

переходных процессах представлены в работе [1]. Применительно к сортовым МНЛЗ авторы представляли работу [4], где основной упор делался на изучение изменения температуры поверхности заготовки при работе ЗВО в нерасчетных условиях. Внимание не было уделено влиянию неравномерности охлаждения на температурное состояние корочки в целом.

В данной работе целью исследования является установление влияния отклонений работы ЗВО на температурное поле всего массива заготовки и определение скорости распространения температурных возмущений в корочке непрерывнолитой сортовой заготовки.

Искомое температурное поле в данной работе определяется на основе решения дифференциального уравнения нестационарной теплопроводности для расчетного сечения, движущегося вдоль оси МНЛЗ со скоростью вытягивания [1]. То есть речь идет о решении двухмерной задачи:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\lambda_{\text{эф}}}{\rho c_{\text{эф}}} \cdot \left(\frac{\partial^2 t}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} \right),$$

где ρ – плотность металла, кг/м³; $c_{\text{эф}}$ – эффективная теплоемкость, учитывающая выделение тепла фазового перехода, Дж/(кг·К); $\lambda_{\text{эф}}$ – эффективная теплопроводность, учитывающая влияние конвективных процессов в жидкой лунке заготовки на теплообменные процессы, Вт/(м·К).

Задача моделирования затвердевания и охлаждения непрерывнолитой заготовки в большинстве работ решается именно в вышеприведенной постановке, подходы к ее решению детально рассмотрены во многих работах, например [1, 3].

В данном исследовании при задании граничных условий теплообмена на поверхности заготовки предполагалось равномерное распределение интенсивности теплоотдачи в пределах характерных участков техно-

логической оси (кристаллизатор, 1-ый сектор ЗВО, 2-ой сектор ЗВО, 3-ий сектор ЗВО, зона свободного охлаждения заготовки на воздухе).

Для проведения численных экспериментов приняты следующие основные исходные данные. Марка стали – 20, скорость разливки – 3,2 м/мин, сечение заготовки 130×130 мм. Базовое распределение интенсивности охлаждения: кристаллизатор – 1800 Вт/(м²·К), 1-ый сектор ЗВО – 1300 Вт/(м²·К), 2-ой сектор ЗВО – 800 Вт/(м²·К), 3-ий сектор ЗВО – 500 Вт/(м²·К), зона свободного охлаждения – 230 Вт/(м²·К).

Активная длина кристаллизатора 0,9 м, длины секторов ЗВО 0,4, 2,05 и 4,0 м соответственно.

Разработанная авторами математическая модель позволяет задавать граничные условия отдельно для каждой из граней заготовки. Это позволило сократить объем исследований при проведении численных экспериментов по установлению влияния отклонений работы ЗВО на температурное поле заготовки в целом. Сущность подхода заключалась в том, что для трех граней заготовки: верхней, правой и нижней задавалось базовое распределение коэффициентов теплоотдачи вдоль технологической оси, а для левой грани в пределах одного из секторов ЗВО задавалось уменьшенное значение коэффициента теплоотдачи. В результате проведения численных экспериментов определялось температурное поле заготовки. После чего для каждого расчетного момента времени производилось вычитание температур точек, симметричных относительно вертикальной оси поперечного сечения заготовки (10''-10', 9''-9'... 1''-1') (рис. 1). Таким образом, было получено изменение перепада температур между симметричными точками, лежащими в районе грани с разной интенсивностью охлаждения.

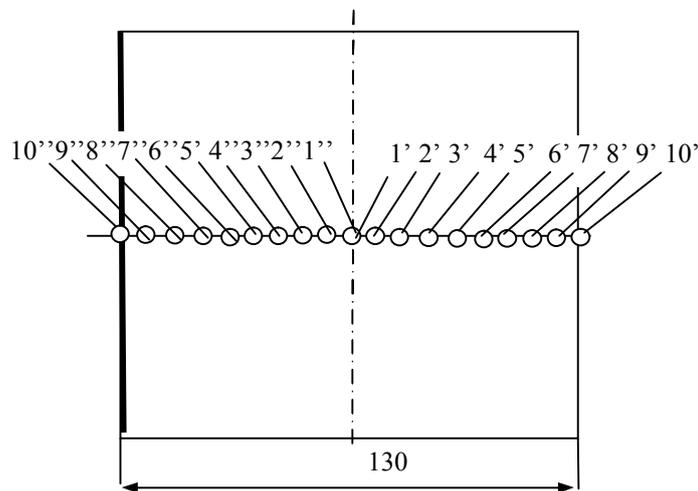


Рис. 1. Схема нанесения изучаемых точек на расчетное сечение

Для исследования было проведено 9 численных экспериментов, по три из них соответствовали отклонениям в работе ЗВО 1-го, 2-го и 3-го секторов соответственно. Схема задания распределения коэффициентов теплоотдачи для различных опытов представлена в Таблице 1. В случае, когда указано два значения разделенных горизонтальной чертой, верхнее соответствует базовому значению коэффициента теплоотдачи для рассматриваемого участка, нижнее – ослабленному зна-

чению, влияние которого на температурное поле необходимо исследовать. На рис. 2 представлено изменение перепада между температурами симметричных точек, лежащих в районе правой и левой граней, полученное в опыте №6. Колебательные элементы кривых 4-9, возникают из-за того, что в районе граней с различной интенсивностью охлаждения несколько отличается скорость продвижения фронтов затвердевания и, вероятно, являются чисто расчетным эффектом.

Таблица 1. Схема задания коэффициентов теплоотдачи для проведения численных экспериментов

№ опыта Участок оси	Значение коэффициента теплоотдачи от поверхности заготовки, Вт/(м ² ·К)								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Кристаллизатор	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800
1-ый сектор ЗВО	<u>1300</u> 1100	<u>1300</u> 900	<u>1300</u> 700	1300	1300	1300	1300	1300	1300
2-ой сектор ЗВО	800	800	800	<u>800</u> 700	<u>800</u> 600	<u>800</u> 500	800	800	800
3-ий сектор ЗВО	500	500	500	500	500	500	<u>500</u> 400	<u>500</u> 300	<u>500</u> 200

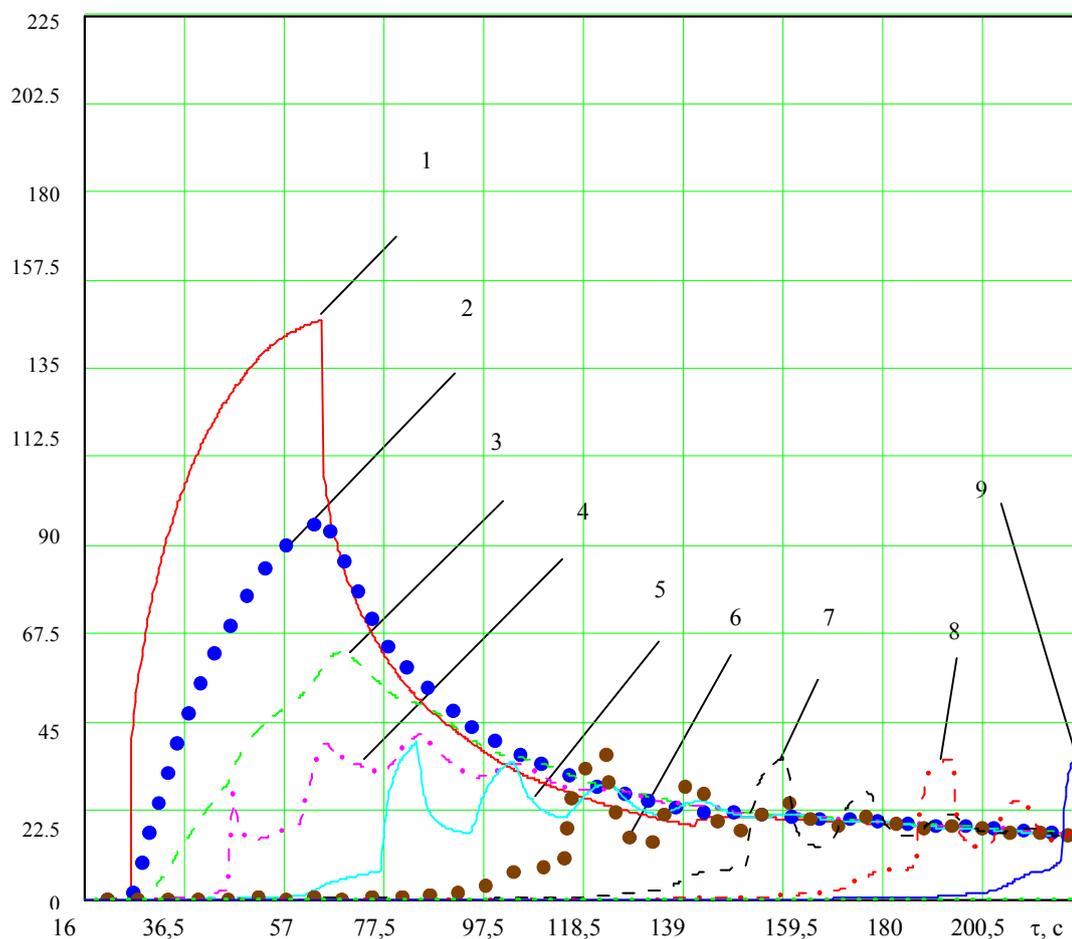
 $\Delta T, ^\circ\text{C}$ 

Рис. 2. Изменение разности температур симметричных точек, лежащих в районе граней с различной интенсивностью охлаждения (1- $T_1'-T_1''$, 2- $T_2'-T_2''$, 3- $T_3'-T_3''$, 4- $T_4'-T_4''$, 5- $T_5'-T_5''$, 6- $T_6'-T_6''$, 7- $T_7'-T_7''$, 8- $T_8'-T_8''$, 9- $T_9'-T_9''$)

Представление об истинной разнице температур дают усредненные кривые. Обобщение результатов всех девяти численных экспериментов представлено в Таблице 2. Для ответа на вопрос о скорости распространения тепловых возмущений в корочке непрерывнолитой заготовки построена зависимость достижения

тепловой волной конкретных узлов сетки. Первый момент, в который значение перепада для конкретной пары симметричных точек принимает значение большее нуля, считается моментом достижения тепловой волной глубины, на которой лежат узлы рассматриваемых точек.

Таблица 2. Систематизация исследований по влиянию отклонений работы ЗВО на температурное поле заготовки

Сектор, в котором возникло возмущение	№ опыта	Максимальное повышение температуры поверхности, °С	Максимальное остаточное превышение температуры, °С *	Минимальное остаточное превышение температуры, °С	Среднее остаточное повышение температуры, °С
1	1	42	2	2	2
	2	91	5	5	5
	3	153	7	7	7
2	4	41	5	5	5
	5	91	12	12	12
	6	147	17	17	17
3	7	60	20	7	13.5
	8	133	44	27	35.5
	9	220	75	45	60

* -под остаточным превышением температуры здесь и далее подразумевается превышение температуры в области грани, на которой произошло возмущение в работе ЗВО, над симметричными точками, лежащими в районе противоположной грани, подвергающейся охлаждению с базовой интенсивностью, на отметке оси 11,5 м.

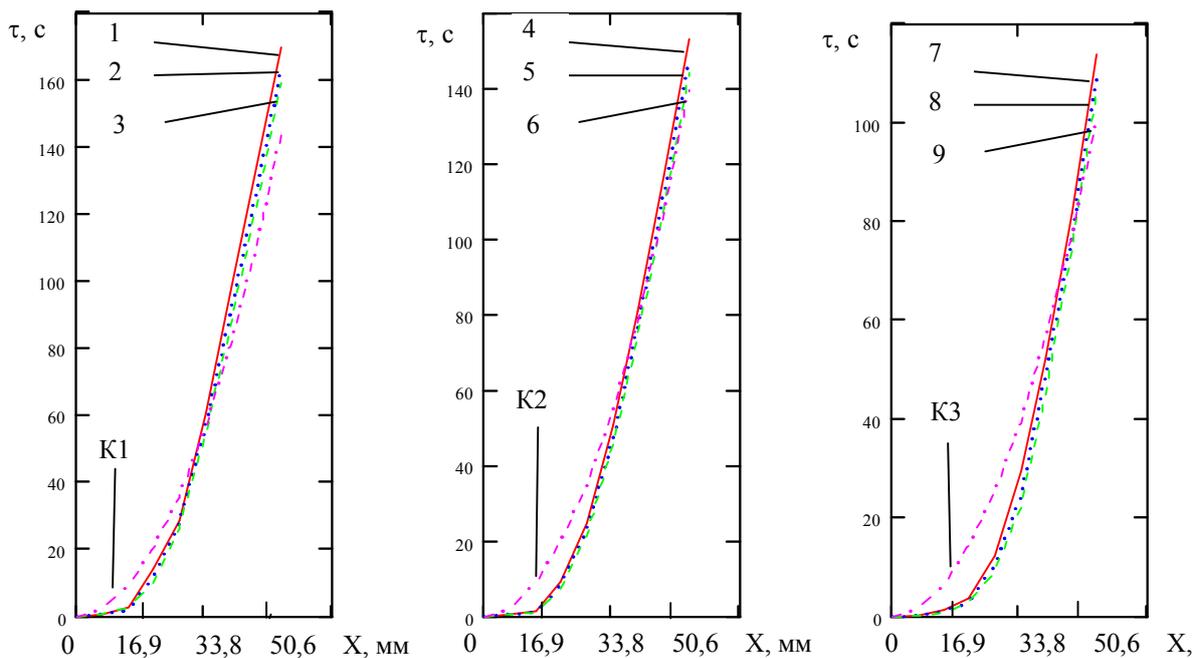


Рис. 3. Зависимость времени распространения теплового возмущения от глубины залегания рассматриваемого слоя (а – для теплового возмущения в 1-ом секторе ЗВО, б – во 2-ом секторе ЗВО; в – в третьем секторе ЗВО) 1, 2, 3... 9 – кривые соответствующие численным экспериментам с аналогичными номерами К1, К2, К3 – кривые, описывающие темп распространения теплового возмущения для серий экспериментов с возмущением в 1-ом, 2-ом и 3-ем секторах (построены на основании зависимостей (1), (2), (3) соответственно)

Анализ результатов численных экспериментов позволил получить графическую информацию, представленную на рис. 3. Известно, что при нагреве изделий по режиму с постоянным тепловым потоком, время достижения тепловой волной некоторой глубины δ равно $\tau' = \frac{\delta^2}{k \cdot a}$, где a – коэффициент температуропровод-

ности материала образца, m^2/c ; k – коэффициент формы (для плиты 6, для цилиндра 8, для шара – 10).

Применительно к рассматриваемой задаче была также сделана попытка установления квадратичной зависимости для скорости распространения тепловых возмущений. Однако реальные кривые, полученные на основании обработки результатов численных экспериментов, не могут в полной мере быть описаны подобной

квадратичной зависимостью с постоянным коэффициентом формы. В то же время анализ размерности показывает, что для описания процесса должна быть использована именно квадратичная зависимость. То есть коэффициент формы является переменной величиной.

Попытка максимального сближения семейства расчетных кривых и квадратичной кривой с постоянным коэффициентом формы позволили предложить следующие уравнения, для описания распространения тепловой волны в массиве сортовой заготовки при возмущении, возникшем в 1-ом, 2-ом, 3-ем секторах соответственно:

$$\tau = \frac{\delta^2}{3.5 \cdot a}, \quad (1)$$

$$\tau = \frac{\delta^2}{3.6 \cdot a}, \quad (2)$$

$$\tau = \frac{\delta^2}{5.0 \cdot a}. \quad (3)$$

На рис. 3 результаты численных экспериментов сопоставлены с предложенными выше аналитическими кривыми.

Выводы

1. Получены расчетные данные о величине температурных возмущений в массиве непрерывнолитой сортовой заготовки для некоторых случаев несимметричного охлаждения поверхности заготовки в ЗВО. Это дает возможность прогнозировать температурное состояние заготовки при работе в нестандартных ситуациях

такого рода и принимать решение о возможности продолжения разливки или необходимости ее остановки из-за возникновения недопустимо больших для разливаемой марки стали перекосов температуры.

2. Получены данные о скорости распространения тепловых возмущений в массиве непрерывнолитой сортовой заготовки, что дает возможность оценки глубины их проникновения для конкретных технологических ситуаций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Емельянов В.А. Тепловая работа машин непрерывного литья заготовок: Учебн. пособие для вузов. – М.: Металлургия, 1988. – 143 с.
2. 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.
3. Процессы непрерывной разливки / А.Н. Смирнов, В.Л. Пилюшенко, А.А. Минаев и др. – Донецк: ДонНТУ, 2002. – 536 с.
4. Кравцов В.В., Бирюков А.Б., Лоленко Е.С. Изучение температурного поля непрерывнолитой заготовки, формирующейся в зоне вторичного охлаждения при отклонении параметров разливки от нормы // *Труды 3-ей международной научно технической конференции Прогрессивные технологии в металлургии стали* (г. Донецк 31 октября – 02 ноября 2006 г.) с. 285-289.

пост. 31.01.08.

Реализация сплайн-функции в системе гидрогеохимического мониторинга горнорудного предприятия

А.Ф. ПРИСТАВКА, Н.Н. ЕРЕЩЕНКО

Днепропетровский национальный университет

Предложена вычислительная технология аппроксимации экспериментальных данных сплайн-функциями.

Запропоновано обчислювальну технологію апроксимації експериментальних даних сплайн-функціями.

The computing technology of approximation of experimental data a spline-functions is offered.

Постановка проблемы. В условиях интенсивной техногенной деятельности проблема загрязнения окружающей среды становится все более актуальной. Использование устаревших технологий, интенсивная разработка крупных месторождений полезных ископаемых, таких как уголь и железная руда, а также высокая интенсивность выбрасываемых в окружающую среду вредных веществ, приводят к загрязнению воздушного бассейна, водных и земельных ресурсов, и, как следствие, снижению экологической устойчивости природной среды. Среди общего уровня загрязнения природных сред значимое место занимает загрязнение подземных вод.

Существенное влияние на изменение химического состава подземных вод оказывает горнодобывающая промышленность. Технологические про-

цессы горно-добывающей и горно-перерабатывающей промышленности приводят к формированию и накоплению в окружающей природной среде разнообразных отходов с высоким содержанием тяжелых металлов. Несмотря на большую экологическую опасность, основным методом утилизации подобных отходов является их наземное размещение с использованием площадок складирования в виде техногенных массивов.

Сложная экологическая ситуация наблюдается на территории Северного горно-обогатительного комбината. Техногенными объектами на территории комбината являются: Анновский карьер, Первомайский карьер, хвостохранилище, промышленная площадка, рудо-обогатительная фабрика (РОФ-2). Загрязнение подземных вод в районах разработки месторождений

