

ДИНАМИКА ТЕМПЕРАТУРНЫХ ГРАДИЕНТОВ НЕПРЕРЫВНОЛИТОГО СЛИТКА

Досліджено динаміку температурних градієнтів безперервнолитого злитка за допомогою математичного моделювання нестационарного теплового процесу кристалізації. Запропонована математична модель враховує складний характер теплообміну в зоні вторинного охолодження та положення межі розподілу фаз. Наведені і проаналізовані дані числових розрахунків температурних градієнтів, які отримані в результаті рішення кінцево-різницевого аналога представленої задачі.

Исследована динамика температурных градиентов непрерывнолитого слитка с помощью математического моделирования нестационарного теплового процесса кристаллизации. Предложенная математическая модель учитывает сложные условия теплообмена в зоне вторичного охлаждения и положение границы раздела фаз. Приведены и проанализированы данные численных расчётов температурных градиентов, полученные в результате решения конечно-разностного аналога представленной задачи.

Изучение теплофизических процессов, происходящих в непрерывнолитом слитке – одна из важнейших составляющих развития новых технологий разлива стали на машинах непрерывного литья заготовок (МНЛЗ). Связано это в первую очередь с тем, что многие марки стали, ввиду их низкой пластичности в высокотемпературном диапазоне, обладают повышенной склонностью к образованию трещин, вызванному неправильным температурным режимом во время литья заготовок.

Эффективным инструментом исследования тепловых процессов, которые происходят в непрерывнолитом слитке во время затвердевания, является математическое моделирование. Работы, посвящённые данной проблеме, рассматривают различные по своей сложности математические модели. В работе [1] рассматривается продольное сечение слитка в прямоугольной системе координат привязанной к конструкции МНЛЗ. Однако модель не учитывает перенос тепла вместе с движущимся слитком, а граничные условия в зоне вторичного охлаждения (ЗВО) сформулированы без учёта лучистой составляющей и расположения форсунок, подающих водо-воздушную смесь. В работах [2,3] математические модели включают конвективный перенос тепла вместе со средой, но в работе [2] на границах исследуемой области задаются условия первого рода, что является слишком грубым допущением. Из-за того, что в работах [1...3] не принимается во внимание расположение участков принудительного охлаждения под

факелами форсунок, теряется важная информация о перепадах температуры у поверхности затвердевшей корочки, где как раз и нужно в первую очередь исследовать температурные напряжения. Информация о величинах температурных напряжений внутри непрерывнолитого слитка необходима для решения задач управления его напряженно-деформированным состоянием, что в свою очередь позволит повысить качество литых заготовок, производимых на МНЛЗ.

Прежде, чем вычислять температурные напряжения необходимо получить данные о распределении температур, положении границы фазового перехода и температурных градиентах в слитке. Относительно полная математическая модель определения температурного поля разработана в работе [4]. Модель учитывает зависимость параметров внутреннего теплообмена от температуры. Уравнения тепломассопереноса записаны в прямоугольных координатах. Положение границы раздела фаз определяется методом нахождения долей жидкой и твёрдой фаз. Граничные условия учитывают расположение форсунок, подающих водо-воздушную смесь, но для формулировки этих условий авторы переходят к квазистационарной модели, которая соответствует установившемуся режиму разлива. Однако данные о динамике температурных напряжений могут быть получены только из расчётов нестационарной математической модели.

Математическая модель процесса тепломассопереноса. В работе [5] представлена нестационарная математическая модель процесса тепло-

массопереноса в непрерывнолитом слитке, рассматривающая двумерное тепловое поле и границу раздела фаз слитка криволинейной МНЛЗ в продольном сечении широкого сляба, которое параллельно узким граням и проходит через середину широких граней. Модель учитывает сложную геометрическую форму ЗВО, а также зависимость теплофизических параметров от температуры металла – описание процесса тепломассопереноса основано на нелинейных нестационарных уравнениях в частных производных.

Тепломассоперенос для металла в кристаллизаторе и на прямолинейных участках МНЛЗ описывается уравнением:

$$\frac{\partial T(\tau, x, z)}{\partial \tau} + v(\tau) \frac{\partial T(\tau, x, z)}{\partial z} = \frac{1}{c(T)\rho(T)} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right] \right\},$$

где $v(\tau)$ – скорость вытягивания слитка; $T(\tau, x, z)$ – температура металла; $c(T)$ – удельная теплоёмкость металла; $\rho(T)$ – плотность металла; $\lambda(T)$ – теплопроводность разливаемого металла.

Для криволинейных участков МНЛЗ уравнение тепломассопереноса записывается в полярных координатах:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T(\tau, r, \varphi)}{\partial \tau} + \theta_m(\tau) \frac{\partial T(\tau, r, \varphi)}{\partial \varphi} = \\ = \frac{1}{c(T)\rho(T)} \cdot \left\{ \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \right. \\ \left. + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial \varphi} \right) + \frac{\lambda(T)}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right\}, \end{aligned}$$

где θ_m – угловая скорость движения слитка на m -м криволинейном участке.

Граничные условия для широких граней слитка в кристаллизаторе формулируются с учетом наличия зазора между поверхностью слитка и рабочими гранями гильзы кристаллизатора:

$$\begin{aligned} \lambda(T, z) \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=l} = \frac{\lambda_{г.з}}{\delta_3} (T|_{x=l+\delta_3} - T|_{x=l}) + \\ + C_n \left[\left(\frac{T|_{x=l+\delta_3}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T|_{x=l}}{100} \right)^4 \right], \\ 0 < z \leq Z, \quad x = l, \end{aligned}$$

где $\lambda_{г.з}$ – коэффициент теплопроводности газовой смеси в зазоре; $T|_{x=l}$ и $T|_{x=l+\delta_3}$ – температу-

ра поверхностей слитка и кристаллизатора, соответственно; δ_3 – толщина газового зазора; C_n – приведённый коэффициент излучения.

Граничные условия в ЗВО учитывают конвективную и лучистую составляющие теплоотдачи, а также зависимость температуры окружающей среды и коэффициентов теплоотдачи от расположения форсунок и расхода воды в них. На криволинейных участках МНЛЗ для поверхности слитка соответствующей внутреннему радиусу они формулируются следующим образом:

$$\begin{aligned} -\lambda(T, \varphi) \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_m} = \\ = \alpha_{lm}(G_m(\tau), \varphi) \cdot [T_{lm} - T|_{r=r_m}] + C_{lm} [T_{lm}^4 - (T|_{r=r_m})^4] \end{aligned}$$

где α_{lm} , C_{lm} и T_{lm} – коэффициент теплоотдачи от поверхности слитка в окружающую среду, приведённый коэффициент излучения от поверхности слитка и температура окружающей среды в m -й секции ЗВО, соответственно; $G_m(\tau)$ – расход воды на m -й секции.

Граничные условия для поверхности слитка соответствующей внешнему радиусу записываются аналогично.

Положение неизвестной границы раздела фаз задаётся условиями равенства температур и условиями Стефана для двумерного случая:

$$\begin{aligned} T(\tau, x, z) \Big|_{x=\xi_-(\tau, z)} = T(\tau, x, z) \Big|_{x=\xi_+(\tau, z)} = T_{кр}, \\ \lambda(T, x, z) \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{x=\xi_-(\tau, z)} - \lambda(T, x, z) \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{x=\xi_+(\tau, z)} = \\ = \mu \rho(T_{кр}) \left(\frac{\partial \xi}{\partial \tau} + v \cdot \frac{\partial \xi}{\partial z} \right), \\ 0 \leq z \leq Z, \end{aligned}$$

где ξ – граница раздела фаз есть функция двух переменных $x=\xi(\tau, z)$; μ – скрытая теплота кристаллизации; $T_{кр}$ – температура кристаллизации (средняя из интервала ликвидус-солидус); $\vec{n}$ – нормаль к поверхности раздела фаз.

Аналогично формулируются условия положения неизвестной границы на криволинейных участках МНЛЗ.

Во всей рассматриваемой области заданы начальные условия:

$$T(0, x, z) = T_0(x, z), \quad T(0, r, \varphi) = T_0(r, \varphi).$$

Для решения поставленной нелинейной краевой задачи подобрана соответствующая ей конечно-разностная аппроксимация. Разработа-

ны алгоритмы решения конечно-разностной задачи и выполнена их реализация на языке C++.

Абсолютные значения $gradT = \left(\frac{\partial T}{\partial x}, \frac{\partial T}{\partial z} \right)$

определялись с использованием конечно-разностных аналогов частных производных

$$|gradT|_{i,j} = \sqrt{\left(\frac{T_{i,j} - T_{i-1,j}}{\Delta x} \right)^2 + \left(\frac{T_{i,j} - T_{i,j-1}}{\Delta y} \right)^2},$$

где T_{ij} – значение температуры в узле сетки с номером (i,j) в данный момент времени.

Вычислительные эксперименты и анализ полученных результатов

Расчёты проводились для марки Ст40, слэба толщиной 200 мм, криволинейной МНЛЗ с геометрией, аналогичной МНЛЗ установленной на ОАО "Металлургический комбинат "Азовсталь" (Мариуполь, Украина).

На рисунке 1 представлено семейство графиков, которые отображают значения градиентов температурного поля при стандартном установленном режиме работы МНЛЗ (базовый режим охлаждения для скорости вытягивания слитка 1 м/мин).

Наибольшие значения градиентов наблюдаются у поверхности слитка находящегося в кристаллизаторе. Это связано с большим теплоотводом в области кристаллизатора, когда при относительно малом расстоянии от поверхности слитка до границы раздела фаз достигается мак-

симальная разница между температурой кристаллизации и температурой поверхности.

В ЗВО колебания градиентов вызваны прохождением слитка под форсунками принудительного охлаждения, которые существенно понижают температуру поверхности.

Чем дальше от поверхности, тем ниже значения градиентов и их колебания. Внутри жидкой фазы градиенты принимают относительно небольшие значения. Затем наблюдается их резкое повышение возле фронта кристаллизации. Тем не менее, значения $gradT$ на внутренних слоях всё ещё существенно меньше, чем у поверхности. По длине слитка наблюдается постепенное медленное уменьшение значений градиентов.

На уровне оси слитка наблюдается отклонение направления $gradT$ от осевого. Это объясняется несимметричностью теплоотвода – теплоотдача происходит более интенсивно на поверхности внешнего радиуса [5].

Для того чтобы определить чувствительность температурных градиентов у поверхности слитка к изменениям параметров процесса нужно поочередно внести изменения в каждый из соответствующих параметров, сохранив остальные "базовыми".

На рисунке 2 представлены графики чувствительности температурных градиентов у поверхности слитка к изменениям расходов воды в кристаллизаторе и различных секциях ЗВО. Градиенты малочувствительны к изменению расхода воды в кристаллизаторе. Это подтверждается

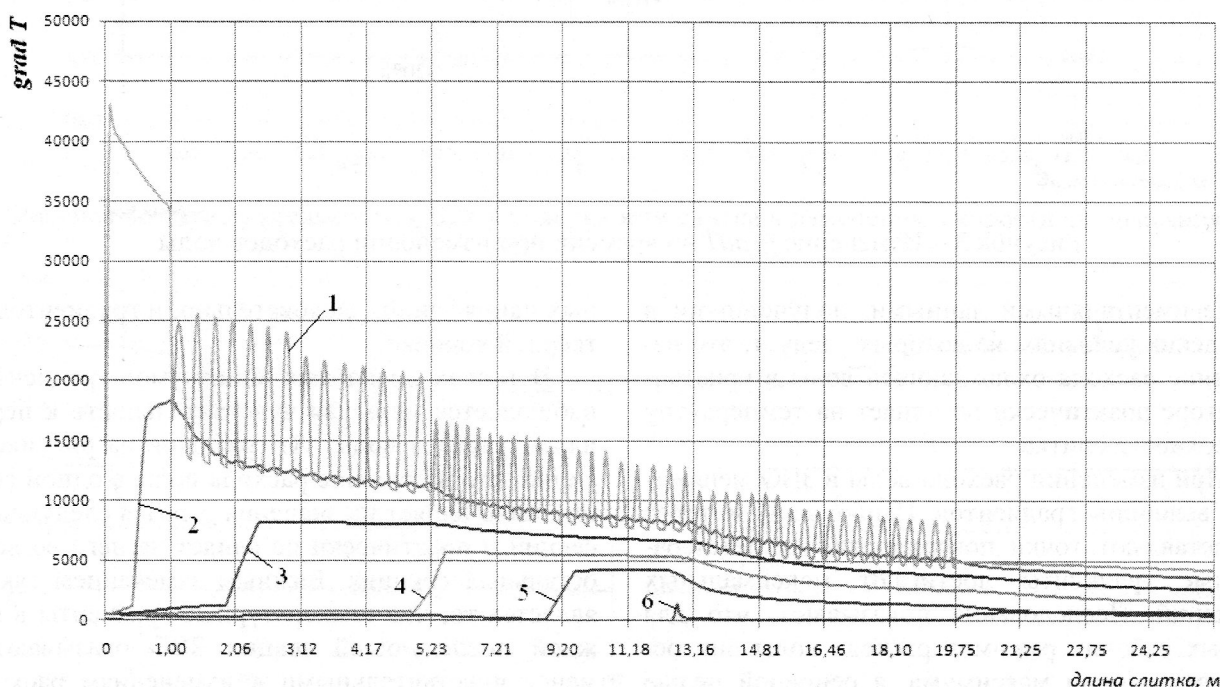


Рисунок 1 – Распределение температурных градиентов вдоль оси слитка: 1 – на поверхности; 2, 3, 4 и 5 – на расстоянии, соответственно, 2, 4, 6 и 8 см от поверхности; 6 – на оси

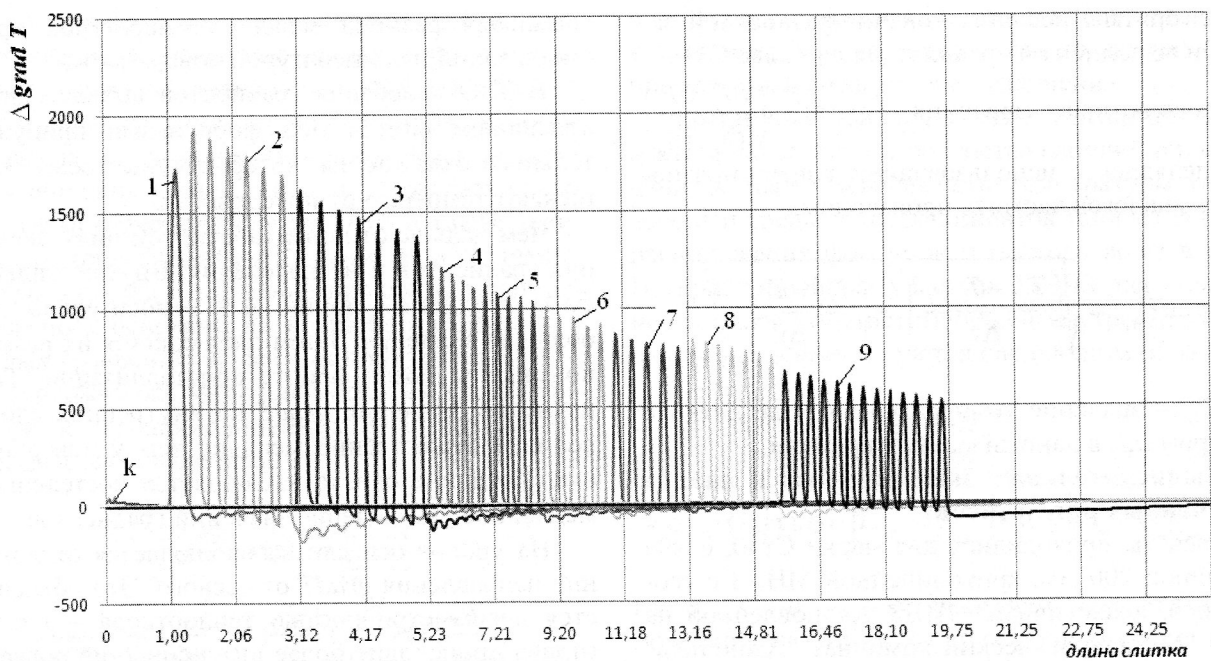


Рисунок 2 – Чувствительность температурных градиентов у поверхности слитка к изменениям расхода воды: *k* – в кристаллизаторе; 1...9 – в соответствующем номере секции ЗВО

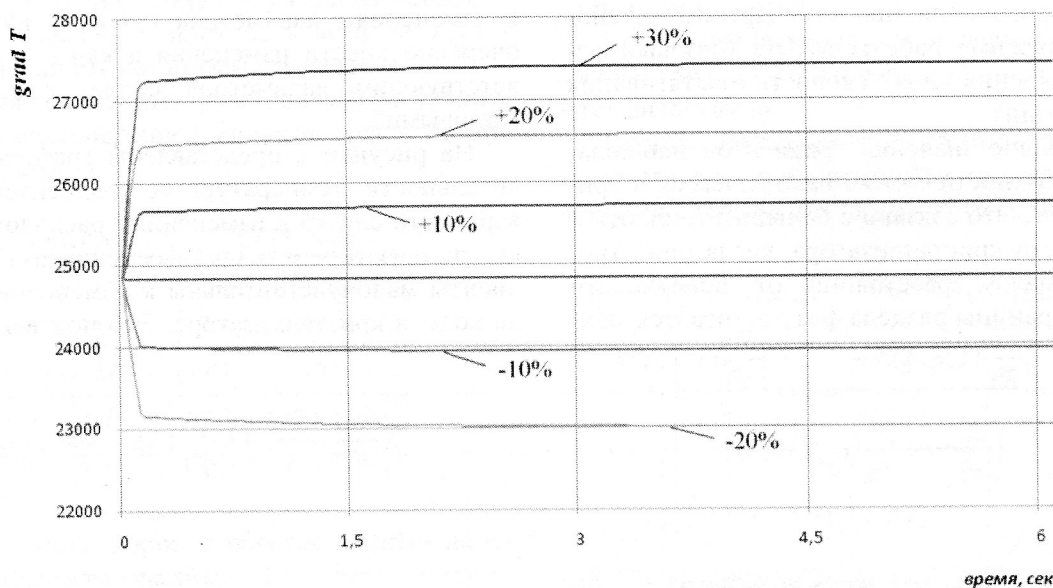


Рисунок 3 – Изменение $gradT$ во времени при изменении расходов воды

экспериментальными данными, полученными в заводских условиях, из которых следует, что изменение расхода охлаждающей воды в кристаллизаторе практически не влияет на температуру поверхности слитка.

При изменении расхода воды в ЗВО меняются и величины градиентов. Наибольший интерес представляют точки поверхности, где температурные градиенты достигают максимальных значений. Исследования показывают, что для любых рабочих режимов расхода воды они остаются точками максимума, а основной целью управления качеством поверхности слитка как раз является минимизация значений температур-

ных напряжений, следовательно, и градиентов, в твердой корочке.

В точках локальных минимумов градиентов наблюдается меньшая чувствительность к перепадам расхода воды. Из графиков на рисунке 2 видно, что изменение расхода воды в одной секции мало влияет на значения $gradT$ в следующей секции и практически не влияет на него во всех остальных секциях. Важным замечанием также является то, что температурные градиенты в каждой последующей секции ЗВО оказываются менее чувствительными к изменениям расхода воды.

В ЗВО наибольшее значение градиента на-

блюдается у поверхности слитка сразу после выхода из кристаллизатора. Однако из анализа функций чувствительности можно сделать вывод, что расход воды в первой секции не имеет здесь существенного влияния. Следующий пик градиента приходится на точку поверхности, которая соответствует центру первой форсунки, т.к. в ней достигается локальный минимум температуры поверхности. Динамика температурного градиента при изменении расхода воды в первой секции ЗВО представлена на рисунке 3. При увеличении расхода охлаждающей воды температура поверхности падает, и значение $gradT$

увеличивается. Уже приблизительно через 5 секунд устанавливается новое значение.

В таблице 1 приведены полученные из расчётов данные изменения $gradT$ для первого локального максимума градиента, который соответствует выходу поверхности слитка из-под факела первой форсунки.

Локальные максимумы градиентов (рисунок 2) соответствуют координатам расположения форсунок вторичного охлаждения. Динамика $gradT$ в них выглядит аналогично уже описанной динамике в точке первого максимума.

При колебаниях скорости вытягивания слит-

Таблица 1 – Отклонения $gradT$ при изменении базового расхода воды ($G=0,00032\text{ м}^3/\text{сек}$) в первой секции

Величина	Отклонение, %				
G	+10	+20	+30	-10	-20
$gradT$	+3,4	+6,7	+10	-3,5	-7

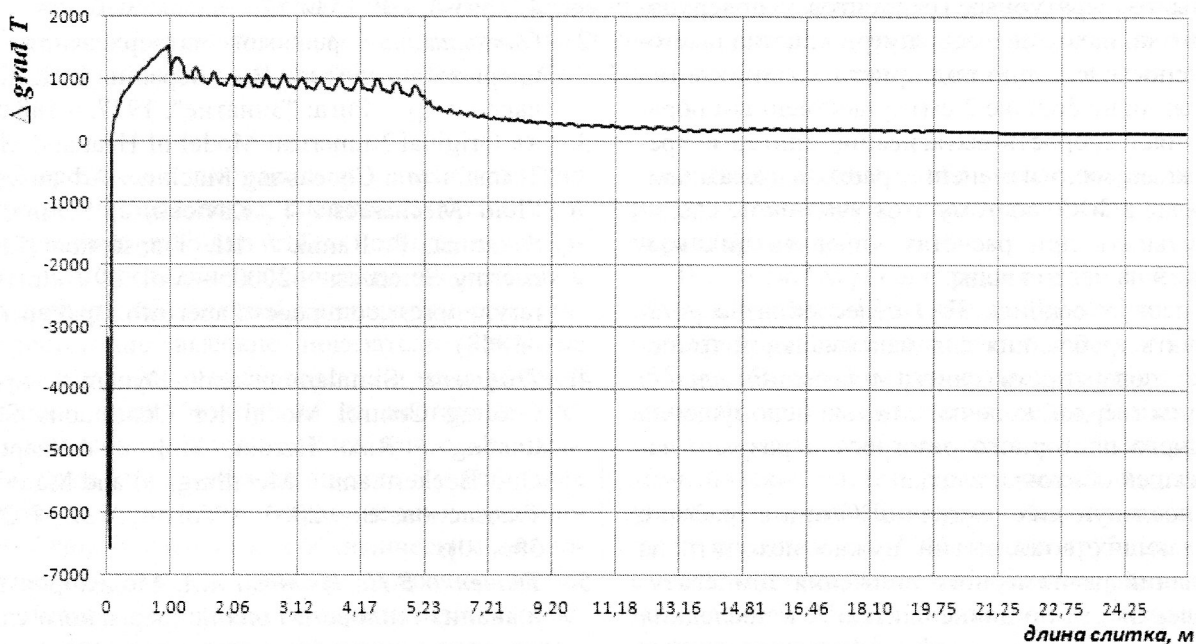


Рисунок 4 – Чувствительность $gradT$ у поверхности слитка к изменению скорости вытягивания

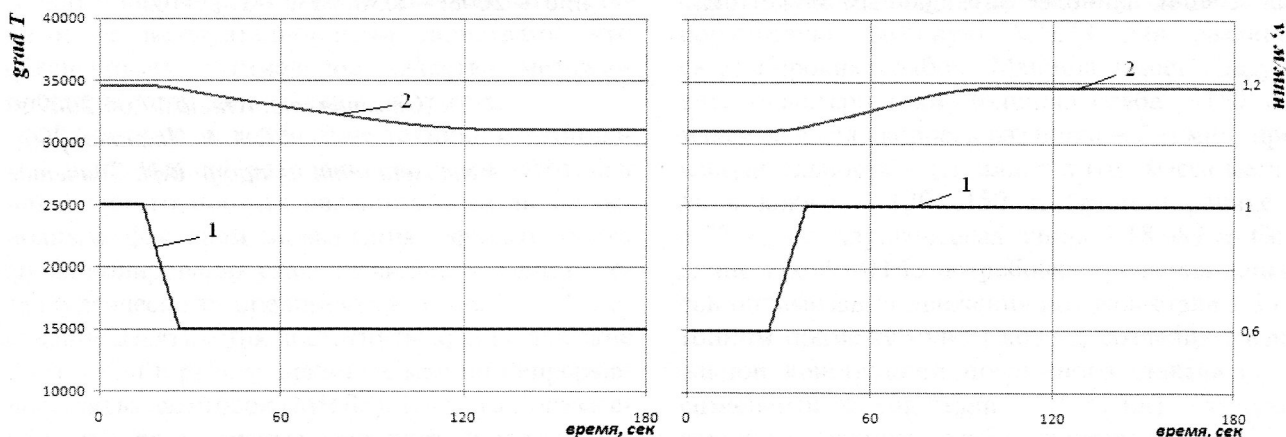


Рисунок 5 – Взаимосвязь скорости вытягивания слитка (1) и $gradT$ (2)

ка наблюдается другой характер изменения значений температурных градиентов, график функции чувствительности которых приведен на рисунке 4. Наибольшее изменение градиентов происходит внутри кристаллизатора, т.к. при изменении скорости вытягивания слитка в нем существенно меняется толщина твердой корочки. В ЗВО $gradT$ наиболее чувствительны к изменению скорости в первых секциях.

Динамика значений температурных градиентов у поверхности слитка в нижней части кристаллизатора представлена на рисунке 5.

Выводы

В работе выполнены исследования динамики градиентов температурного поля непрерывно формируемого на МНЛЗ стального слитка.

Проведённые исследования показали, что температурные градиенты достигают максимальных значений у поверхности слитка. На величины температурных градиентов у поверхности слитка, находящегося внутри кристаллизатора и непосредственно под кристаллизатором (на расстоянии не больше 2 см) существенным образом влияет скорость вытягивания слитка и пренебрежимо мало изменения расхода охлаждающей воды в ЗВО, поэтому этот участок не следует учитывать при расчётах управляющих воздействий на расход воды.

В первых секциях ЗВО целесообразно устанавливать требования для максимальной температуры поверхности слитка или минимальной толщины твёрдой корочки с целью недопущения излишнего повторного разогрева и разрыва затвердевшей оболочки слитка.

В последующих секциях ЗВО при выработке управляющих воздействий нужно исходить из требований равномерного снижения температуры поверхности по длине слитка. А в последних секциях, где слиток уже полностью затвердел, и не происходит выделения скрытой теплоты кристаллизации, наиболее оправданным может ока-

заться ограничение температурных градиентов.

Анализ численных экспериментов даёт представление о том, насколько управляющие параметры (в данном случае расход воды) влияют на величины температурных напряжений. Информация о градиентах температурного поля является базовой для вычисления критериев качества непрерывнолитого слитка. Предложенный подход и приведённые данные исследований можно использовать для предварительного изучения напряженно-деформированного состояния непрерывнолитой заготовки с последующим применением полученных результатов в системе оптимального управления режимами охлаждения слитка в МНЛЗ.

1. *Mathematical Modeling of the Crystallization of a Continuous-cast Semifinished product* / R.G. Levin, M.P. Galkin, O.I. Zubrev, E.V. Surgaeva and L.K. Glekov // *Metallurgist*. – 2003. – Vol. 47, №3-4. – P. 153-157.
2. *Оптимизация режимов затвердевания непрерывного слитка* / В.А. Берзинь, В.Н. Жевлаков и др. – Рига: "Зинатне", 1977. – 148 с.
3. *An Original Numerical Model of Heat and Mass Transfer in a Concasting Machine*. Advances in Fluid Mechanics / F. Kavicka, J. Stetina, B. Sekanina, P. Ramik // III. Transaction: Engineering Sciences. – 2000. – Vol. 29 (<http://library.witpress.com/pages/PaperInfo.asp?PaperID=3868>).
4. *Transient Simulation and Dynamic Spray Cooling Control Model for Continuous Steel Casting* / R.A. Hardin, K. Liu, A. Kapoor, C.A. Beckermann // *Metallurgical and Materials Transactions B*. – 2003. – Vol.34, №3. – P 297-306(10).
5. *Ткаченко В.Н., Иванова А.А. Моделирование и анализ теплового поля непрерывного слитка криволинейной машины непрерывного литья заготовок* / *Электронное моделирование*. – 2008. – Т.30, №3. – С. 87-103.

Статья поступила 17.06.2009 г.

© А.А. Иванова, 2009

Рецензент д.т.н., проф. В.Н. Ткаченко

МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

№ 2(16)
Июнь 2009

международный научно-технический и производственный журнал

Главный редактор
В.Я. Седуш, д.т.н.

Редакционный совет:

С.И. Аввакумов, к.т.н.
В.Г. Артюх, к.т.н.
Е.А. Башков, д.т.н.
Ю.Н. Белобров, к.т.н.
В.И. Большаков, д.т.н.
В.С. Волошин, д.т.н.
В.И. Дворников, д.т.н.
С.П. Еронько, д.т.н.
А.А. Ищенко, д.т.н.
И.А. Ленцов, к.т.н.
А.А. Минаев, д.т.н.
С.С. Самотугин, д.т.н.
В.А. Сидоров, к.т.н.
А.Н. Смирнов, д.т.н.
В.В. Суглобов, д.т.н.
А.А. Троянский, д.т.н.
В.И. Фарберов, к.э.н.
Ф.Л. Шевченко, д.т.н.
С.Л. Ярошевский, д.т.н.

Редакторы:

А.Л. Сотников, А.В. Рябухин (рубрика
"Технологические предложения")

Учредитель и издатель:

ООО "Технопарк ДонГТУ "УНИТЕХ"
83001, Украина, Донецк,
ул. Артема, 58
Телефоны: +38 (062) 348-50-56,
+38 (066) 029-44-30
Эл. почта: m-lab@ukr.net
Интернет: assom.donntu.edu.ua

Представительство в России:

ООО "ТОИР Консалт"
121108, Россия, Москва,
ул. Кастанаевская, д. 27, корп. 4
Телефон/факс: +7 (495) 775-85-02
Эл. почта: info@toir-consult.ru
Интернет: www.toir-consult.ru

"Металлургические процессы
и оборудование"
2009. №2(16)

ISSN 1816-1200

Издается с мая 2005 г.
Периодичность издания: 4 раза в год.

Журнал реферируется
Всероссийским институтом
научной и технической информации
Российской академии наук (ВИНИТИ РАН)

Подписной индекс в каталогах:

"Пресса Украины" – 98832
"Газеты, журналы" (Агентство
ОАО "Роспечать") – 21897

Свидетельство
о государственной регистрации
КВ 11997-868Р от 21.11.2006

Свидетельство
о внесении издателя в
Государственный реестр
субъектов издательской деятельности
ДК 1017 от 21.08.2002

За содержание статей и их
оригинальность несут ответственность
авторы. Мнение редакции может
не совпадать с мнением авторов.
За содержание рекламных материалов
ответственность несет рекламодатель.

Подписано к печати 05.06.2009.
Формат 60x84 1/8. Заказ 0606.
Тираж 1000 экз. Печать
ООО "Цифровая типография", 2009.

© А.Л. Сотников, 2005-2009

СОДЕРЖАНИЕ

ВЫСТАВКИ. КОНФЕРЕНЦИИ. СЕМИНАРЫ

Иванова Н.Л.

Итоги конференции "Ресурсосберегающие технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки от нано- до макроуровня-2009"

3

Абашин А.А.

Итоги специализированной выставки "Машиностроение-2009"

4

Саякин Д.А.

Итоги специализированной выставки
"Энергетика. Электротехника. Автоматика-2009"

5

Сотников А.Л.

Итоги конкурса "Высокие технологии
в металлургическом производстве"

6

ТЕХНОЛОГИИ И ПРОИЗВОДСТВО

Иванова А.А.

Динамика температурных градиентов непрерывнолитого слитка

7

Смирнов А.Н., Пильгаев В.М.

Перспективы развития технологии и оборудования
непрерывного литья заготовок для плоского проката

13

ОБОРУДОВАНИЕ

Могильный С.Г., Шоломицкий А.А., Сотников А.Л.

Геодезические работы при проверке соосности оборудования
машины непрерывного литья заготовок

19

Сидоров В.А.

Анализ отказов узлов привода холодильника МНЛЗ

28

**Еронько С.П., Мечик С.В., Бедарев С.А.,
Шлемко С.В., Шостак С.В., Поремский В.И.**

Новые системы дозированной подачи
порошкообразных и гранулированных шлакообразующих смесей
в кристаллизаторы МНЛЗ

34

**Еронько С.П., Яковлев Д.А., Орлов И.А.,
Бедарев С.А., Дубойский К.В., Науменко А.В.**

Разработка эффективных разливочных систем
промежуточных ковшей МНЛЗ

39

Смирнов А.Н., Жибоедов Е.Ю., Ухин В.Е.

Конструкция современных гильз кристаллизаторов
для высокоскоростного литья заготовок на сортовых МНЛЗ

49

ИНФОРМАЦИЯ

Бланк-заказа вышедших номеров журнала
и научно-технической литературы

56

Требования к статьям, направляемым в редакцию

59

Об издании

60