



БАТРАЕВА
Анастасия Евгеньевна

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА УПРАВЛЕНИЯ ОХЛАЖДЕНИЕМ
ЗАГОТОВОК МНЛЗ В АСУ ТП

Специальность 05.13.06 Автоматизация и управление технологическими
процессами и производствами (в промышленности)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Магнитогорск – 2009

Работа выполнена в государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

Научный руководитель –

*доктор технических наук, профессор,
Парсункин Борис Николаевич*

Официальные оппоненты:

*доктор технических наук, профессор,
Казаринов Лев Сергеевич*

*кандидат технических наук, доцент,
Волищук Юрий Николаевич*

Ведущее предприятие –

*Уральский государственный технический
университет – УПИ*

Защита состоится 14 октября 2009 г. с 10 часов на заседании диссертационного совета Д 212.298.03 при ГОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» по адресу: 454080, г. Челябинск, проспект имени В. И. Ленина, 76; зал заседаний диссертационного совета (аудитория 1001).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Южно-Уральского государственного университета.

Автореферат разослан «08» 09 2009 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук, профессор



А.Г. Щипицын

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В условиях кризиса мировой экономики необходимо поддерживать конкурентоспособность продукции и решать задачи, связанные с постоянным повышением качества отечественных металлоизделий. Такие задачи надо решать за счет создания комплексной автоматизированной системы контроля и управления технологическим процессом (АСУ ТП), которая обеспечивает необходимое качество металлопродукции на каждом этапе ее производства.

Непрерывнолитые заготовки являются основным сырьем для производства проката, и качество заготовок определяет качество готового металлоизделия. Одной из основных проблем, встречающихся при разливке металла на МНЛЗ радиально-криволинейного типа, считается наличие трещин и ликвационных зон во внутренней структуре металла, а также на поверхности заготовок. Одной из причин появления дефектов в непрерывнолитых заготовках являются термические напряжения. Уменьшение термических напряжений обеспечивается при помощи повышения качества управления в АСУ ТП за счет введения рационального управления охлаждением заготовок.

Основная проблема, решаемая в данной работе - совершенствование процесса управления охлаждением заготовок для получения заданного качества и температурного состояния на выходе из МНЛЗ. В работе учтены результаты исследований Бутковского А.Г., Сиразетдинова Т.К., Лионса Ж.Л., Черноуцкого И.Г., Панферова В.И., Девятова Д.Х., Парсункина Б.Н. в области теории управления и методов оптимизации; Евтеева Д.П., Борисова В.Т., Лисиенко В.Г., Журавлева В.А., Самойловича Ю.А., Лисина В.С. и др. в области разработки теоретических положений, практической разработки, внедрения и эксплуатации машин непрерывного литья заготовок. В АСУ ТП МНЛЗ применяется довольно большой спектр программных продуктов, предназначенных для улучшения процесса разливки. Однако, они, в основном, лишь определяют необходимые параметры разливки в стационарном режиме работы МНЛЗ. В МГТУ, где выполнялась данная работа, также занимаются проблемами рационализации процесса охлаждения заготовок МНЛЗ. В работах Логуновой О.С., Тутаровой В.Д. рассматриваются задачи повышения качества заготовок МНЛЗ и взаимосвязь дефектов структуры с температурными полями заготовок.

Специфика задачи, рассматриваемой в настоящей работе, состоит в учете динамики процессов охлаждения заготовок в МНЛЗ. Оптимизация процесса охлаждения позволит повысить качество сортовых заготовок. Однако, эта задача в известной литературе не рассматривалась. Решение данной задачи связано с построением адаптивной системы управления охлаждением заготовок МНЛЗ. Сказанное определяет актуальность задачи, решаемой в работе.

Цель и задачи работы. Целью данной диссертационной работы является создание адаптивной автоматизированной системы управления охлаждением сортовых заготовок для повышения их качества в рамках АСУ ТП МНЛЗ.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

– разработка динамической модели охлаждения заготовок и оперативного метода расчета по ней температурного поля заготовок в реальном времени;

- разработка метода настройки динамической модели по экспериментальным данным;
- выбор метода эффективного поиска рациональных расходов воды по секциям зоны вторичного охлаждения (ЗВО);
- разработка структуры адаптивной системы управления охлаждением заготовок на базе динамической модели процесса охлаждения;
- разработка программного обеспечения для реализации адаптивной системы управления, где рассчитываются необходимые расходы воды по секциям ЗВО с представлением температурных полей с учетом марки стали, теплоты кристаллизации, размеров жидкой, твердой и двухфазных зон в процессе нестационарного и стационарного движения заготовок;
- проведение эксперимента на объекте управления и получение экспериментальных данных, настройка динамической модели и программного регулятора по разработанным алгоритмам;
- моделирование работы системы;
- интеграция системы управления в существующую АСУ ТП МНЛЗ;
- апробация работы адаптивной системы управления.

На защиту выносятся:

- структура адаптивной системы управления охлаждением заготовок МНЛЗ;
- алгоритм настройки динамической модели процесса охлаждения заготовок и алгоритм настройки программного регулятора;
- программное обеспечение для реализации адаптивной системы управления охлаждения заготовок МНЛЗ.

Научная новизна. Научная новизна заключается в следующем:

- разработаны конечно-разностные уравнения для решения дифференциального уравнения теплопроводности динамической модели процесса охлаждения заготовок;
- на базе динамической модели разработана новая структура адаптивной системы управления температурным полем заготовок для получения заданного температурного поля по всей длине заготовок вдоль оси МНЛЗ в реальном масштабе времени;
- впервые предложено поддерживать среднемассовую температуру заготовок вдоль оси МНЛЗ изменяющейся по линейному закону для получения заданной температуры на выходе из МНЛЗ и минимальных значений напряжений;
- разработан новый алгоритм настройки динамической модели температурного поля заготовок и алгоритм настройки функции регулирования температуры заготовок.

Практическое значение результатов. Практическая ценность работы заключается в следующем:

- разработан комплекс программных средств управления, который в отличие от существующих, позволяет производить моделирование температурного поля по объему заготовок в реальном времени, регулирование расхода охладителя для получения заданного температурного поля в реальном времени, а также настройку

модели и регулятора; данный программный комплекс позволяет повысить качество продукции и улучшить контроль за процессом охлаждения;

- проведено опытное промышленное исследование системы управления на МНЛЗ №2 в ЭСПЦ ОАО «ММК», позволившее проверить алгоритм настройки модели температурного поля заготовок;

- система управления использовалась для оптимизации процесса охлаждения заготовок на МНЛЗ №2 в ЭСПЦ ОАО «ММК» и может быть применена на аналогичных МНЛЗ, также она может применяться для исследования различных режимов разливки заготовок;

- разработанная динамическая модель служит базой для вновь разрабатываемой адаптивной системы управления качеством заготовок МНЛЗ;

- разработанная база данных для хранения теплофизических характеристик сталей, настроечных параметров динамической модели и настроечных параметров регулятора может использоваться для других систем управления качеством заготовок МНЛЗ;

- применение разработанной адаптивной системы управления позволило достигнуть уменьшение количества брака на 3%.

Апробация работы. Материалы по данной работе доложены:

- на международной научно-технической конференции молодых специалистов и инженеров ОАО «ММК» в г. Магнитогорске в 2005 году работа заняла I место;

- на Всероссийской научно-технической конференции «Создание и внедрение корпоративных информационных систем (КИС) на промышленных предприятиях Российской Федерации» (г. Магнитогорск, 2005 год);

- на V международном научно-практическом семинаре «Управление информационной инфраструктурой организации на основе технологии открытых систем» (МаГУ, г. Магнитогорск, 2008 год);

- на 63-ей, 64-ой, 65-ой и 66-ой научно-технических конференциях по итогам научно-исследовательских работ (г. Магнитогорск, МГТУ, 2005, 2006, 2007, 2008 года).

Получены два гранта Министерства образования РФ и Правительства Челябинской области в 2004 году и в 2005 году. Получен акт внедрения разработанной системы на производстве и акт внедрения комплекса программных средств в учебный процесс.

Публикации по теме диссертации. По материалам диссертации опубликовано 16 статей в научно-технических журналах и сборниках, две из которых опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК для публикаций основных результатов диссертационных исследований, получено свидетельство об отраслевой регистрации программ.

Объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, общих выводов, библиографического списка используемой литературы, включающего 71 наименование, а также 8 приложений. Диссертация изложена на 156 страницах и включает 63 рисунка, 9 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Одними из важнейших факторов при получении качественных заготовок являются температура слитков и режим их охлаждения. Неправильная организация вторичного охлаждения может привести к появлению внутренних и поверхностных дефектов в отливаемых заготовках вследствие возникновения в различных слоях формирующейся оболочки недопустимо высоких термических напряжений. Для повышения качества и снижения себестоимости предлагается использовать разработанную динамическую адаптивную систему управления температурным состоянием заготовок МНЛЗ.

Структурная схема комплекса технических средств системы управления представлена на рис. 1. Данные со станций удаленного ввода-вывода ET200M поступают на контроллеры по сети Profibus, далее с контроллеров по сети Ethernet через коммутатор поступают на АРМ в главном посту управления, на котором установлен программный комплекс системы управления. Система управления рассчитывает необходимые расходы охладителя в соответствии с динамической моделью и функцией регулирования и передает заданные значения расходов обратно на станции удаленного ввода-вывода.

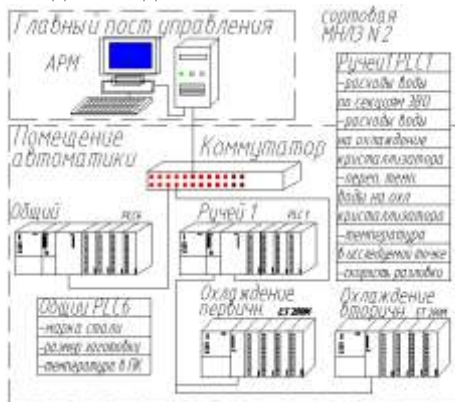


Рис. 1. Структурная схема комплекса технических средств разрабатываемой системы применительно к сортовой МНЛЗ №2 ЭСПЦ ОАО ММК

В разработанной системе управления за основу взята динамическая модель процесса охлаждения заготовок.

Моделирование теплового и напряженного состояния заготовок.

Рационализация управления охлаждением непрерывнолитых заготовок

Динамическая модель теплового состояния заготовок

При нестационарных условиях разливки наблюдаются переходные режимы в температурном поле заготовок, которые статические модели расчета температуры поперечного сечения заготовок во времени не позволяют отследить. Для этой цели предлагается использовать динамическую модель охлаждения заготовок, которая позволяет определять температуру по всему объему заготовок во времени.

В модели используется дифференциальное уравнение теплопроводности с внутренними источниками тепла в четырехмерной системе координат (система

координат неподвижна, относительно нее со скоростью V_n во времени τ движется непрерывнолитая заготовка, ось z направлена по оси движения, оси x и y соответственно по толщине и ширине заготовки), которое имеет вид:

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

где $t = f(x, y, z, \tau)$ – температурное поле, °C; τ – время, с; $V_n(\tau)$ – скорость разливки в данный момент времени, м/с; q_v – плотность внутренних источников теплоты, Вт/м³; $C(t)$ – удельная теплоемкость стали при данной температуре, кДж/кгК; $\rho(t)$ – плотность стали при данной температуре, кг/м³; $\lambda(t)$ – коэффициент эффективной теплопроводности при данной температуре, Вт/мК.

С введением величины $\varphi(t)$ – относительного количества твердой фазы для кристаллизующегося слоя выражение (1) запишется в виде:

$$\rho(t)C(t) \left(\frac{\partial t}{\partial \tau} + V_n(\tau) \frac{\partial t}{\partial z} \right) = \text{div}(\lambda(t) \text{grad} t) + \Delta h_{\varphi} \left(\frac{\rho_{\tau z} \partial \varphi(t)}{\partial \tau} + V_n(\tau) \frac{\rho_{\tau z} \partial \varphi(t)}{\partial z} \right) + q_{\tau z}, \quad (2)$$

где Δh_{φ} – высвобождаемое тепло при фазовом переходе, кДж/кг; $\rho_{\tau z}$ – плотность затвердевшей стали, кг/м³; $q_{\tau z}$ – плотность внутренних источников теплоты за счет структурных переходов, Вт/м³.

Известно, что при затвердевании бинарный сплав железа с углеродом претерпевает не только фазовый, но и структурный переход. Наибольшее тепловыделение происходит при фазовом переходе, но при точных расчетах следует учитывать и тепловыделение, возникающее при охлаждении за счет структурных переходов. Для учета выделяющейся теплоты структурных переходов вводится величина относительного количества вещества с определенной структурой $\varphi_{\tau z}$.

Для упрощения методики решения задач затвердевания теплоту кристаллизации и структурных превращений учитывают при помощи введения эффективной теплоемкости $C_3(t)$. Используя подстановку $\frac{\partial \varphi}{\partial \tau} = \left(\frac{\partial \varphi}{\partial t} \right) \left(\frac{\partial t}{\partial \tau} \right)$, запишем дифференциальное уравнение теплопроводности:

$$\rho(t)C_3(t) \left(\frac{\partial t}{\partial \tau} + V_n(\tau) \frac{\partial t}{\partial z} \right) = \text{div}(\lambda(t) \text{grad} t), \quad (3)$$

где величина C_3 – эффективная теплоемкость, являющаяся функцией тепла кристаллизации, задается в виде:

$$C_3(t) = C(t) - \Delta h_{\text{кр}} \left(\frac{\partial \varphi}{\partial t} \right) - \Delta h_{\alpha} \varphi_{\tau z \alpha} - \Delta h_{\beta} \varphi_{\tau z \beta} - \Delta h_{\gamma} \varphi_{\tau z \gamma}. \quad (4)$$

Начальные условия состоят в задании для некоторого начального момента времени распределения температур $t = f(x, y, z, \tau_0)$. В данной модели за начальные условия принят установившийся режим разливки.

Для задания граничных условий вдоль продольной оси МНЛЗ можно выделить несколько характерных зон: зону кристаллизатора, ЗВО и зону воздушного охлаждения. В зоне кристаллизатора учитывается теплоотдача за счет контакта заготовки с водоохлаждаемым кристаллизатором. В секциях ЗВО учитывается теплоотдача за счет водяного охлаждения, за счет теплового излучения, естественной и вынужденной конвекции, контакта с роликами. В зоне воздушного

охлаждения учитывается теплоотдача за счет излучения, естественной и вынужденной конвекции и контакта с роликами.

Граничное условие в кристаллизаторе описывается уравнением:

$$\lambda(t) \frac{\partial t}{\partial n} = -\alpha_{кр}(t_{пов} - t_{ср}), \quad (5)$$

где ∂n – соответствует ∂x или ∂y при расчете по толщине или по ширине; $\frac{\partial t}{\partial n}$ – изменение нестационарного температурного поля по ∂x или ∂y , °C/м; $\alpha_{кр}|_{y=\frac{H}{2}} = \frac{k_{кр} \lambda_{м}}{H_{м}}$ – коэффициент теплоотдачи в кристаллизаторе, Вт/м²К; $t_{пов}$ и $t_{ср}$ – соответственно температура поверхности затвердевающего слитка и среды определенной зоны, °C; $H_{м}$ – толщина медной стенки кристаллизатора, м; $\lambda_{м}$ – коэффициент эффективной теплопроводности меди, Вт/мК; $k_{кр}$ – параметр идентификации.

Граничное условие в ЗВО описывается уравнением:

$$\lambda(t) \frac{\partial t}{\partial n} = -(\alpha_{охл.воды} + \alpha_{изл.} + \alpha_{ест.конв.} + \alpha_{вын.конв.} + \alpha_{рол.})(t_{пов} - t_{ср}), \quad (6)$$

где $\alpha_{охл.воды}$, $\alpha_{изл.}$, $\alpha_{ест.конв.}$, $\alpha_{вын.конв.}$, $\alpha_{рол.}$ – соответственно коэффициенты теплоотдачи вследствие водяного охлаждения, теплового излучения, естественной и вынужденной конвекции, контакта с роликами, Вт/м²К.

Граничное условие в зоне воздушного охлаждения описывается уравнением:

$$\lambda(t) \frac{\partial t}{\partial n} = -(\alpha_{изл.} + \alpha_{ест.конв.} + \alpha_{вын.конв.} + \alpha_{рол.})(t_{пов} - t_{ср}). \quad (7)$$

Таким образом, математическая задача состоит в определении поля температур во времени $t = f(x, y, z, \tau)$, удовлетворяющей начальным условиям, граничным условиям (5), (6), (7) и являющаяся решением дифференциального уравнения (3), в котором $C_3(t)$ и $\lambda(t)$ являются функциями температуры. Независимыми размерными величинами задачи являются x, y, z, τ , а температура t – искомая функция.

Термонапряжения в непрерывнолитых заготовках

Термическое напряжение в затвердевающей оболочке взаимосвязано с распределением температуры по ее толщине. В свою очередь, температурное поле (распределение температуры по толщине затвердевающих заготовок) взаимосвязано с постоянно изменяющейся толщиной затвердевшей части. Исследования Ю.А. Самойловича показывают, что при определенных условиях температурное поле затвердевающей оболочки стабилизируется. Последняя стадия затвердевания обычно характеризуется повышенной скоростью, и она не подчиняется закону квадратного корня.

В соответствии с этим распределение температуры в затвердевающей оболочке можно аппроксимировать линейным законом. Максимальное термическое напряжение в этом случае рассчитывается по следующей формуле:

$$\sigma = \alpha E(t_c - t_{пов.реб.}), \quad (8)$$

где α – коэффициент терморасширения или сжатия отливаемой стали; E – модуль Юнга, кг/см²; t_c – температура солидус, °C; $t_{пов.реб.}$ – температура ребра

(поскольку на ребре возникают наиболее опасные растягивающие напряжения) заготовок, где оцениваются термические напряжения, °С.

Для обеспечения высокого качества заготовок и предотвращения разрыва затвердевшей корочки необходимо, чтобы значение термических напряжений не превышало предельно допустимое напряжение отливаемой стали σ^* :

$$\alpha E(t_c - t_{\text{пов.ребра}}) \leq \sigma^*. \quad (9)$$

И так как резкие изменения интенсивности теплоотвода повышают вероятность появления трещин и прорывов, нужно стремиться к уменьшению градиента температур по толщине и длине заготовок.

Рационализация процесса охлаждения заготовок

Для рационализации процесса охлаждения в соответствии с требованиями, предъявляемыми к технологии непрерывной разливки и качеству непрерывнолитых заготовок необходимо обеспечение следующих условий:

– среднемассовая температура по сечению должна принимать заданное значение на выходе из МНЛЗ:

$$\int_0^L |t_{\text{факт.ср.масс.на выходе из МНЛЗ}} - t_{\text{заданная,ср.масс.на выходе из МНЛЗ}}| dt \rightarrow \min, \quad (10)$$

– функция перепада температур по объему заготовок должна принимать минимальное значение:

$$|gradt| \rightarrow \min, \quad (11)$$

– абсолютные расходы охладителя должны быть минимальными по каждой из зон вторичного охлаждения:

$$Q_{\text{охлаждения}} \rightarrow \min. \quad (12)$$

Таким образом, требуется организовать процесс охлаждения с учетом выполнения условий (10), (11), (12). Однако, для предотвращения аварийных режимов работы системы управления необходимо наложить ограничения на условия охлаждения заготовок:

– по достижению полного затвердевания заготовок перед машиной газовой резки $t_{\text{игр}} < t_c$;

– по максимальному перепаду или градиенту температур, возникающих в поперечном сечении заготовок и оказывающих непосредственное влияние на нарушение сплошности заготовок $|gradt| < |gradt_{\text{критический}}|$;

– по максимальной температуре поверхности заготовок, вышедших из кристаллизатора $t_{\text{поверхности}} < t_{\text{поверхности критическая}}$.

Для выполнения условий (10), (11), (12) предлагается взять за основу среднемассовую температуру заготовок как комплексный параметр. Делается следующее заключение, что если среднемассовая температура заготовок снижается по линейному закону (от фактической среднемассовой температуры на выходе из кристаллизатора до заданной среднемассовой температуры на выходе из МНЛЗ), то обеспечивается:

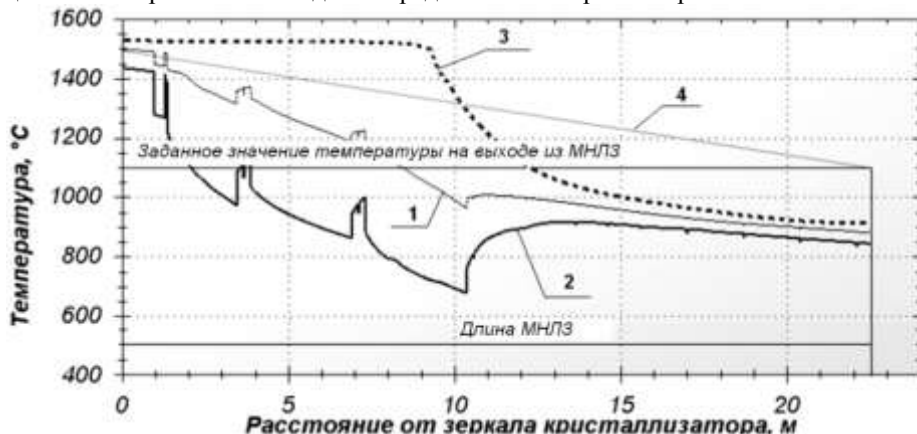
– достижение заданной температуры на выходе из МНЛЗ при минимальном значении модуля градиента температур по длине $\left| \frac{\partial t}{\partial z} \right|$ (т. к. температура уменьшается равномерно);

– минимальное значение модуля градиента температур по поперечному сечению заготовок в направлении оси x – $\left| \frac{\partial t}{\partial x} \right|$ и y – $\left| \frac{\partial t}{\partial y} \right|$ (поскольку не происходит переохлаждения поверхности заготовок);

– наименьший расход воды на охлаждение в секциях ЗВО, при котором достигается заданная температура на выходе из МНЛЗ.

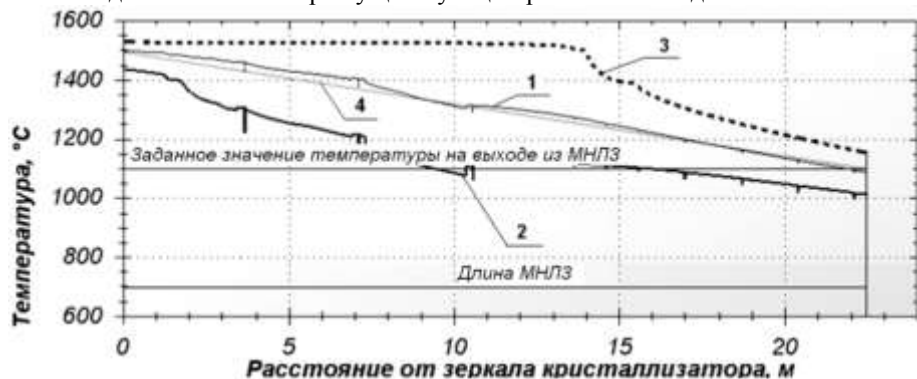
Т.е. выполняются все три условия, поставленные в работе.

Рассчитанные по динамической модели среднемассовые температуры заготовок вдоль оси МНЛЗ при существующем режиме охлаждения заготовок и при рациональном режиме охлаждения представлены на рис. 2 и рис. 3.



1 – среднемассовая температура, °С; 2 – температура ребра заготовки, °С; 3 – температура центра заготовки, °С; 4 – оптимальная среднемассовая температура, °С

Рис. 2. Рассчитанные по динамической модели среднемассовые температуры заготовок вдоль оси МНЛЗ при существующем режиме охлаждения заготовок



1 – среднемассовая температура, °С; 2 – температура ребра заготовки, °С; 3 – температура центра заготовки, °С; 4 – оптимальная среднемассовая температура, °С

Рис. 3. Рассчитанные по динамической модели среднемассовые температуры заготовок вдоль оси МНЛЗ при рациональном режиме охлаждения

На рис. 3 видно, что среднемассовая температура заготовок вдоль оси МНЛЗ снижается практически по линейному закону, что обеспечивает минимальное значение модуля градиента температуры по объему и наименьший расход охладителя. При минимальном значении модуля градиента температур по длине и поперечному сечению заготовок снижается вероятность образования внутренних и поверхностных трещин из-за уменьшения термических напряжений. При режиме разливки, представленном на рис. 2, получается перерасход охлаждающей воды, а при режиме разливки, представленном на рис. 3, расход воды ниже.

В литературе встречаются рекомендации по поддержанию распределения температуры на поверхности заготовок, но среднемассовая температура – это комплексный параметр, учитывающий и температуру поверхности, и температуру внутри заготовок. Однако, для предупреждения экстренных ситуаций в системе управления необходимо предусмотреть алгоритм предотвращения излишнего перегрева и переохлаждения поверхности.

Адаптивная система управления охлаждением заготовок МНЛЗ

Разработанная адаптивная система управления – самоприспосабливающаяся система, в которой приспособление к случайно изменяющимся условиям обеспечивается автоматическим изменением параметров настройки динамической модели процесса охлаждения и параметров регулирующей функции.

Основное отличие адаптивных систем заключается в наличии механизма системной обработки знаний для реализации своих функций. Общая алгоритмическая структура системы управления процессом охлаждения представлена на рис. 4.

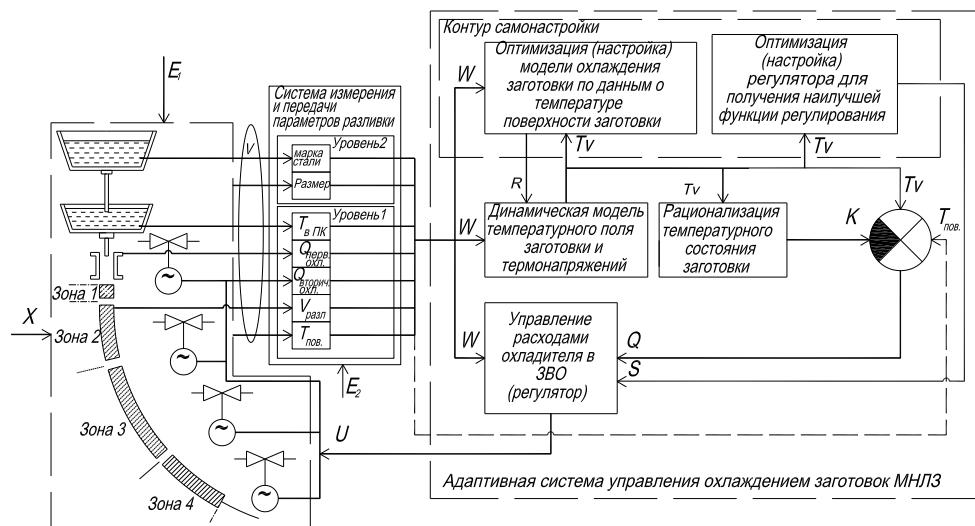


Рис. 4. Структурная схема разработанной системы управления охлаждением заготовок МНЛЗ

На вход объекта управления – МНЛЗ поступает вектор параметров технологического процесса X , вектор управляющих воздействий U , вектор возмущений E_1 .

При наличии измерительных шумов E_2 измеряются значения вектора W , которые передаются на вход блоков динамической модели, алгоритма управления и алгоритма оптимизации модели. В блоке динамической модели выполняется расчет температурного поля заготовок и возникающие в них термонапряжения – вектор T_v . Также на вход блока поступают значения R корректировки настроечных параметров. В соответствии с алгоритмом рационализации температурного состояния заготовок по расчетным данным P определяется рациональное температурное поле заготовок K . Процесс построения оценок Q переменных состояния по выходным значениям K алгоритма оптимизации температурного состояния заготовок возможен по выходным значениям динамической модели температурного поля и напряжений в заготовках T_v , либо по температуре поверхности $T_{пов.}$ заготовок и реализуется с помощью блока сравнения – алгоритма оценивания состояния. Таким образом, система может работать в двух режимах: в режиме управления по среднemasсовой температуре T_v , рассчитанной по динамической модели, либо в режиме управления по температуре поверхности заготовки $T_{пов.}$, измеряемой непосредственно на объекте. При этом в обоих режимах оптимальное температурное поле определяется, исходя из динамической модели температурного поля и алгоритма рационализации температурного состояния заготовок. Алгоритм оптимизации регулятора позволяет с помощью векторов параметров S организовать выбор оптимального алгоритма управления по полученным оценкам вектора состояний Q и по вектору параметров модели T_v . Параметры устройства управления получаются в результате решения соответствующих оптимизационных задач. В результате устанавливается рациональный режим протекания процессов в управляемом объекте и реализуется оптимальная стратегия поддержания заданного режима при наличии возмущающих воздействий.

Настройка динамической модели охлаждения заготовок

Для правильной работы системы управления в первую очередь необходима настройка динамической модели. Настройка модели производится стохастическим методом поиска оптимума многопараметрической функции – методом отжига. Стохастические методы позволяют исключать локальные минимумы исследуемой функции. Стратегия для исключения проблем локальных минимумов состоит в больших начальных шагах и постепенном уменьшении размера среднего случайного шага. В модели вводится несколько настроечных параметров: $k_{кр}$, $k_{охл.воды}$, $k_{рол}$ – параметры идентификации, определяющие соответственно коэффициент теплоотдачи в кристаллизаторе, коэффициент теплоотдачи за счет водяного охлаждения в секциях ЗВО и за счет охлаждения роликами. Настройка модели производится с помощью разработанного программного продукта. Она выполняется для каждой марки стали для одного из ручьев по данным с полевого уровня объекта.

Оптимизируемая функция для настройки модели имеет вид:

$$\sum_{n=0}^N (t_{\text{факт}} - t_{\text{расч}})^2 \rightarrow \min, \quad (13)$$

где $t_{\text{факт}}$ – фактическая температура на выходе из кристаллизатора, $t_{\text{расч}}$ – расчетная температура на выходе из кристаллизатора, N – количество замеров.

Настройка регулирующей функции

Настройка регулирующих воздействий выполняется с помощью адаптированной динамической модели (рис. 4). Реальная система или среда, в данном случае непрерывнолитые заготовки в МНЛЗ, заменяется ее математическим аналогом. В качестве программного аналога регулятора используется функция регулятора. Для выполнения требования к изменению среднemasовой температуры заготовок по длине в соответствии с выбранным законом динамическое регулирование производится по отклонению рассчитанной текущей среднemasовой температуры по длине заготовок от оптимального текущего значения. Целью настройки регулятора является нахождение таких динамических параметров регулятора, при которых среднemasовая температура заготовок выходит на заданное значение за минимальное время с минимальным перерегулированием. Для оценки достижения требуемого результата используется интегральная оценка, которая в идеале должна быть равна нулю:

$$\int_{l=l_{\text{кр}}}^{l_{\text{МНЛЗ}}} |t_{\text{ср.мас.зад.}} - t_{\text{ср.мас.факт.}}| dl \rightarrow \min, \quad (14)$$

где $l_{\text{кр}}$ – длина кристаллизатора, мм; $l_{\text{МНЛЗ}}$ – длина МНЛЗ, мм; $t_{\text{ср.мас.зад.}}$ – заданная среднemasовая температура заготовок, °C; $t_{\text{ср.мас.факт.}}$ – фактическая среднemasовая температура заготовок, °C; dl – приращение по длине заготовок, мм.

Поиск оптимальных значений параметров регулирующей функции выполняется методом покоординатного спуска, поскольку предполагается, что функция не имеет локальных минимумов. Данный метод сводит задачу поиска наименьшего значения функции нескольких переменных к многократному решению одномерных задач оптимизации. Для решения же одномерных задач в данном случае используется метод золотого сечения.

Для определения наилучшего варианта функции регулирования оценивались переходные процессы при использовании существующего способа регулирования и ПИ регулятора. Параметры ПИ-регулятора предварительно определялись методом оптимизации по модулю и уточнялись методом поиска оптимума многопараметрической функции – методом покоординатного спуска.

Реализация работы системы управления с данной структурой осуществляется при помощи разработанного комплекса программных средств.

Интеграция разработанной системы управления в АСУ ТП МНЛЗ

Комплекс программных средств

В системе управления функции сбора данных, контроля и расчета управляющих воздействий выполняет разработанный программный комплекс, который состоит из трех программных продуктов: «Разливка Управление», «Разливка Контроль» и «Разливка PLC». Каждый программный продукт выполняет свои функции и образует интегрированную информационно-управляющую систему. В процессе создания разработки использовался язык программирования C#,

получено свидетельство о регистрации разработки в отраслевом государственном фонде №9271.

Входящее в комплекс программное приложение **«Разливка Управление»** предназначено для настройки динамической модели для каждой марки стали по данным о температуре в промковше, скорости разливки, расходах на первичное и вторичное охлаждение, о температуре на поверхности заготовок на различных расстояниях вдоль оси МНЛЗ, настройки регулятора, регулирования в реальном времени. Найденные настроечные коэффициенты модели и данные с объекта хранятся в базе данных ControlCasting.

Программное приложение **«Разливка Контроль»** предназначен для визуализации процесса разливки по настроенной динамической модели по данным с объекта для динамического и статического моделирования работы МНЛЗ при заданных условиях.

На рис. 5 представлен трехмерный график температурного поля заготовки по сечению. На рис. 6 приведен график работы адаптивной системы управления охлаждения, когда все четыре контура функционируют. Сначала система находится в установившемся состоянии, затем ступенчато изменяется скорость разливки. Как видно из рис. 6, среднемассовая температура на выходе из секций ЗВО немного изменяется, поскольку здесь регулирование производится не по среднемассовой температуре на выходе из МНЛЗ, а по отклонению среднемассовой температуры в секции от заданного значения.

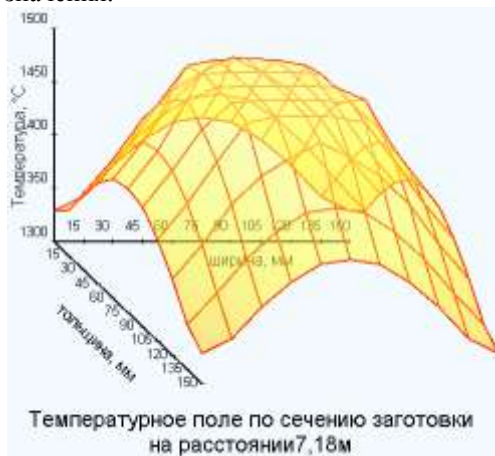


Рис. 5. Температура заготовки по поперечному сечению для марки стали Ст3сп

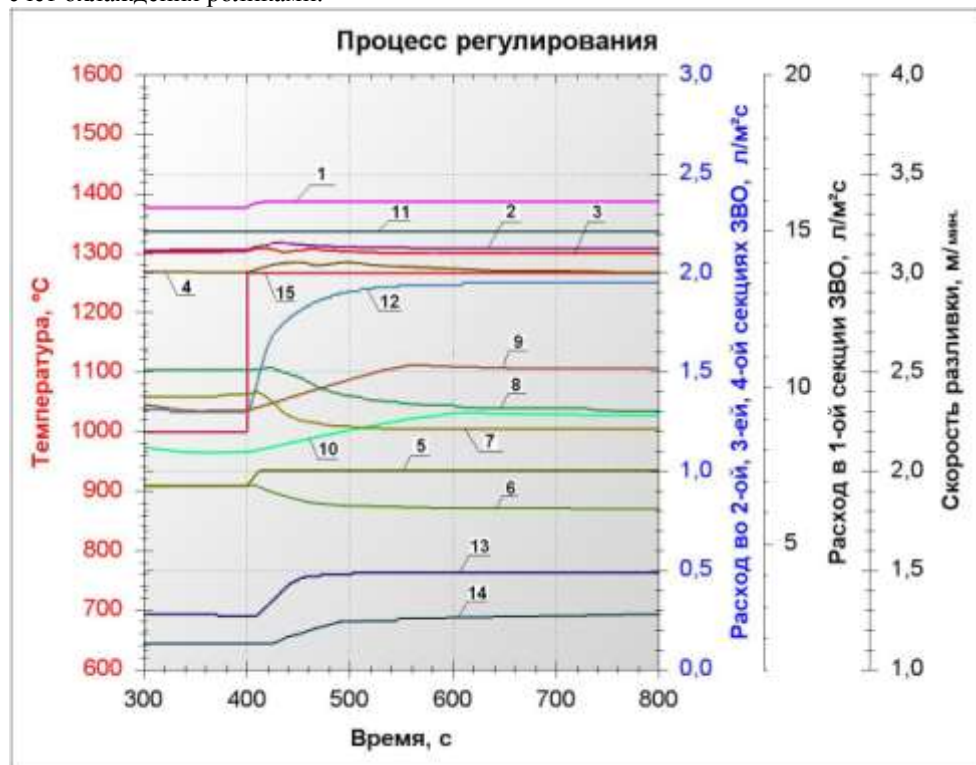
Программный продукт **«Разливка PLC»** предназначен для автоматизированного сбора и передачи технологических данных в локальных системах автоматики и телемеханики через базу данных. Из существующей системы управления собираются данные о марке стали, температуре в промковше, скорости разливки, расходах воды на первичное и вторичное охлаждение, перепаде температуры воды на первичное охлаждение и передаются задающие значения расходов охладителя. Система автоматизации объекта управления реализована на

контроллерах S7-300 ф. Siemens. Программный продукт «Разливка PLC» реализован на основе бесплатно распространяемой библиотеки LibNoDave.

Проведение эксперимента

Эксперимент на сортовой МНЛЗ №2 в ЭСПЦ ОАО «ММК» проводился в течение 2007 года. Наблюдение осуществлялось с использованием разработанного программного комплекса, который был установлен на АРМ в помещении автоматики МНЛЗ №1 и МНЛЗ №2. Поскольку в существующей системе управления не предусмотрен стационарный прибор для измерения температуры поверхности заготовок, измерение температуры в исследуемой точке проводилось с помощью портативного инфракрасного пирометра Raytek Raynger MX. Raynger MX.

Для марки стали СтЗсп была выполнена настройка модели по полученным экспериментальным данным. Программное приложение «Разливка Управление» по данным из базы данных о температуре поверхности заготовок в контрольных точках и остальным параметрам разливки в соответствии с алгоритмом настройки произвело расчет параметров идентификации модели, определяющих коэффициенты теплоотдачи в кристаллизаторе, за счет водяного охлаждения в секциях ЗВО и за счет охлаждения роликами.



1, 2, 3 и 4 – среднемассовая температура на выходе из 1-ой, 2-ой, 3-ей, и 4-ой секции ЗВО, °C;

5, 6, 7 и 8 – температура поверхности на выходе из 1-ой 2-ой, 3-ей и 4-ой секции ЗВО, °С;

9 – среднемассовая температура на выходе из МНЛЗ, °С;

10 – температура поверхности на выходе из МНЛЗ, °С;

11, 12, 13 и 14 – расходы в 1-ой, 2-ой, 3-ей и 4-ой секциях ЗВО, л/м²с;

15- скорость разливки, м/мин

Рис. 6. Работа контуров управления при ступенчатом изменении скорости разливки

Для проверки адекватности предложенной модели были проведены сравнения расчетных данных с результатами экспериментальных замеров температуры в контрольных точках на поверхности заготовок. Относительная погрешность расчетов составила около 5%. На рис. 7 представлен график изменения рассчитанной по настроенной модели и измеренной температур поверхности ручья №5 перед тянущеправильной машиной.

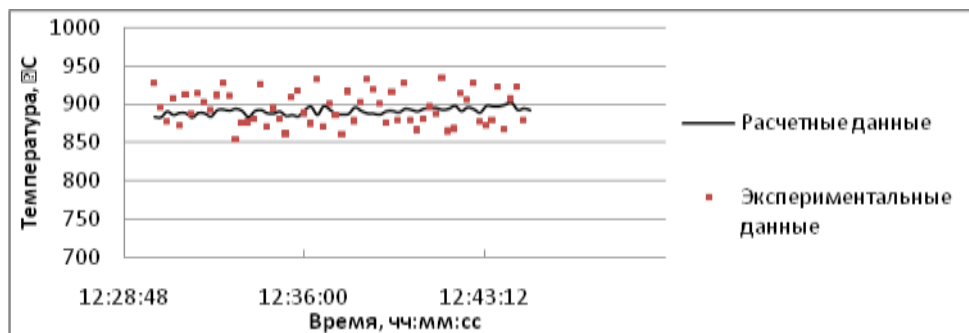


Рис. 7. График изменения температуры поверхности заготовок (ручей №5) перед тянущеправильной машиной

Оценивалась корреляционная зависимость фактической измеренной температуры поверхности и рассчитанной температуры поверхности на различных расстояниях от выхода из секций ЗВО. На рис. 8 представлена такая корреляционная зависимость. Было получено удовлетворительное значение коэффициента корреляции $r = 0,87$. Следовательно, можно говорить об адекватности разработанной модели.

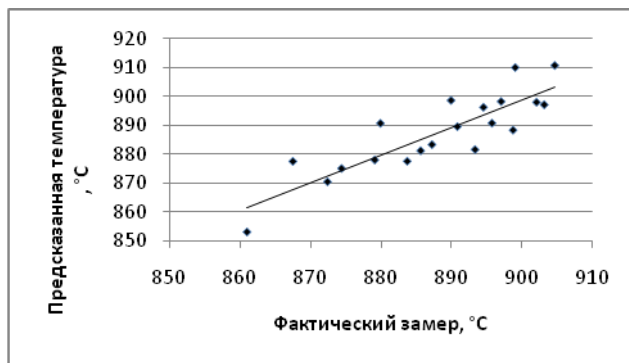


Рис. 8. Корреляционная зависимость между фактической и расчетной температурами (коэффициент корреляции: $r = 0,87$)

Заключение

1. Для того чтобы улучшить качество заготовок, отливаемых на МНЛЗ, снизить трещинообразование, необходимо применять автоматизированные системы управления охлаждением заготовок, построенные по принципу адаптивных систем с динамическими моделями процесса охлаждения заготовок.

2. В работе предложена динамическая модель, описывающая тепловое состояние заготовок, позволяющая оперативно выполнять расчеты температур заготовок по всему объему в реальном масштабе времени с учетом тепловыделения при фазовой и структурной трансформации, теплоотдачи вследствие водяного охлаждения, теплового излучения, естественной и вынужденной конвекции, контакта с роликами. Разработана методика оперативных расчетов на основе метода конечных разностей. Для описания напряженного состояния заготовок использована модель, позволяющая оперативно определять термонапряжения по длине заготовок.

3. Разработана методика настройки модели и методика настройки программного регулятора с использованием специализированных методов, сочетающих методы математического программирования с особенностями технологии обработки металла, позволяющая производить адаптацию системы управления по данным, получаемым с объекта управления в обычном режиме работы.

4. На основании требований, предъявляемых к процессу разливки, разработана методика рационализации теплового режима за счет поддержания заданного изменения среднемассовой температуры заготовок вдоль оси МНЛЗ. Данная методика позволяет получить необходимое температурное поле заготовок на выходе из МНЛЗ и наименьшее значение температурных напряжений в заготовках.

5. Предложена структура адаптивной системы управления охлаждением заготовок на базе разработанных методов настройки модели и настройки программного регулятора, позволяющая достигать необходимого качества заготовок за счет использования динамической модели теплового состояния заготовок и методики рационализации процесса охлаждения.

6. Разработан комплекс программных средств (основная составляющая адаптивной системы управления), который состоит из трех программных продуктов: «Разливка Управление», «Разливка Контроль» и «Разливка PLC». Получено свидетельство об отраслевой регистрации №9271 на разработку «Комплекс средств оптимизации процесса управления охлаждением заготовок МНЛЗ 1.0». Получен акт внедрения программного комплекса в учебный процесс. Данный комплекс позволяет выполнять все действия по настройке модели и программного регулятора, по оптимизации процесса охлаждения заготовок и по управлению процессом охлаждения заготовок.

7. Проведен эксперимент на сортовой МНЛЗ №2 ЭСПЦ ОАО «ММК», и получены экспериментальные данные, которые использовались для настройки динамической модели. Выполнена настройка модели по полученным экспериментальным данным объекта управления по разработанному алгоритму. Произведена настройка программного регулятора с помощью настроенной динамической модели по разработанному алгоритму. Данный эксперимент позволил проанализировать работу системы управления и добиться ее устойчивой работы.

8. Произведено моделирование работы существующей и разработанной системы управления на МНЛЗ №2 ЭСПЦ ОАО «ММК». В результате выявлены преимущества разработанной системы управления, которая, в отличие от существующей, позволяет получать необходимое качество заготовок.

9. Система управления интегрирована в существующую систему управления МНЛЗ в ЭСПЦ ОАО «ММК». Получен акт внедрения системы управления в существующую АСУ ТП МНЛЗ. Система управления предназначена для расчета управляющих воздействий и для использования в качестве исследовательской модели. Разработанную систему управления после проведения настройки модели и функции регулирования также можно использовать на других МНЛЗ. Интеграция системы управления позволяет обеспечить стабильную работу МНЛЗ за счет предупреждения аварийных ситуаций и рациональный режим охлаждения заготовок.

10. Применение разработанной системы управления позволяет достигнуть снижения количества брака заготовок на 3%.

Основные положения диссертации изложены в следующих работах

- В рекомендованных ВАК изданиях:

1. *Батраева, А.Е.* Динамическое управление температурным состоянием заготовок МНЛЗ / А.Е. Батраева, Б.Н. Парсункин, Е.Н. Ишметьев, С.М. Андреев, З.Г. Салихов, А.Ю. Светлов // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2007. – 11. – С 20–25.

2. *Батраева, А.Е.* Самонастраивающаяся система оптимального управления температурным полем заготовок МНЛЗ / А.Е. Батраева, Б.Н. Парсункин, С.М. Андреев // Автоматизация в промышленности. – 2009. – 5. – С. 18–21

- В других статьях:

1. *Батраева, А.Е.* Разработка системы оптимального охлаждения непрерывнолитой заготовки в ЗВО МНЛЗ// Сборник рефератов научно-исследовательских работ аспирантов. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2004. – С. 136–137.

2. *Батраева, А.Е.* Охлаждение тонкой заготовки в зоне вторичного охлаждения с обеспечением температуры на выходе из МНЛЗ 1050-1150°C // Молодежь. Наука. Будущее: Сб. науч. тр. студентов Вып. 3. – Магнитогорск: МГТУ. – 2004. – С. 85–88.

3. *Батраева, А.Е.* Система оптимального охлаждения сортовой заготовки в ЗВО МНЛЗ / Батраева А.Е., Светлов А.Ю. // Автоматизация технологических и производственных процессов в металлургии: Межвузовский сб. науч. тр. – Магнитогорск: МГТУ. – 2004. – С. 151–155.

4. *Батраева, А.Е.* Управление вторичным охлаждением заготовки на МНЛЗ в составе литейно-прокатного агрегата с целью обеспечения заданной температуры / Парсункин Б.Н., Андреев С.М., А.Е. Батраева // Математика. Приложение математики в экономических технических и педагогических исследованиях: Межвузовский сб. науч. тр. – Магнитогорск: МГТУ. – 2004. – С. 109–115.

5. *Батраева, А.Е.* Программное обеспечение для определения зоны перемешивания составов непрерывнолитой стали при смене марок / Батраева А.Е., Парсункин Б.Н., Андреев С.М., Светлов А.Ю. // Новые программные средства для предприятий Урала. Вып. 3: Сб. тр. региональной научно-технической конференции. – Магнитогорск: МГТУ. – 2004. – С. 65–71.

6. *Батраева, А.Е.* Математическое моделирование усадочных напряжений в системе стабилизации качества заготовок МНЛЗ / Батраева А.Е., Парсункин Б.Н., Светлов А.Ю. // Электротехнические системы и комплексы: Межвузовский сб. науч. тр. Вып. 11. – Магнитогорск: МГТУ. – 2005. – С. 109–113.

7. *Батраева, А.Е.* Стабилизация качества заготовок, отливаемых на МНЛЗ / Батраева А.Е., Парсункин Б.Н., Андреев С.М., Светлов А.Ю. // Математика. Приложение математики в экономических технических и педагогических исследованиях. Межвузовский сб. науч. тр. – Магнитогорск: МГТУ. – 2005. – С. 196–200.

8. *Батраева, А.Е.* Энергосбережение и повышение качества на участке МНЛЗ – прокатный стан// Создание и внедрение корпоративных информационных систем (КИС) на промышленных предприятиях Российской Федерации. Вып. 1: Сб. тр. Всероссийской науч.-техн. конф./ Под ред. Д.Х. Девятова. – Магнитогорск: ИПЦ ООО «Проф-Принт». – 2005. – С. 150–153.

9. *Батраева, А.Е.* Самонастраивающаяся система управления охлаждением заготовок МНЛЗ / Батраева А.Е., Парсункин Б.Н. // Сборник рефератов научно-исследовательских работ аспирантов. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ. – 2005. – С. 121–122.

10. *Батраева, А.Е.* Самонастраивающаяся система динамического регулирования температурного состояния непрерывнолитых заготовок // Материалы 64-ой науч. техн. конф. том. 2. – Магнитогорск: МГТУ. – 2006. – С. 141–144.

11. *Батраева, А.Е.* Динамическая оптимизация процесса охлаждения заготовок МНЛЗ / Андреев С.М., Батраева А.Е., Светлов А.Ю. // Автоматизация технологических и производственных процессов в металлургии: Межвузовский сб. науч. тр. / под ред. Парсункина Б.Н. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ». – 2006. – С. 114–118.

12. *Батраева, А.Е.* Комплекс средств оптимизации процесса управления охлаждением заготовок МНЛЗ 1.0 / Батраева А.Е., Парсункин Б.Н., Андреев С.М. // Компьютерные учебные программы и инновации. – 2008 г. – 2. – С. 171.

13. *Батраева, А.Е.* Динамическое управление температурным полем заготовок для получения заданного качества на выходе из МНЛЗ / Парсункин Б.Н., Батраева А.Е. // Материалы 66-ей научно технической конференции: Сб. докл. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ». – 2008. – Т.2. – С.95–97.

14. *Батраева, А.Е.* Комплекс программных средств для оптимизации качества заготовок МНЛЗ // Управление информационной инфраструктурой организации на основе технологии открытых систем: Сб. тр. участников международного научно-практического семинара. – Магнитогорск: МаГУ, 2008. – С. 34–36.

- Патентные документы. Зарегистрированные программы:

1. *Батраева, А.Е.* Комплекс средств оптимизации процесса управления охлаждением заготовок МНЛЗ 1.0 / Батраева А.Е., Парсункин Б.Н., Андреев С.М. // Инновации в науке и образовании. – 2007. – 10 (33). – С.14. Свидетельство ОФАП № 9271, ВНИТИЦ № 5020070227.

