

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ ЗАГОТОВКИ, ФОРМИРУЮЩЕЙСЯ В КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ, С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

*А. Б. БИРЮКОВ¹, д-р техн. наук, проф., birukov.ttf@gmail.com; А. А. ИВАНОВА², канд. техн. наук
(¹ ГОУ ВПО “Донецкий национальный технический университет”,
² ГУ “Институт прикладной математики и механики”)*

Со времени своего появления во второй половине XIX в. технология непрерывной разливки стали продолжает совершенствоваться. Одним из наиболее современных этапов развития данной технологии является интеграция МНЛЗ в состав литейно-прокатных агрегатов. При этом требования, предъявляемые к точности поддержания технологических параметров, становятся очень жесткими, что обусловило появление разнообразных систем диагностики различных элементов МНЛЗ.

Поскольку тепловые процессы играют особую роль в формировании непрерывнолитой заготовки, значительное внимание уделяется созданию систем мониторинга теплотехнических параметров на различных участках МНЛЗ.

Одной из важнейших задач является проведение оперативной диагностики теплотехнических процессов, протекающих в кристаллизаторе [1], поскольку кристаллизаторы МНЛЗ работают в условиях циклических интенсивных тепловых потоков, интенсивного износа, циклических термодинамических напряжений, разных типов эрозии и в большом диапазоне температур [2]. В настоящее время системы АСУТП практически всех МНЛЗ измеряют и регистрируют перепад температуры охлаждающей воды в кристаллизаторе. Результат этого измерения зачастую является единственным источником информации о текущем тепловом состоянии кристаллизатора и формирующейся в нем заготовки [3]. Одним из недостатков анализа этой величины является то, что она соответствует усредненному тепловому потоку через теплообменную поверхность кристаллизатора к воде. В реальности же теплоток неравномерно распределен вдоль кристаллизатора [4]. Одним из вариантов решения этой проблемы является калориметрирование кристаллизатора, т. е. разбиение охлаждающих каналов, отвечающих за определенные участки поверхности, на ряд секций с отдельными подводами и отводами воды, регистрацией ее расхода и перепада температур [1]. Недостатком метода является громоздкость и сложность конструкции.

Также в настоящее время наметилась тенденция, когда для создания систем комплексной диагностики работы кристаллизаторов термодатчиками оснащаются серийные кристаллизаторы, например, путем приваривания или прижима термодатчиков к теплообменным поверхностям кристаллизатора [2]. Существует ряд систем, включающих функции оценки теплового состояния при помощи термодатчиков. Одной из самых известных и типичных является система “Кристаллизатор” НПП ТЕХНОАП, предназначенная для использования на слябовых МНЛЗ.

Недостатком метода диагностики теплового состояния кристаллизатора при помощи термодатчиков является то, что их число и размеры ограничены. Кроме того, термодатчики чувствительны к электромагнитным полям, возникающим, например, в электромагнитных тормозящих системах или в мешалках. Также для защиты термодатчиков, включая их кабельную разводку, необходимы дорогостоящие предохранительные устройства.

В значительной мере названные проблемы решаются использованием для измерения температуры волоконных световодов, через которые пропускается свет лазера, и в ряде специально выделенных точек измерения по длине световода предусмотрена периодическая вариация показателя преломления, зависящая от температуры [5], однако в настоящее время такой подход еще не получил распространения.

Еще один способ диагностики, предложенный в работе [6], основан на углубленной расчетной интерпретации сигнала перепада температуры охлаждающей воды. Показано, что адекватное сравнение работы кристаллизаторов можно производить на основании таких величин, как средняя плотность теплового потока с поверхности заготовки в кристаллизаторе $\bar{q}$, среднее значение коэффициента теплопередачи в кристаллизаторе $\bar{k}$, средний коэффициент теплоотдачи от корочки заготовки к внутренней поверхности кристаллизатора $\bar{\alpha}$, эффективная толщина газового зазора $\delta_{эф}$. В этой работе предложены зависимости, позволяющие в режиме реального времени определять значения названных величин. В ча-

стности, контроль эффективной толщины газового зазора в режиме реального времени делает возможным оперативный контроль износа внутренней поверхности гильз кристаллизаторов, проверку соответствия конусности кристаллизаторов усадке заготовок, выбор наилучших кристаллизаторов для условий конкретного производства, установление взаимосвязи износа гильз

кристаллизаторов с образованием дефекта ромбичности.

Все названные способы диагностики теплового состояния заготовки в кристаллизаторе позволяют в некоторой мере идентифицировать условия теплообмена, однако сами по себе не дают ответа на вопрос о температурном состоянии корочки заготовки, формирующейся в кристаллизаторе.

Цель исследования

Целью данного исследования является разработка и опробование подхода, позволяющего производить моделирование теплового состоя-

ния заготовки, формирующейся в кристаллизаторе, с использованием системы диагностики теплотехнических процессов.

Методика исследования

Для расчетов принята математическая модель температурного поля поперечного сечения сортовой заготовки, учитывающая зависимость теплофизических характеристик металла от температуры [7]:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{1}{c(t)\rho(t)} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(t) \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda(t) \frac{\partial t}{\partial y} \right) \right\}, \quad (1)$$

где τ — время; $t(\tau, x, y)$ — температура; $c(t)$ — удельная теплоемкость; $\rho(t)$ — плотность; $\lambda(t)$ — теплопроводность разливаемого металла. Сделано допущение, что распределение температуры симметрично относительно центральных продольных сечений слитка, параллельных граням. Задано начальное распределение температуры.

Положение ликвидуса l задается условием Стефана:

$$\lambda(t) \frac{\partial t}{\partial \bar{n}} \Big|_{l_-} - \lambda(t) \frac{\partial t}{\partial \bar{n}} \Big|_{l_+} = \mu_l \rho_l \frac{\partial l}{\partial \tau}, \quad (2)$$

где $\bar{n}$ — нормаль к линии ликвидус; μ_l — часть скрытой теплоты кристаллизации, выделяющаяся на фронте ликвидуса; ρ_l — плотность при температуре ликвидуса.

Соответственно, положение солидуса s задается условием:

$$\lambda(t) \frac{\partial t}{\partial \bar{n}} \Big|_{s_-} - \lambda(t) \frac{\partial t}{\partial \bar{n}} \Big|_{s_+} = \mu_s \rho_s \frac{\partial s}{\partial \tau}, \quad (3)$$

где $\bar{n}$ — нормаль к линии солидус; $\mu_s = \mu - \mu_l$, μ — скрытая теплота кристаллизации для данного вещества, ρ_l — плотность при температуре солидуса. Заданы начальные положения ликвидуса и солидуса.

В первом приближении было высказано предположение о целесообразности использования средней плотности теплового потока с по-

верхности заготовки в кристаллизаторе для задания граничных условий теплообмена на поверхности формирующейся корочки заготовки. Однако проведение соответствующих численных экспериментов дало результаты, не согласующиеся с реальным ходом процесса: корочка, образовавшаяся в районе мениска, тут же подплавляется, и устойчивое формирование корочки начинается с глубины порядка 200 мм от мениска. Причина этого заключается в том, что в начальный период формирования заготовки в кристаллизаторе в реальности плотность теплового потока существенно превосходит среднее для всего кристаллизатора значение этой величины, что обеспечивает начало устойчивого формирования корочки. Таким образом, попытка задания средней плотности теплового потока по всей поверхности заготовки в кристаллизаторе не правомочна.

Известно, что плотность теплового потока имеет максимум в районе мениска или на ближайших соседних горизонтах. Затем она уменьшается и имеет минимальные значения при выходе заготовки из кристаллизатора. Необходимо использовать такой способ задания граничных условий, который бы учитывал эту закономерность.

Анализ различных способов учета закономерности изменения теплового потока по высоте кристаллизатора показал, что для описания теплообмена в полости кристаллизатора наиболее правильным является использование граничных условий третьего рода на поверхности заготовки. В качестве температурного перепада необходимо использовать разницу температур поверхности корочки заготовки в кристаллизаторе и охлаждающей воды. Такой подход позволит достичь уменьшения плотности теплового потока по мере перемещения расчетного поперечного сечения заготовки в кристаллизаторе. Названная разность температур умножается на коэффициент, характеризующий передачу теплоты от поверхности заготовки в кристаллизаторе к охлаждающей воде.

Величины (предложенные в работе [6]) среднего значения коэффициента теплопередачи в кристаллизаторе $\bar{k}$ и среднего коэффициента теплоотдачи от корочки заготовки к внутренней поверхности кристаллизатора $\bar{\alpha}$ не могут быть использованы для этой цели, так как $\bar{k}$ описывает передачу теплоты от внутренней поверхности корочки заготовки, температура на которой равна температуре солидуса, а $\bar{\alpha}$ описывает передачу теплоты от наружной поверхности корочки заготовки к внутренней поверхности кристаллизатора.

Для решения поставленной задачи в данной работе предложено ввести понятие коэффициента теплопередачи от наружной поверхности корочки к охлаждающей воде. По своему физическому смыслу данная величина определяется как:

$$\bar{k}_{\text{пов}} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_w} + \frac{\delta_m}{\lambda_m} + \frac{1}{\bar{\alpha}}}, \quad (4)$$

где α_w — коэффициент теплоотдачи от внешней поверхности гильзы кристаллизатора к воде, Вт/(м²·К); δ_m — толщина стенки гильзы кристал-

лизатора, м; λ_m — коэффициент теплопроводности материала гильзы кристаллизатора, Вт/(м·К).

Поскольку в процессе работы системы диагностики определяются текущие значения полного коэффициента теплопередачи, рабочая зависимость для определения $\bar{k}_{\text{пов}}$ записывается как:

$$\bar{k}_{\text{пов}} = \frac{1}{\frac{1}{\bar{k}} + \frac{\delta_k}{\lambda_k}}, \quad (5)$$

где $\bar{\delta}_k$ — средняя толщина корочки металла в кристаллизаторе, м; λ_k — коэффициент теплопроводности корочки заготовки при ее средней температуре, Вт/(м·К).

При этом значение $\bar{k}$ определяется в зависимости от сигналов, предоставляемых датчиками, задействованными в системе диагностики (текущих значений перепада температуры охлаждающей воды в кристаллизаторе и ее расхода), по зависимостям, предложенным в работе [6]. Значение $\bar{\delta}_k$ в первом приближении задается на основании практического опыта. В случае необходимости эта величина может быть откорректирована по результатам моделирования.

Результаты исследования

Для тестирования разработки было проведено моделирование для сортовой заготовки с размером сечения 150×150 мм. В расчетах принята высота слитка внутри кристаллизатора 0,862 м, скорость разлива 3,5 м/мин. Рабочий расход воды на охлаждение кристаллизатора 2000 л/мин, средняя температура охлаждающей воды 35 °С. Для задания $\bar{k}_{\text{пов}}$ использованы усредненные данные о расходе охлаждающей воды на кристаллизатор и перепаде температуры охлаждающей воды на кристаллизаторе, полученные из тренда данных на ручье сортовой МНЛЗ. Определенное таким образом значение $\bar{k}_{\text{пов}}$ составляет 1320 Вт/(м²·К).

Результаты моделирования, представленные на рис. 1 и 2, хорошо согласуются с данными, полученными в производственных условиях.

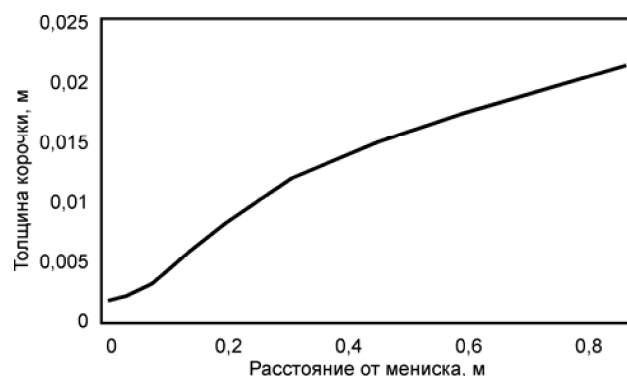


Рис. 1. Толщина корочки слитка по высоте кристаллизатора

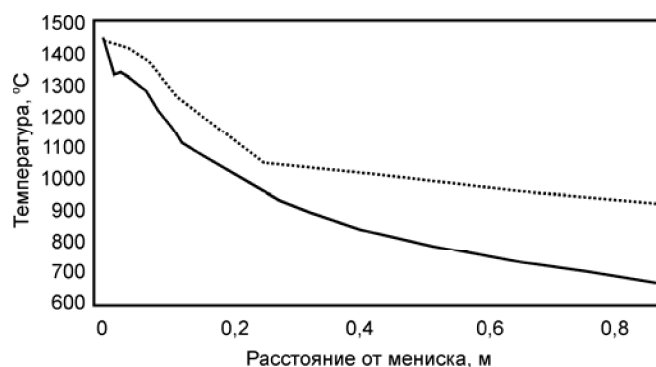


Рис. 2. Температура поверхности слитка по центру грани и углу

Обсуждение результатов

Целесообразным представляется использование данной разработки в системах АСУТП МНЛЗ в режиме реального времени для отслеживания динамики изменения состояния темпе-

ратурного поля слитка внутри кристаллизатора, а также толщины формирующейся в нем твердой корочки.

Выводы

Разработан подход, позволяющий производить моделирование теплового состояния заготовки, формирующейся в кристаллизаторе, с использованием системы диагностики теплотехнических процессов. Для задания граничных условий используются условия третьего рода, в кото-

рых задействована величина теплопередачи от наружной поверхности корочки к охлаждающей воде. Тестирование разработки с обработкой данных от датчиков системы АСУТП позволило получить результаты, хорошо согласующиеся с имеющимся экспериментальным материалом.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бирюков, А. Б. Диагностика теплотехнических параметров работы кристаллизаторов МНЛЗ [Текст] / А. Б. Бирюков, А. А. Иванова // Черная металлургия: Бюл. ин-та "Черметинформация". — 2015. — № 2. — С. 49–54.
2. Смирнов, А. Н. Непрерывная разливка стали [Текст]: учебник / А. Н. Смирнов, С. В. Куберский, Е. В. Штепан. — Донецк: ДонНТУ, 2011. — 482 с.
3. Mauder, T. Optimal control algorithm for continuous casting process by using fuzzy logic [Text] / T. Mauder, C. Sandera, J. Stetina // Steel Research International. — 2015. — V. 86 (7). — P. 785–798.
4. Калягин, Ю. А. Тепловые процессы в кристаллизаторе машины непрерывного литья заготовок [Текст] / Ю. А. Калягин, С. В. Сорокин, Н. И. Шестаков. — Череповец: ЧТУ, 2004. — 293 с.
5. Пат. 2466822 Российской Федерации, МПК В 22 D 11/18. Измерение температуры в кристаллизаторе оптоволоконным способом измерения [Текст] / Д. Лифтухт, М. Арцбергер. Заявл. 7.07.2009. Оpubл. 20.11.2012.
6. Birukov, A. B. Billet CC's mould heat engineering parameters monitoring system [Text] / A. B. Birukov // Metallurgical and Mining Industry. — 2014. — № 1. — P. 44–48.
7. Ткаченко, В. Н. Параметрическая идентификация, анализ и синтез систем управления технологическими процессами [Текст] / В. Н. Ткаченко, А. А. Иванова, А. Л. Красников [и др.]. — Славянск: изд-во ИПММ НАНУ, 2016. — 525 с.

Прокатное производство

УДК 621.771

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ В ПЛОСКОЙ СТАЛЬНОЙ ПОЛОСЕ ПРИ ЕЕ ПРАВКЕ В РОЛИКОВОЙ ПРАВИЛЬНОЙ МАШИНЕ

Э. А. ГАРБЕР¹, д-р техн. наук, tamz2011@mail.ru; Н. Л. БОЛОБАНОВА¹, К. А. ТРУСОВ²
(¹ ФГБОУ ВО "Череповецкий государственный университет",
² ПАО "Северсталь")

Плоские стальные широкие полосы после горячей прокатки пропускают через роликовые правильные машины (РПМ), а затем отправляют машиностроительным предприятиям либо в рулонах, либо после разрезки на листы заданных размеров.

Машиностроительные предприятия используют горячекатаные листы для изготовления различных машин и механизмов, вырезая из них

требуемые детали. В последние годы, если необходимо выкроить лист по сложному контуру, используют эффективные высокопроизводительные установки лазерной резки, обеспечивающие высокое качество реза.

Однако применение этих установок затруднено тем, что в процессе лазерной резки происходит потеря плоскостности листов: лист, не имеющий неплоскостности, при резке приобре-