

УПРАВЛЕНИЕ РЕЖИМАМИ ВТОРИЧНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ МНЛЗ

Запропоновано метод керування режимами вторинного охолодження МБЛЗ, що використовує в якості зворотного зв'язку оперативну оцінку температурного стану злитка, одержувану в результаті чисельного розрахунку по математичній моделі тепломасоперенесення всередині злитка.

Предложен метод управления режимами вторичного охлаждения МНЛЗ, использующий в качестве обратной связи оперативную оценку температурного состояния слитка, получаемую в результате численного расчёта по математической модели тепломассопереноса внутри слитка.

Функционально зона вторичного охлаждения (ЗВО) машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) является крайне важной с точки зрения качества непрерывно литой заготовки. Её работа должна быть налажена таким образом, чтобы предотвратить слишком большие внутренние термические напряжения, которые могут вызывать формирование различного рода трещин, нарушение геометрической формы заготовки, осевую пористость, ликвацию и прочие дефекты.

В то же время охлаждение должно быть достаточно интенсивным, чтобы не допустить разрыва твёрдой оболочки слитка. Это в особенности относится к секциям расположенным непосредственно под кристаллизатором, так как здесь оболочка имеет малую толщину и высокую температуру.

Интенсивность охлаждения в ЗВО должна быть налажена таким образом, чтобы температура поверхности равномерно снижалась по всей длине слитка [1]. Повышение интенсивности теплообмена ограничивается конечным термическим сопротивлением корочки слитка. При этом выбор рационального уровня температур слитка зависит от ряда факторов, таких как марка стали, метод охлаждения, тип МНЛЗ и т.д.

В различных исследованиях на основании качественных рекомендаций о желательном распределении температуры в затвердевающем непрерывном слитке вводятся критерии качества непрерывной разливки металла. Предполагается, что слитки, температурные поля которых характеризуются меньшими значениями критериев, обладают более высоким качеством.

Наиболее полно критерии качества непрерывно литого слитка представлены в работе [2]. Первый критерий

$$J_1 = \int_0^H \int_{\xi_1}^a \int_{\xi_2}^b \sqrt{T_x^2 + T_y^2} dx dy dz$$

вводится, исходя из требований небольших градиентов температуры по толщине корочки. В случае двумерной модели критерий записывается следующим образом

$$J_1^* = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_{r_m}^{\xi_1} |T_r| dr dz + \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_{\xi_2}^{r_m+2l} |T_r| dr dz,$$

где T_x , T_y и T_r – производные температуры по направлениям перпендикулярным оси слитка соответственно в трёхмерной прямоугольной и двумерной полярной системах координат; a , b – размеры поперечного сечения слитка; H – длина рассматриваемого участка; ξ – положение границы раздела фаз в трёхмерной модели [2]; l – полутолщина слитка; r_m – радиус кривизны m -й секции ЗВО; ξ_1 , ξ_2 – положение границ раздела фаз в двумерной модели.

Однако, в отличие от кристаллизатора, для ЗВО такая формулировка допускает резкие локальные увеличения значений производных, которые практически не отразятся на значении интеграла, но при этом будут крайне нежелательны с точки зрения условий формирования качественного слитка. Легко показать, что значение J_1^* монотонно возрастает с ростом скорости разливки (при постоянных расходах охлаждающей воды), а также монотонно возрастает с увеличением расхода воды в любой из секций при постоянной скорости. Отсюда следует, что при повышенном расходе воды, например, в одной из

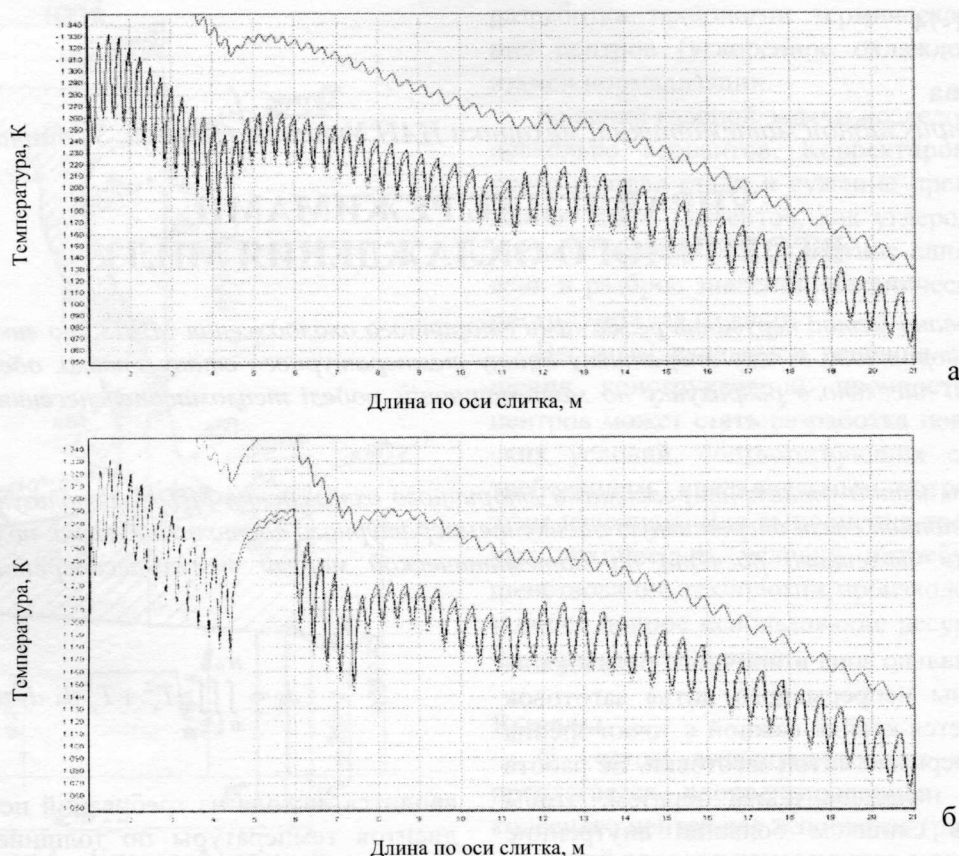


Рисунок 1 – Стандартный, установившийся режим охлаждения (а), и
завышенный расход воды в 4-й секции и пониженные расходы воды в 3-й и 5-й секциях ЗВО (б)

секций и несколько пониженных расходах в других секциях значения J_1^* одинаковы (рисунок 1). Таким образом, данной формулой как критерием качества пользоваться нельзя.

В связи с этим, вместо J_1^* более уместно рассматривать, например критерий, который определяет максимальные температурные перепады в направлении поперечном оси слитка:

$$J_1 = \max_{r, \varphi} |T_r|, \\ r \in (r_m, r_m + \xi_1) \cup (r_m + \xi_2, r_m + 2l), \varphi \in \left(0, \frac{\pi}{2}\right).$$

Однако, когда, исходя из технологических требований, определён рациональный уровень температур заготовки, при котором будет обеспечиваться наилучшее качество непрерывного слитка, наиболее целесообразно поддерживать этот уровень с помощью управляющих воздействий, вырабатываемых на основе математического моделирования.

В работе [3] разработана динамическая модель системы вторичного охлаждения (ДСВО) слитка на МНЛЗ, которая поддерживает температурный профиль заготовки вдоль технологического канала МНЛЗ. Проблема быстрой дей-

ствия при работе ДСВО решена таким способом, при котором определение температурного профиля слитка в реальном времени производится без решения дифференциального уравнения теплопроводности на каждом временном шаге срабатывания системы.

Для управления вторичным охлаждением в динамическом (нестационарном) режиме разливки массив конвективных коэффициентов теплоотдачи обрабатывается в виде функции:

$$\bar{\alpha}_{j,m} = f(v, L_j),$$

где v – скорость разливки, L_j – расстояние от мениска металла до середины j -й зоны охлаждения.

При переходных режимах используется зависимость:

$$\alpha_j(\tau) = \alpha_{1j} + (\alpha_{2j} - \alpha_{1j}) \cdot \left[1 - \left(\frac{\tau'' - \tau}{\tau_{II}} \right)^k \right]^{\frac{1}{k}}, \\ \tau_{II} = \tau'' - \tau' \text{ при } \tau' \leq \tau \leq \tau'',$$

где k – коэффициент равный при снижении скорости 1,5, а при повышении скорости 1,25; τ' и τ'' – время начала и конца переходного процесса.

Настройка параметров модели производится во время пуско-наладочных работ, однако, нельзя гарантировать, что во время дальнейшего функционирования МНЛЗ, не произойдёт изменение какого-либо из этих параметров.

В связи с этим для оперативной настройки параметров внешнего теплообмена предлагается использовать алгоритм, основанный на методе стохастической аппроксимации [4].

Подробное описание математической модели приведено в работе [5]. На участке слитка внутри кристаллизатора задано уравнение тепломассопереноса и граничные условия [1]. На границе раздела фаз заданы условия равенства температур и условия Стефана, а также граничное и начальные условия для границы фазового перехода.

Для стенки кристаллизатора заданы уравнение теплопроводности и граничные условия, соответствующие характеру теплообмена на каждом участке границы.

Температура охлаждающей воды в канале кристаллизатора описывается балансовым уравнением. Известна температура охлаждающей воды на входе в канал кристаллизатора и её начальное распределение внутри канала.

Уравнение тепломассопереноса для слитка на криволинейных участках МНЛЗ выглядит следующим образом:

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

где $\theta_m(\tau)$ – угловая скорость движения слитка на m -м криволинейном участке; $T(\tau, r, \varphi)$ – температура; $c(T, r, \varphi)$ – удельная теплоёмкость; $\rho(T, r, \varphi)$ – плотность; $\lambda(T, r, \varphi)$ – теплопроводность разливаемого металла; r – радиус кривизны рассматриваемого участка.

На неизвестной границе на криволинейных участках заданы условия равенства температур и условия Стефана:

$$\lambda(T, r, \varphi) \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\xi_{1-}} - \lambda(T, r, \varphi) \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\xi_{1+}} = \mu \rho_{kr} \left(\theta_m(\tau) \cdot \frac{\partial \xi_1}{\partial \varphi} + \frac{\partial \xi_1}{\partial \tau} \right),$$

$$\xi_1(0, \varphi) = \xi_{1_0}(\varphi),$$

где $\xi_1(\varphi)$ – граница раздела фаз.

Аналогично задаётся условие для второй границы фазового перехода $\xi_2(\varphi)$.

Граничные условия на криволинейных участках учитывают сложный механизм теплоотвода за счёт конвекции и излучения. По внутреннему радиусу они имеют вид

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

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

Аналогично уравнению (1) задаётся уравнение тепломассопереноса и граничные условия на прямолинейном участке. Если жидкая фаза продолжается дальше точки выпрямления, то здесь также задаются условия для неизвестной границы раздела фаз.

Считается, что в конце прямолинейного участка тепловой поток равен нулю. Заданы начальные условия для всего поля температур. Причём начальная температура есть непрерывная функция на всей области слитка и стенки кристаллизатора.

Для решения поставленной задачи подобрана конечно-разностная аппроксимация и разработаны специальные алгоритмы, реализованные в виде программного обеспечения. Программное обеспечение в режиме реального времени вырабатывает управляющие воздействия в зависимости от скорости движения слитка и температуры поступающего расплава.

Для каждой секции ЗВО устанавливаются специальные требования, которые формулируются из соображений наилучшего качества и соблюдения ограничений параметров технологического процесса. Каждая секция охлаждения имеет распределённую степень влияния на температуру слитка в ЗВО. Информацию об этом дают функции чувствительности. Так как основные требования предъявляются к температуре поверхности слитка, необходимо построить функции чувствительности температуры поверхности слитка к изменению расхода воды для каждой секции ЗВО. На основе данных о функциях чувствительности выделяются участки поверхности, на которых наибольшее влияние имеет та или иная секция ЗВО.

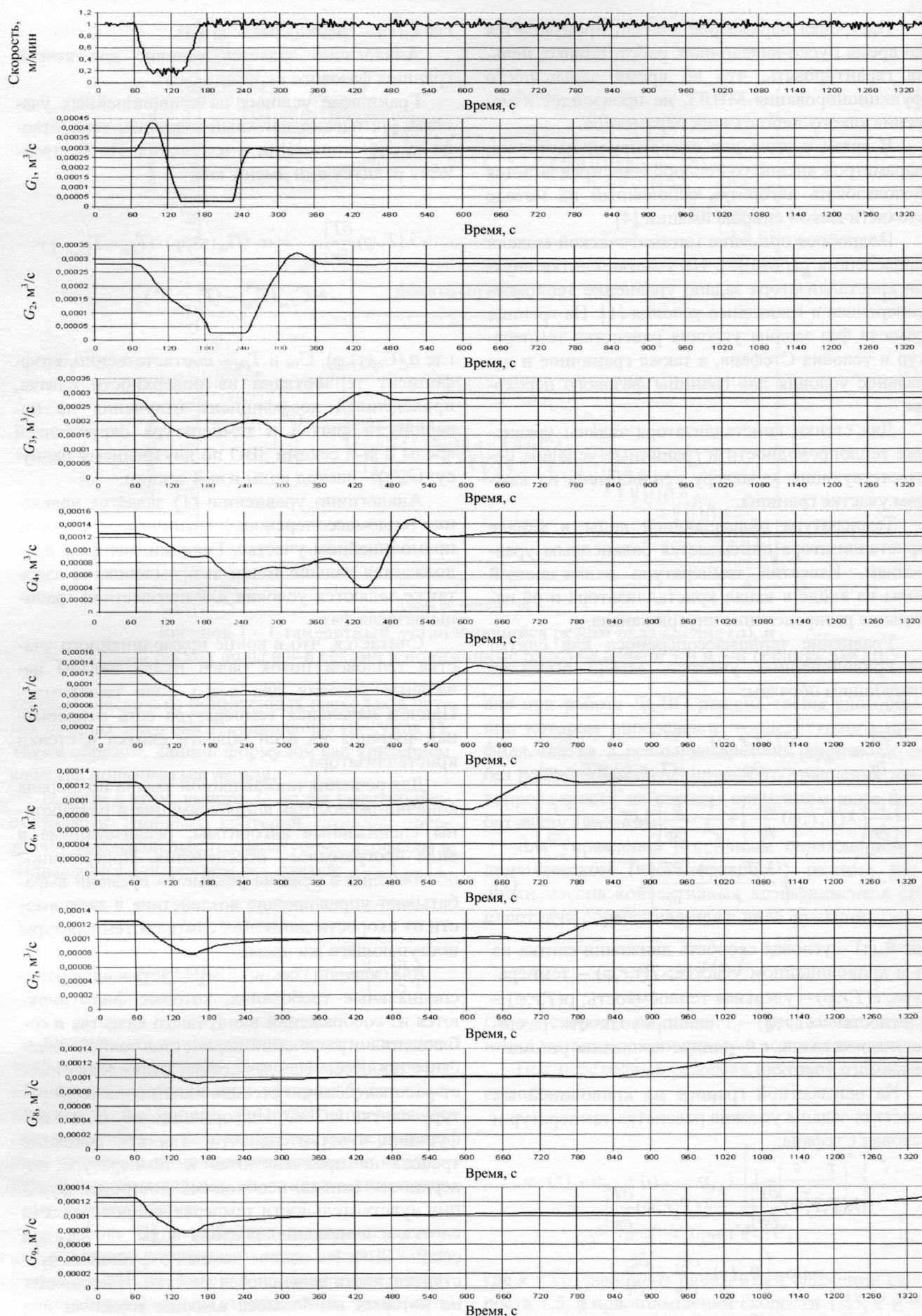


Рисунок 3 – Скорость вытягивания слитка и соответствующие расходы воды в 1...9 секциях ЗВО

На поступающих данных о скорости слитка программа рассчитывает температурное состояние слитка в следующий момент времени, которое используется в качестве обратной связи для выработки управляющего воздействия на расход воды в каждой секции ЗВО. Определяется такой расход воды, при котором бы обеспечивался наиболее близкий к необходимому уровень температуры поверхности в секции.

Для демонстрации работы программы управляющей расходами воды, рассматривается простейший случай, когда из установившегося режима при скорости вытягивания слитка 1 м/мин скорость снижается до 0,2 м/мин, а затем через некоторое время снова возрастает и устанавливается на уровне 1 м/мин (рисунок 3). На первом графике представлена скорость движения слитка, на последующих – соответствующие рекомендуемые расходы воды в каждой из секций ЗВО, генерируемые программой.

Непосредственно сразу, после того, как снижается скорость вытягивания слитка, температура поверхности на участках, не накрываемых факелами форсунок, начинает расти. Связано это с тем, что участки, которые несколько дольше не подвергаются принудительному охлаждению, успевают повторно разогреться за счёт внутренней энергии слитка. Поэтому на графике расхода воды для первой секции сначала наблюдается увеличение G_1 , затем расход воды снижается из-за того, что к первой секции подходит металл, который уже переохлаждён, так как находился в кристаллизаторе достаточно долго. Далее можно видеть, что управляющее воздействие выходит на ограничение по минимально допустимому расходу воды. При этом, из-за того, что металл, выходящий из кристаллизатора был там слишком переохлаждён, даже минимальный расход воды в первой секции не обеспечивает необходимую температуру поверхности.

С ростом скорости и после того, как переохлаждённый участок прошел первую секцию, увеличивается и рекомендуемый расход воды для первой секции. Практически сразу он устанавливается на отметке, которая была в установившемся режиме до нанесения возмущения.

Во второй секции расход воды начинает постепенно снижаться с понижением скорости. Резкое снижение до минимума, соответствует прохождению переохлаждённого участка слитка.

В третьей и последующих секциях управляющие воздействия уже не выходят на ограни-

чения, а температура поверхности остаётся стабильной. Можно наблюдать, как после прохождения переохлаждённого участка слитка последовательно в каждой секции устанавливается расход воды, соответствующий нормальному технологическому режиму.

Выводы

Алгоритм, основанный на расчёте математической модели температурного состояния слитка, позволяет стабилизировать уровень температур уже в первых секциях ЗВО. В результате в последних секциях, где большое влияние на качество слитка имеют величины температурных градиентов, удаётся поддерживать заданный тепловой режим, не выходя при этом на ограничения управляющих воздействий. Следует также отметить стабильную работу алгоритма при погрешностях на данных о скорости вытягивания слитка.

1. *Теория непрерывной разливки. Технологические основы* / В.С. Рутес, В.И. Аскольдов, Д.П. Евтеев и др. – М.: Металлургия, 1971. – 296 с.
2. *Вдовин К.Н., Повитухин С.А. Определение оптимальных режимов при непрерывной разливке стали* / Теория и технология металлургического производства: Сб. науч. тр. // Под ред. В.М. Колокольцева. – Магнитогорск: ГОУ ВПО МГТУ, 2005. – С. 122-128.
3. *Система управления качеством непрерывно литых заготовок.* <http://www.ume.ru/rus/materials/index.shtml> / В.Ю. Авдонин, Л.В. Буланов и др. // Сб. трудов конференций и семинаров "Недели металлов". Москва, 14-18 ноября 2005.
4. *Ткаченко В.Н., Иванова А.А., Василян Г.Р. Идентификация параметров внешнего теплообмена в зоне вторичного охлаждения МНЛЗ* / Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Інформатика і моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2007. – № 39. – С. 168-177.
5. *Ткаченко В.Н., Иванова А.А. Анализ температурных полей криволинейной МНЛЗ на основе математического моделирования* / Матеріали 3-ї міжнародної науково-практичної конференції "Прогресивні технології у металургії сталі: XXI сторіччя". – Донецьк: ДонНТУ. – 2007. – С. 242-249.

Статья поступила 31.07.2008 г.

© А.А. Иванова, 2008

МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

№ 4(14)
ДЕКАБРЬ 2008

международный научно-технический и производственный журнал

Главный редактор
В.Я. Седуш

Редакционный совет:

С.И. Авакумов,
В.Г. Артюх,
Е.А. Башков,
Ю.Н. Белобров,
И.А. Берштейн,
В.И. Большаков,
В.С. Волошин,
В.И. Дворников,
С.П. Еронько,
А.А. Ищенко,
И.А. Ленцов,
А.А. Минаев,
С.С. Самотугин,
В.А. Сидоров,
А.Н. Смирнов,
В.В. Суглобов,
А.А. Троянский,
В.И. Фарберов,
А.Д. Чепурной,
Ф.Л. Шевченко,
С.Л. Ярошевский.

Редакторы:

А.Л. Сотников, А.В. Рябухин, А.В. Кузин

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. Кастанеевская, 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"
2008. №4(14)

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 20.11.2008.
Формат 60х84 1/8. Заказ 1111.
Тираж 800 экз. Печать
ООО "Цифровая типография", 2008.

© А.Л. Сотников, 2008

СОДЕРЖАНИЕ

"МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ОБОРУДОВАНИЕ-2008"

Сотников А.Л., Рябухин А.В.

Итоги IV Международной научно-технической конференции
"Металлургические процессы и оборудование" 3

Демидович В.Б., Иванов В.Н., Червинский В.И.

Актуальные энергосберегающие технологии
индукционного нагрева в металлургии 5

**Жучков С.М., Кузьмичев В.М.,
Раздобреев В.Г., Перков О.Н., Трищун А.И.**

Пути повышения конструктивной прочности
колесных центров 13

Иванова А.А.

Управление режимами вторичного охлаждения МНЛЗ 17

Ищенко А.А., Радионенко А.В., Антоненко А.В., Родак А.А.

Применение полимерных материалов
в подшипниках скольжения 22

Кульбида Е.П., Данилова Т.А., Черный А.Н.

К вопросу переработки алюминиевых шлаков 26

Кухарь В.В., Балалаева Е.Ю.

Исследование деформаций станины кривошипного пресса
открытого типа при работе с упругими компенсаторами
погрешностей направления ползуна 30

Кухарь В.В., Бурко В.А.

Экспериментальные исследования
формоизменения цилиндрических заготовок
при осадке выпуклыми продолговатыми плитами 35

Кушнерова Е.Ю., Горбатенко В.П.,

Беленький А.В., Бредихин В.Н.

Процессы структурообразования
в непрерывно литой заготовке с серебряного сплава 40

Кушнерова Е.Ю., Маняк Н.А., Бредихин В.Н.

Формирования бронзовой заготовки
в закрытом горизонтальном кристаллизаторе 44

Ожогин В.В., Себко Л.В., Десятский С.П.,

Ковалевский И.А., Кипчарский С.В.

Оценка влияния химико-минералогического состава
на прочность брикетов 49

ВЫСТАВКИ. КОНФЕРЕНЦИИ. СЕМИНАРЫ

Ярош В.И.

Итоги V международной специализированной выставки
"Металлургия-2008" 55

Иванова Е.Н.

Итоги "Металл-Форума Украина-2008" 56

ИНФОРМАЦИЯ

Бланк-заказа вышедших номеров журнала
и научно-технической литературы 58

Об издании 60

МЕТАЛУРГІЙНІ ПРОЦЕСИ ТА ОБЛАДНАННЯ

міжнародний науково-технічний і виробничий журнал

№ 4(14)
Грудень 2008

Головний редактор
В.Я. Седуш

Редакційна рада:

С.І. Авакумов,
В.Г. Артюх,
Є.О. Башков,
Ю.М. Білобров,
Й.О. Берштейн,
В.І. Большаков,
В.С. Волошин,
В.І. Двірників,
С.П. Єронько,
А.О. Іщенко,
І.А. Ленцов,
О.А. Мінаєв,
С.С. Самотугін,
В.А. Сидоров,
О.М. Смирнов,
В.В. Суглобов,
О.А. Троянський,
В.І. Фарберов,
А.Д. Чепурний,
Ф.Л. Шевченко,
С.Л. Ярошевський.

Редактори:

О.Л. Сотніков, О.В. Рябухін, А.В. Кузін

Засновник і видавець:

ТОВ "Технопарк ДонДТУ "УНІТЕХ"
83001, Україна, Донецьк,
вул. Артема, 58
Телефони: +38 (062) 348-50-56,
+38 (066) 029-44-30
Ел. пошта: m-lab@ukr.net
Інтернет: assom.donntu.edu.ua

Представництво в Росії:

ТОВ "ТОІР Консалт"
121108, Росія, Москва,
вул. Кастанеєвська, б. 27, корп. 4
Телефон/факс: +7 (495) 775-85-02
Ел. пошта: info@toir-consult.ru
Інтернет: www.toir-consult.ru

"Металургійні процеси
та обладнання"
2008. №4(14)

ISSN 1816-1200

Видається з травня 2005 р.
Періодичність видання: 4 рази в рік.

Журнал реферується
Всеросійським інститутом
наукової і технічної інформації
Російської академії наук (ВІНІТИ РАН)

Передплатний індекс у каталогах:

"Преса України" - 98832
"Газеты, журналы" (Агентство
ОАО "Роспечать") - 21897

Свідчення
про державну реєстрацію
КВ 11997-868Р від 21.11.2006

Свідчення
про внесення видавця в
Державний реєстр
суб'єктів видавничої діяльності
ДК 1017 від 21.08.2002

За зміст статей та їхню
оригінальність несуть відповідальність
автори. Думка редакції може
не збігатися з думкою авторів.
За зміст рекламних матеріалів
відповідальність несе рекламодавець.

Підписано до друку 20.11.2008.
Формат 60х84 1/8. Замовлення 1111.
Наклад 800 экз. Друк
ТОВ "Цифрова друкарня", 2008.

© О.Л. Сотніков, 2008

ЗМІСТ

"МЕТАЛУРГІЙНІ ПРОЦЕСИ ТА ОБЛАДНАННЯ-2008"

Сотніков О.Л., Рябухін О.В.

Підсумки IV Міжнародної науково-технічної конференції
"Металургійні процеси та обладнання" 3

Демідович В.Б., Іванов В.М., Червінський В.І.

Актуальні енергозберігаючі технології
індукційного нагрівання в металургії 5

Жучков С.М., Кузьмичов В.М.,
Раздобреєв В.Г., Перков О.М., Трищун О.І.

Шляхи підвищення конструктивної міцності
колісних центрів 13

Іванова А.О.

Керування режимами вторинного охолодження МБЛЗ 17

Іщенко А.О., Радіоненко О.В., Антоненко О.В., Родак А.А.

Застосування полімерних матеріалів
у підшипниках ковзання 22

Кульбіда Є.П., Данілова Т.А., Чорний О.М.

До питання переробки алюмінієвих шлаків 26

Кухар В.В., Балалаєва О.Ю.

Дослідження деформацій станини кривошипного преса
відкритого типу при роботі з пружними компенсаторами
погіршностей напрямку повзуна 30

Кухар В.В., Бурко В.А.

Експериментальні дослідження
формозміни циліндричних заготовель
при осаді опуклими довгастими плитами 35

Кушнерова К.Ю., Горбатенко В.П.,
Бєленький О.В., Бредихін В.М.

Процеси структуроутворення
в безупинно литий заготовці зі срібного сплаву 40

Кушнерова К.Ю., Маняк М.О., Бредихін В.М.

Формування бронзової заготовки
в закритому горизонтальному кристалізаторі 44

Ожогін В.В., Себко Л.В., Десятський С.П.,
Ковалевський І.А., Кипчарський С.В.

Оцінка впливу хіміко-мінералогічного складу
на міцність брикетів 49

ВИСТАВКИ. КОНФЕРЕНЦІЇ. СЕМІНАРИ

Ярош В.І.

Підсумки V міжнародної спеціалізованої виставки
"Металургія-2008" 55

Іванова Е.М.

Підсумки "Метал-Форуму Україна-2008" 56

ІНФОРМАЦІЯ

Бланк-замовлення номерів журналу, що вийшли,
та науково-технічної літератури 58
Про видання 60