

СТАРООСКОЛЬСКИЙ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
ИНСТИТУТ им. А.А. УГАРОВА



XIV ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ

**«Современные проблемы горно-металлургического комплекса.
Наука и производство»**

I ТОМ

**23–24 ноября 2017 г.
г. Старый Оскол**

Министерство образования и науки Российской Федерации
Старооскольский технологический институт им.А.А. Угарова
(филиал) федерального государственного автономного образовательного учреждения
высшего образования
«Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

Современные проблемы
горно-металлургического комплекса.
Наука и производство

Материалы

Четырнадцатой Всероссийской научно-практической конференции, с
международным участием

ТОМ I

23-24 ноября 2017 г.

г. Старый Оскол

УДК 622: 669
ББК 33: 34.3
С 568

Редакционная коллегия:

Еременко Юрий Иванович – декан факультета автоматизации и информационных технологий, зав. кафедрой АИСУ СТИ НИТУ «МИСиС», проф., д.т.н.

Ильичева Елена Вячеславовна – зам. директора по учебно-методической работе СТИ НИТУ «МИСиС», проф., д.э.н.

Демьяненко Маргарита Сергеевна – декан инженерно-экономического факультета СТИ НИТУ «МИСиС», доц., к.э.н.

Крафт Людмила Николаевна – зав. кафедрой химии и физики СТИ НИТУ «МИСиС», проф., к.т.н.

Кожухов Алексей Александрович – декан горного факультета, зав. кафедрой ММ им. С.П. Угаровой СТИ НИТУ «МИСиС», доц., д.т.н.

Макаров Алексей Владимирович – зав. кафедрой ТОММ им. В.Б. Крахта СТИ НИТУ «МИСиС», доц., к.т.н.

Рецензенты:

Еременко Юрий Иванович – декан факультета автоматизации и информационных технологий, зав. кафедрой АИСУ СТИ НИТУ «МИСиС», проф., д.т.н.

Ильичева Елена Вячеславовна – зам. директора по учебно-методической работе СТИ НИТУ «МИСиС», проф., д.э.н.

Демьяненко Маргарита Сергеевна – декан инженерно-экономического факультета СТИ НИТУ «МИСиС», доц., к.э.н.

Крафт Людмила Николаевна – зав. кафедрой химии и физики СТИ НИТУ «МИСиС», проф., к.т.н.

Кожухов Алексей Александрович – декан горного факультета, зав. кафедрой ММ им. С.П. Угаровой СТИ НИТУ «МИСиС», доц., д.т.н.

Макаров Алексей Владимирович – зав. кафедрой ТОММ им. В.Б. Крахта СТИ НИТУ «МИСиС», доц., к.т.н.

Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Наука и производство: материалы
С568 Четырнадцатой Всероссийской научно-практической конференции, Том I, 23-24 ноября 2017 г. /
редколлегия: Ю.И. Еременко, Е.В. Ильичева, Л.Н. Крафт, А.А. Кожухов, А.В. Макаров, М.С.
Демьяненко – Старый Оскол, 2017. – 345 с.

Сборник материалов Четырнадцатой Всероссийской научно-практической конференции
«Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Наука и производство»

Материалы публикуются в авторской редакции.

УДК 622: 669
ББК 33: 34.3

ОЦЕНКА ТЕМПЕРАТУРНОГО СОСТОЯНИЯ НЕПРЕРЫВНОЛИТОЙ ЗАГОТОВКИ ПРИ ЗАСОРЕНИИ ФОРСУНОК ЗОНЫ ВТОРИЧНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

Бирюков А.Б.¹, Иванова А.А.², Сафьянц С.М.¹

¹ ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк), birukov.ttf@gmail.com

² ГУ «Институт прикладной математики и механики» (Донецк), ivanova.iamm@mail.ru
83048, Донецк, ул. Розы Люксембург, 74, тел. +38(062)3110436

***Аннотация.** Предложено выполнять оценку температурного состояния заготовки, формирующейся в условиях засорения ряда форсунок, при помощи прогнозной математической модели. При наличии сигнала о появлении засоренных форсунок их номера определяются при помощи средств телеметрии, а затем эта информация используется для дифференцированного задания граничных условий теплообмена. На основании полученных результатов выполняется анализ характеристик температурного поля заготовки, формирующейся в нештатных условиях.*

***Ключевые слова:** МНЛЗ; зона вторичного охлаждения; форсунка; засорение форсунок; диагностика; температурное поле; прогнозная математическая модель.*

EVALUATION OF THE TEMPERATURE STATE OF CONTINUOUS INGOT UNDER CLOGGING OF SOME NOZZLES OF THE SECONDARY COOLING ZONE

Biryukov A.B.¹, Ivanova A.A.², Safyants S.M.¹

¹ SEE HPE «Donetsk national technical university» (Donetsk), birukov.ttf@gmail.com

² SI «Institute of Applied Mathematics and Mechanics»(Donetsk), ivanova.iamm@mail.ru

***Abstract.** It is proposed to perform an assessment of the temperature state of the ingot formed in the conditions of a clogging of a number of nozzles, using a predictive mathematical model. In the presence of a signal about the appearance of clogged nozzles, their numbers are determined by means of telemetry, and then this information is used for differentiating the boundary conditions of the heat exchange. Based on the results obtained, the analysis of the characteristics of the temperature field of the ingot formed in abnormal conditions is performed.*

***Key words:** CCM; zone of secondary cooling; nozzle; clogging of nozzles; diagnostics; temperature field; predictive mathematical model.*

Введение. Вопросы диагностики теплотехнических параметров работы МНЛЗ и прогнозирования температурного состояния металла и элементов работы оборудования в нештатных ситуациях играют всё большую роль [1]. В зоне вторичного охлаждения (ЗВО)

одной из наиболее распространенных нештатных ситуаций является засорение форсунок. Такая ситуация является более вероятной при использовании систем чисто водяного охлаждения (как на большинстве сортовых МНЛЗ) и выполнении всей водяной разводки из трубных марок стали. В работе [2] созданы аналитические расчетные зависимости, позволяющие прогнозировать количество открытых и засоренных форсунок сектора в зависимости от текущего расхода жидкости и давления, устанавливаемого регулятором для ее прокачивания. Наличие такой информации не является достаточным для окончательного решения вопроса о возможности продолжения разливки или необходимости её остановки. Разработка [2] указывает на количество засоренных форсунок в каждом секторе, однако не отвечает на вопрос какие конкретно это форсунки, а главное не даёт ответа на вопрос о температурном состоянии заготовки в сложившейся нештатной ситуации.

Постановка задачи исследования. Целью данной работы является создание научного инструментария, который на базе информации о количестве засоренных форсунок позволял бы оценивать температурное поле непрерывнолитой заготовки, формирующейся в условиях нештатной ситуации.

Изложение основных материалов. Самым эффективным инструментом для решения поставленной задачи является метод математического моделирования. Известно множество подходов к решению задачи формирования непрерывнолитой заготовки с учетом отвода теплоты затвердевания. В данной работе использован подход, базирующийся на решении задачи Стефана для определения положения двухфазной зоны [3].

Для описания температурного состояния расчётного поперечного сечения сортовой заготовки, движущейся вдоль продольной оси МНЛЗ со скоростью вытягивания, используется следующая запись дифференциального уравнения нестационарной теплопроводности в двухмерной постановке:

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

где τ – время; $t(\tau, x, y)$ – температура; $c(t)$ – удельная теплоёмкость; $\rho(t)$ – плотность; $\lambda(t)$ – теплопроводность разливаемого металла. Предполагается, что распределение температуры симметрично относительно центральных продольных сечений слитка параллельных граням.

Положение ликвидуса l задаётся 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.

Положение солидуса s задаётся 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.

Граничные условия для слитка в кристаллизаторе формулируются с учетом наличия зазора между поверхностью слитка и стенками кристаллизатора:

$$\lambda(t) \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=l} = \frac{\lambda_g}{\delta_g} \left(t \Big|_{x=l+\delta_g} - t \Big|_{x=l} \right) + C_n \left[\left(\frac{t \Big|_{x=l+\delta_g}}{100} \right)^4 - \left(\frac{t \Big|_{x=l}}{100} \right)^4 \right], \quad (4)$$

где λ_g – эффективный коэффициент теплопроводности смеси гарниссажа и воздуха в зазоре; $x=l$ – координата, соответствующая поверхности слитка; $t \Big|_{x=l}$, $t \Big|_{x=l+\delta_g}$ – температура поверхностей слитка и кристаллизатора соответственно; δ_g – эффективная толщина зазора, C_n – приведённый коэффициент излучения. Аналогично задаются граничные условия на поверхности $y=l$. Температура стенки кристаллизатора рассчитывается по нестационарному уравнению теплопроводности с граничными условиями теплоотдачи к охлаждающей воде в каналах кристаллизатора [4].

Для задания граничных условий теплообмена на поверхности заготовки в ЗВО использован дифференцированный подход, позволяющий учесть эффект засорения любой форсунки (форсунок):

$$-\lambda(t) \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=l} = \alpha(\tau, z, \vec{d}, \vec{k}, \vec{G}(\tau), \vec{P})(t_{Am} - t \Big|_{x=l}) + C_m (t_{Am}^4 - (t \Big|_{x=l})^4) \quad (5)$$

где $\alpha(\tau, z, \vec{d}, \vec{k}, \vec{G}(\tau), \vec{P})$ – коэффициент конвективной теплоотдачи на поверхности слитка (под факелом форсунки имеет параболическое распределение); C_m и t_{Am} – соответственно, приведённый коэффициент излучения на поверхности слитка и температура окружающей среды в m -й секции ЗВО; z – координата соответствующая расстоянию вдоль слитка от мениска; \vec{d} – вектор, задающий типы форсунок; \vec{k} – координаты форсунок; $\vec{G}(\tau)$ – расходы воды через форсунки (если форсунка отключена, то соответствующая компонента вектора равна нулю); \vec{P} – давление воды перед форсунками.

Также в рамках постановки задачи заданы начальные условия для поля температур и положения границы фазового перехода. Нелинейная краевая задача решается методом конечных разностей.

Было проведено моделирование для сортовой заготовки с размерами поперечного сечения 150x150 мм. В расчётах принята высота слитка внутри кристаллизатора 0,862 м, скорость разливки 3,5 м/мин. Параметры зоны вторичного охлаждения представлены в табл.1. Величины, входящие в выражения (4) и (5), заданы исходя из рабочих характеристик сортовых МНЛЗ одного из металлургических предприятий Донбасса.

Таблица 1 - Параметры секций ЗВО

номер секции	1	2	3	4	5
длина, мм	399	1762	1981	2179	967
число форсунок на каждой грани заготовки	4	11	9	9	4

Для задания граничных условий теплообмена на поверхности заготовки в ЗВО в конкретной нештатной ситуации необходимо знать, какие именно форсунки засорены. Для решения этой задачи предлагается использовать телеметрический метод, при котором в бункере вторичного охлаждения размещен ряд видеокамер в защищенном исполнении, позволяющих выполнить осмотр поверхности заготовок и визуально определить номера засоренных форсунок. Таким образом, анализ напорно-расходной характеристики [2] выполняется в режиме реального времени; при идентификации нештатной ситуации оператор с пульта управления может через камеры выполнить осмотр поверхности заготовки

в ЗВО, выявить номера засоренных форсунок, задать их в прогнозную модель и оценить температурное поле формирующейся заготовки.

На рис. 1 представлены результаты, полученные при помощи прогнозной модели для случая, когда на одной из граней во 2-ом секторе полностью засорены 8-я и 9-я форсунки.

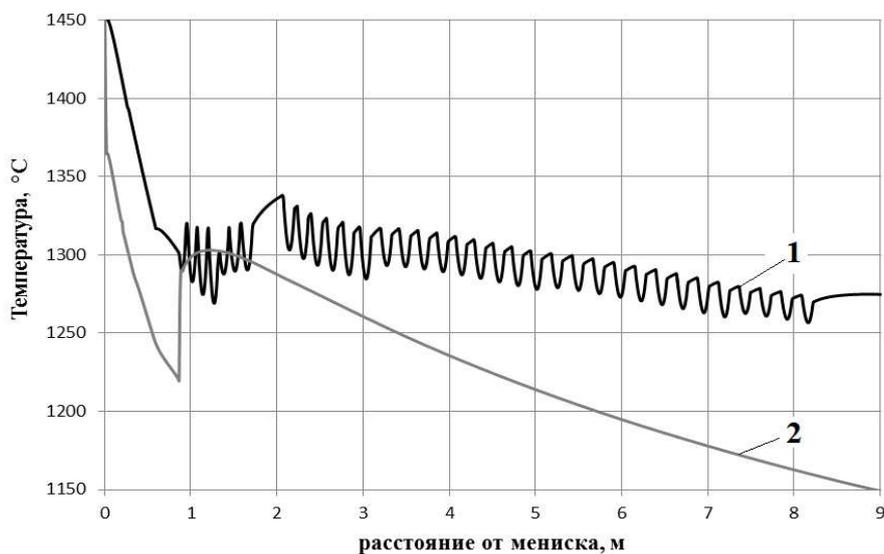


Рис. 1 – Распределение температуры вдоль слитка в случае засорения 8-й и 9-й форсунок. 1 – температура центра грани, 2 – температура угла.

На рис 2. выполнено одновременное построение характерных температур на поверхности грани заготовки для обозначенного случая засорения двух форсунок и номинальных условий формирования заготовки. Как видно из рис. 2 температура в центре грани под неработающими форсунками увеличивается примерно на 20°C, остаточное повышение температуры при переходе в зону свободного охлаждения составляет порядка 2°C. На основании анализа характеристик температурного поля заготовки, формирующейся в условиях засорения ряда форсунок, в каждом конкретном случае принимается решение о возможности продолжения разливки или необходимости останова ручья.

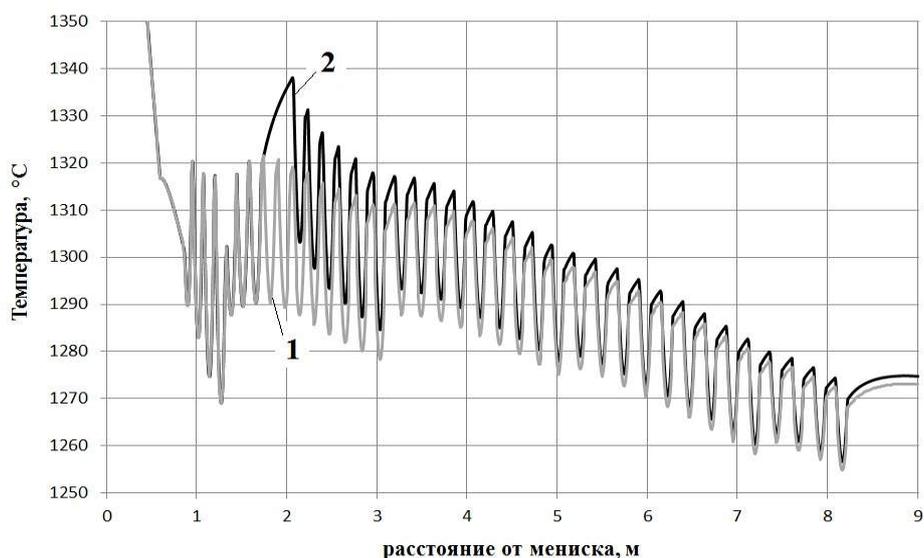


Рис. 2 – Температура центра грани слитка для случаев штатной работы (1) и отключённых 8-й и 9-й форсунок (2).

Выводы. В продолжение разработки по оперативной диагностике гидравлического состояния секторов ЗВО создан подход для оценки температурного состояния непрерывнолитой заготовки, формирующейся в условиях засорения ряда форсунок. Определение номеров засоренных форсунок предложено провести средствами телеметрии. Эти результаты используются при задании граничных условий теплообмена на поверхности заготовки в ЗВО в прогнозной математической модели. Проиллюстрирована эффективность такого подхода для определения основных характеристик температурного поля заготовки и их сравнения со случаем, когда заготовка формируется в номинальных условиях.

Список литературы

1. Бирюков А.Б. Теплотехника непрерывной разливки стали и тепловой обработки заготовок. – Saarbrücken: LAMBERT Academic Publishing, 2015. – 444 с.
2. Бирюков А.Б. Совершенствование метода диагностики гидравлического состояния секторов вторичного охлаждения МНЛЗ. *Металл и литье Украины.* – 2015.– №3.– С. 1-4.
3. Иванова А.А., Курганский А. Н. Математическое моделирование положения двухфазной зоны в непрерывнолитом слитке. *Труды XV Минского международного форума по тепломассообмену, Минск, 2016.* С. 331-334.
4. Ткаченко В. Н., Иванова А. А., Красников А. Л., Ткаченко А. В., Чернышев Н. Н. Параметрическая идентификация, анализ и синтез систем управления технологическими

процессами. – Славянск: Изд-во ИПММ НАНУ, 2016. – 525с.

УДК 621.771:004.18

АНАЛИЗ ПОДХОДОВ К УПРАВЛЕНИЮ КАЧЕСТВОМ НЕПРЕРЫВНОЛИТЫХ СОРТОВЫХ ЗАГОТОВОК НА СТАДИИ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ

Богадевич Д.И., Сотников Ф.Ю., Постникова А.В.

*Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал) ФГАОУ ВО «Национальный
исследовательский технологический институт «МИСиС», Россия, г. Старый Оскол
olov95@yandex.ru*

***Аннотация.** Представлен анализ подходов к управлению качеством непрерывнолитых сортовых заготовок на стадии кристаллизации в технологической линии машины непрерывного литья заготовок. На основе рассмотренных перспективных методов «мягкого» обжата намечены последующие пути развития процесса деформирования непрерывнолитых заготовок на стадии неполной кристаллизации с использованием методов управления качеством.*

***Ключевые слова:** непрерывнолитая заготовка, «мягкое» обжатие, деформация, МНЛЗ, управление качеством.*

THE ANALYSIS OF APPROACHES TO QUALITY MANAGEMENT OF CONCAST BILLETS AT THE STAGE OF CRYSTALLIZATION

Bogadevich D.I., Sotnikov F.Ju., Postnikova A.V.

Stary Oskol Technological Institute named after A.A. Ugarov (branch) NUST «MISIS» Russia, Stary Oskol

***Abstract.** The analysis of approaches to the management of quality continuous cast billets at the stage of crystallization in production line of continuous casting machine billet is presented. Based on the promising methods of "soft" reduction of the planned subsequent development of process of deformation of continuously cast billets on the stage of incomplete crystallization using the methods of quality management.*

***Key words:** concast billet, soft reduction, deformation, CCM, quality management.*

Вопросы управления качеством прокатной продукции, производимой из непрерывнолитого металла следует рассматривать неразрывно в цепочке МНЛЗ - прокатный стан. Особенно это актуально в случае совмещения МНЛЗ и прокатного стана в единый непрерывно действующий агрегат [1-4]. Использовании схемы с прямой прокаткой,