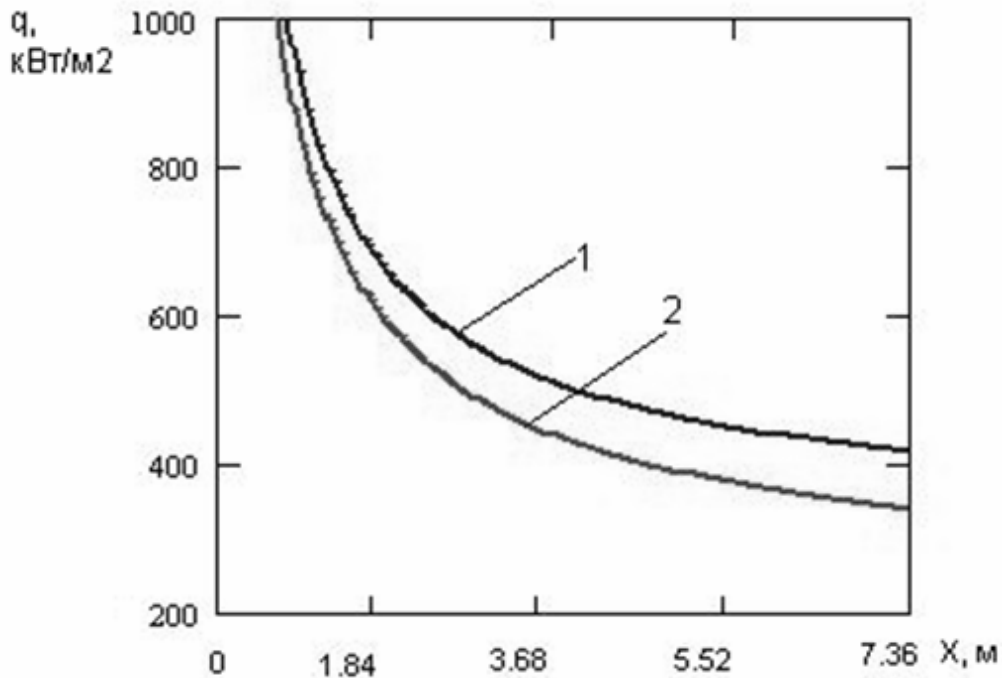


Рисунок 3 – Оптимальное распределение коэффициентов теплоотдачи вдоль технологической оси МНЛЗ (1 – усиленное охлаждение, 2 – ослабленное охлаждение)

Для проведения численного эксперимента приняты приведенные ниже исходные данные. Длина кристаллизатора – 0,9 м, средний коэффициент теплоотдачи от поверхности заготовки в кристаллизаторе – 1800 Вт/(м²·К). Для координат соответствующих началу и концу секторов ЗВО взяты усредненные значения коэффициентов теплоотдачи (по рисунку 3 и на основании Таблицы 1). Внутри секторов принято изменение значения коэффициентов теплоотдачи по линейному закону. Остальные исходные данные для проведения численного эксперимента взяты такими же как для аналитической модели.

Результаты проведения численного эксперимента приведены на Рисунке 4. Их анализ показывает, что:

- средний темп охлаждения затвердевшего металла за время прохождения ЗВО расчетным сечением (97 с) составил 1,77 °С/с.
- коэффициент затвердевания составил 3,0 см·мин^{-0,5} (из анализа кривой 10 на рис.4, видно, что середина заготовки затвердела на отметке 18.9 м, то есть за 4.73 мин, откуда и найдено значение коэффициента затвердевания).

Таблица 1 – Значения коэффициентов теплоотдачи для характерных участков технологической оси МНЛЗ, определенные при помощи аналитической модели (α_{\min} и α_{\max} , взятые по рисунок 3) и заданные как исходные данные в математическую модель ($\alpha_{\text{зад}} = ((\alpha_{\min} + \alpha_{\max})/2)$)

		Названия характерных участков технологической оси и их продольные координаты, отсчитанные от мениска			
		Начало 1-го сектора ЗВО (выход из кристаллизатора) 0,9 м	Начало 2-го сектора ЗВО (конец 1-го сектора) 1,3 м	Начало 3-го сектора ЗВО (конец 2-го сектора) 3,3 м	Конец 3-го сектора ЗВО (начало зоны воздушного охлаждения) 7,3 м
Значения коэффициентов теплоотдачи, Вт/(м ² ·К)	α_{\min}	694	571	393	324
	α_{\max}	754	630	462	414
	$\alpha_{\text{зад}}$	724	600	427	369

Для проведения численного эксперимента были использованы коэффициенты теплоотдачи, согласно аналитической модели соответствующие коэффициентам затвердевания 3,0 и 3,2 см·мин^{-0,5} и темпам спада среднemasсовой температуры 1,5 и 2 °С/с. Поскольку этим данным соответствуют полученные при помощи математической модели значения коэффициента затвердевания 3,0 см·мин^{-0,5} и темпа спада среднemasсовой температуры затвердевшего металла 1,77 °С/с, то можно сделать вывод о достаточной адекватности предложенной аналитической модели, описываемым процессам затвердевания и охлаждения непрерывнолитой заготовки.

Кроме того, полученные в результате численного эксперимента расчетные кривые (рисунок 4), которые с некоторой условностью можно рассматривать как практическую проверку предложенной аналитической методики, характеризуются высокой степенью равномерности и не имеют резких бросков. Расстояния между соседними кривыми практически одинаковы, что говорит о близости закона распределения температуры по толщине корочки к линейному. Поэтому предложенная зависимость может быть рекомендована для определения распределения интенсивности охлаждения вдоль технологической оси МНЛЗ.

Особенно целесообразно ее использование в случае, когда необходимо централизованно спроектировать или проверить режимы охлаждения целого семейства типоразмеров заготовок для всего диапазона скоростей разливки.

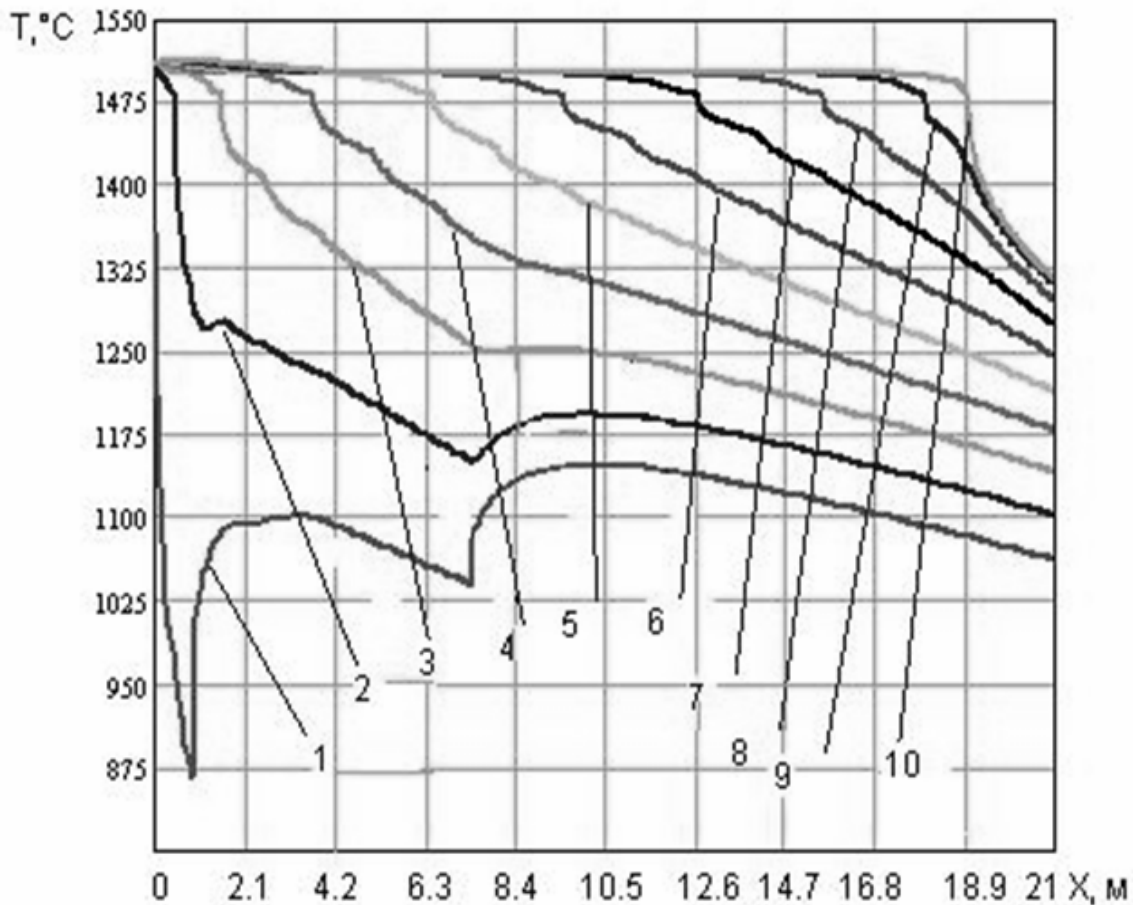


Рисунок 4 – Результати моделювання температурного поля заготовки на основаних исходних даних, полученных при помощи предложенной аналитической модели (1 – точка по середине поверхности заготовки, 2 – точка на оси поперечного сечения заготовки на глубине 7,22 мм; 3 – 14,44 мм; 4 – 21,66 мм; 5 – 28,88 мм; 6 – 36,1 мм; 7 – 43,32 мм; 8 – 50,54 мм; 9 – 57,76; 10 – 65,0 мм)

В этом случае при помощи известных зависимостей [1] можно перейти от распределения коэффициентов теплоотдачи по секторам к соответствующим расходам воды или водовоздушной смеси. Обычно в практике непрерывной разливки интенсивность охлаждения поддерживается постоянной по длине сектора, а согласно зависимости (10) она меняется, поэтому расход воды для сектора необходимо определить исходя из среднего значения коэффициента теплоотдачи.

Перспективной для разливки высококачественных марок стали представляется задача обеспечения плавного изменения коэффициентов теплоотдачи от поверхности заготовки вдоль ЗВО и, соответственно вдоль каждого сектора. С технической точки зрения такая задача может быть решена за счет использования форсунок различного типоразмера – по мере приближения к концу сектора вкручиваются форсунки меньшего типоразмера с меньшей пропускной способностью.

Выводы

Предложенный в данной работе метод определения распределения интенсивности охлаждения вдоль технологической оси МНЛЗ представляет собой эффективный инструмент для проверки существующих режимов охлаждения заготовок в ЗВО и проектирования новых.

Литература

1. Емельянов В.А. *Тепловая работа машин непрерывного литья заготовок: Учебн. пособие для вузов.* – М.: Металлургия, 1988. – 143 с.
2. *Процессы непрерывной разливки / А.Н. Смирнов, В.Л. Пилушенко, А.А. Минаев и др.* – Донецк: ДонНТУ, 2002. – 536 с.
3. Кравцов В.В., Бирюков А.Б., Масс Н.С. *Использование математического моделирования для оптимизации процесса непрерывной разливки // Металл и литье Украины.* – 2004. – №6. – С. 12 – 14.
4. Бирюков А.Б., Кравцов В.В., Лоленко Е.С. *Изучение напряженно-деформированного состояния формирующейся непрерывнолитой заготовки на основе анализа темпа изменения температуры // Металл и литье Украины.* – 2006 – №11-12. – С. 17-19
5. Шелудченко В.И., Кравцов В.В., Бирюков А.Б. *Разработка оптимальных режимов вторичного охлаждения МНЛЗ // Труды X-ой Юбилейной Международной конференции «Ресурсоэнергосбережение в условиях рыночной экономики».* – К.: НДЦ «Навтохім», 2003. – С. 50 – 51.

© Бирюков А.Б., Кравцов В.В., Дылева О.Ю. 2008