

На правах рукописи



Краснянский Михаил Викторович

**ИССЛЕДОВАНИЕ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО
РЕЖИМА ВНЕПЕЧНОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛИ В КОВШАХ МАЛОЙ
ВМЕСТИМОСТИ**

Специальность 05.16.02 — «Металлургия черных, цветных и редких металлов»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва, 2015 г.

Работа выполнена в отделе прокатных станов ОАО АХК «Всероссийский научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт металлургического машиностроения имени академика А.И. Целикова» (ОАО АХК «ВНИИМЕТМАШ»).

Научный руководитель:

кандидат технических наук, доцент,
заместитель начальника отдела прокатных станов

Кац Яков Львович

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор,
генеральный директор ООО «Институт тепловых
металлургических агрегатов и технологий
«Стальпроект»

Усачев Александр Борисович

кандидат технических наук,
заведующий лабораторией электроплавки
ГНЦ РФ ОАО НПО «ЦНИИТМАШ»

Куликов Анатолий Павлович

Ведущая организация:

Федеральное государственное
унитарное предприятие «Центральный
научно-исследовательский институт
черной металлургии им. И. П.
Бардина», г. Москва.

Защита диссертации состоится 26 марта 2015 г. в 10:00 на заседании диссертационного совета Д 212.132.02 при Национальном исследовательском технологическом университете «МИСиС» по адресу: 119049, Москва, Ленинский проспект, д. 6, ауд. А-305.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Национального исследовательского технологического университета «МИСиС», а также на сайте <http://misis.ru>.

Отзывы на автореферат диссертации (в двух экземплярах, заверенных печатью учреждения) просьба направлять по адресу: 119049, г. Москва, Ленинский проспект, д.4, Ученый совет. Копии отзывов можно присылать на e-mail: misistlp@mail.ru

Автореферат разослан «__» _____ 2015 года

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.132.02,
кандидат технических наук, доцент



А. В. Колтыгин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Еще в 1983 году в своем докладе на заседании Президиума Академии наук СССР директор и основатель ВНИИМЕТМАШ академик А. И. Целиков сформулировал предпосылки создания нового типа металлургического производства – сортового мини-завода малой производительности. Строительство таких заводов должно удовлетворить потребности конкретных регионов, удаленных от крупных производителей, в арматуре, используя в качестве сырья собственный, региональный лом черных металлов. Примером сортового мини-завода малой производительности является введенный в эксплуатацию в 2007 г. ГУП «Литейно-прокатный завод» (ГУП «ЛПЗ») в г. Ярцево Смоленской области, генеральным подрядчиком при строительстве которого выступил ВНИИМЕТМАШ. Завод рассчитан на производство 200 тыс. т сортового проката в год. Однако, в период опытно-промышленной эксплуатации ДСП-30 и АКП-30 на ГУП «ЛПЗ» были выявлены проблемы, затрудняющие выход на расчетную производительность, а именно повышенный удельный расход электроэнергии в ДСП и АКП и ускоренное охлаждение металла в стальковше. Это связано с тем, что на заводе используются сталеразливочные ковши (СК) малой вместимости (30 т). Особенностью таких ковшей в отличие от более крупных агрегатов является их высокая удельная поверхность. Например, удельная поверхность 20-т СК составляет $0,8 \text{ м}^2/\text{т}$, а 250-т – $0,2 \text{ м}^2/\text{т}$. Именно по этой причине тепловые потери металла в ковшах малой вместимости значительно выше, чем в крупных агрегатах, а скорость охлаждения металла в таких ковшах в 1,5-2 раза превышает этот показатель для крупных ковшей.

Агрегаты малой вместимости до последнего времени использовались на предприятиях, специализирующихся на выплавке специальных, инструментальных и коррозионностойких марок сталей, например, заводы «Ижсталь» (ДСП вместимостью 40 т) и «Электросталь» (ДСП вместимостью 20 т), где технология выплавки и внепечной обработки заметно отличается от комбинатов и заводов, производящих рядовые марки стали. ГУП «ЛПЗ» один из немногих в стране сортовых заводов, где используются агрегаты малой вместимости совместно с МНЛЗ. Однако, так как идеология, по которой он построен, набирает популярность, разработка новых, рациональных энерготехнологических режимов выплавки и внепечной обработки, специально для агрегатов малой вместимости, является актуальной задачей.

Цель работы: исследование влияния конструктивных и технологических параметров внепечной обработки на тепловые потери металла во время внепечной

обработки и разработка энергосберегающего теплового режима обработки металла в сталковшах малой вместимости.

Задачи работы:

1. Разработка энерго- и ресурсосберегающего энергетического режима внепечной обработки в ковшах малой вместимости, включающего в себя рациональный цикл эксплуатации сталковшей.

2. Разработка комплексной тепловой модели сталковша, учитывающей весь цикл его эксплуатации, включая подогрев футеровки ковшей разными способами. Проведение лабораторных и промышленных экспериментов для идентификации и верификации модели.

3. Исследование с помощью разработанной модели влияния различных параметров внепечной обработки, таких как начальная температура металла и футеровки, количество добавок, наличие крышки, толщина слоя шлака и т.д., на тепловые потери металла в ковшах малой вместимости.

4. Определение технологической и экономической эффективности электрического подогрева футеровки и его сравнение с газовым нагревом.

Научная новизна работы:

1. Определена эффективная степень черноты периклазоуглеродистых огнеупоров, применяемых в рабочем слое футеровки сталковша на большинстве металлургических предприятий, составляющая от 0,74 до 0,91 в зависимости от температуры и состояния поверхности.

2. С использованием математической модели установлено влияние конструкции футеровки ковшей малой вместимости (до 50 т) и технологических режимов внепечной обработки на потери тепла металлом.

3. Теоретически описан и исследован процесс подогрева футеровки сталковшей электрическими нагревателями и доказана возможность разогрева футеровки ковшей до 1400 °С. Получена теоретическая зависимость тепловых потерь металла в ковше вместимостью до 50 т от начальной температуры его футеровки.

4. Разработана детерминированная математическая модель охлаждения металла в сталковше во время выпуска и выдержки, которая обладает высокой точностью (± 10 °С) и, в отличие от аналогов, учитывает начальное тепловое состояние футеровки ковша, а также потери струей металла при выпуске.

Практическая значимость результатов работы:

1. Применение ряда рекомендаций, разработанных по результатам настоящего исследования в ЭСПЦ ГУП «ЛПЗ» позволило снизить средний удельный расход

электроэнергии на агрегате ковш-печь с 66 до 60 кВт·ч/т стали, что эквивалентно 3 млн. руб. в год.

2. Результаты исследования использованы для определения мощности тиристорного источника питания установки электрического нагрева «УЭНК-20» для завода «Электросталь», г. Электросталь.

3. Показано, что регулирование окислительного потенциала атмосферы во время сушки периклазоуглеродистой футеровки электрическими нагревателями позволяет уменьшить выгорание углерода из огнеупоров. Разработан энерго- и ресурсосберегающий режим сушки и подогрева периклазоуглеродистой футеровки стальной электростали электрическими нагревателями, позволяющий повысить ее стойкость на 15-20 % (заявка на патент № 2014116659 от 25.04.2014).

4. Разработанный алгоритм и математическое описание процесса охлаждения металла в ковше могут быть использованы в АСУ ТП плавки для расчета оптимальной температуры металла на выпуске из ДСП.

Апробация результатов работы. Основные положения данного исследования докладывались и обсуждались на XII Международном конгрессе сталеплавателей (г. Выкса, 22–26 октября 2012 г.), XIII Международном конгрессе сталеплавателей (г. Полевской, 12–18 октября 2014 г.), VI Международной конференции «Металлургия-ИНТЕХЭКО-2013» (г. Москва, 26-27 марта 2013 г.), VII Международном форуме «Энергосберегающие технологии в промышленности. Печные агрегаты. Экология» (г. Москва, НИТУ «МИСИС», 15-17 октября 2014 г.). По результатам работы опубликовано 9 печатных работ в научно-технических журналах и сборниках трудов, 3 из которых в журналах, рекомендованных ВАК.

Достоверность результатов подтверждается применением современных методов и методик исследования, достаточной сходимостью лабораторных и промышленных экспериментов (расхождение менее 10 %) с расчетными данными; адекватностью математических моделей.

Структура диссертационной работы: работа состоит из введения, 5 глав, заключения, списка использованных источников из 93 наименований. Диссертация изложена на 130 стр. машинописного текста, содержит 28 табл., 65 рис. и 3 приложения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** показана актуальность исследуемых проблем, представлены цель и задачи работы, ее научная новизна и практическая значимость, а также сведения об апробации результатов работы.

В **первой главе** приведен обзор литературы по тематике исследования. Показано, что скорость охлаждения стали в ковше зависит от его вместимости, т.к. с уменьшением вместимости растет удельная теплоотдающая поверхность металла. По этой причине в ковшах малой вместимости металл охлаждается быстрее и необходимы дополнительные меры для утепления таких ковшей. Показано, что жидкая сталь остывает в ковше в основном из-за нестационарной теплопроводности через футеровку ковша и излучения через верх ковша, поэтому подогрев футеровки ковшей и использование теплоизоляционных крышек – основные способы снижения тепловых потерь. Анализ массива плавов показал, что при уменьшении температуры металла на выпуске (благодаря снижению тепловых потерь металла в ковше) экономится электрическая и тепловая энергия, вводимая в печь, уменьшается длительность плавки под током. Кроме того, при снижении температуры выпуска уменьшается угар металла, его окисленность, что приводит к повышению выхода годного и усвоению ферросплавов (рис. 1).

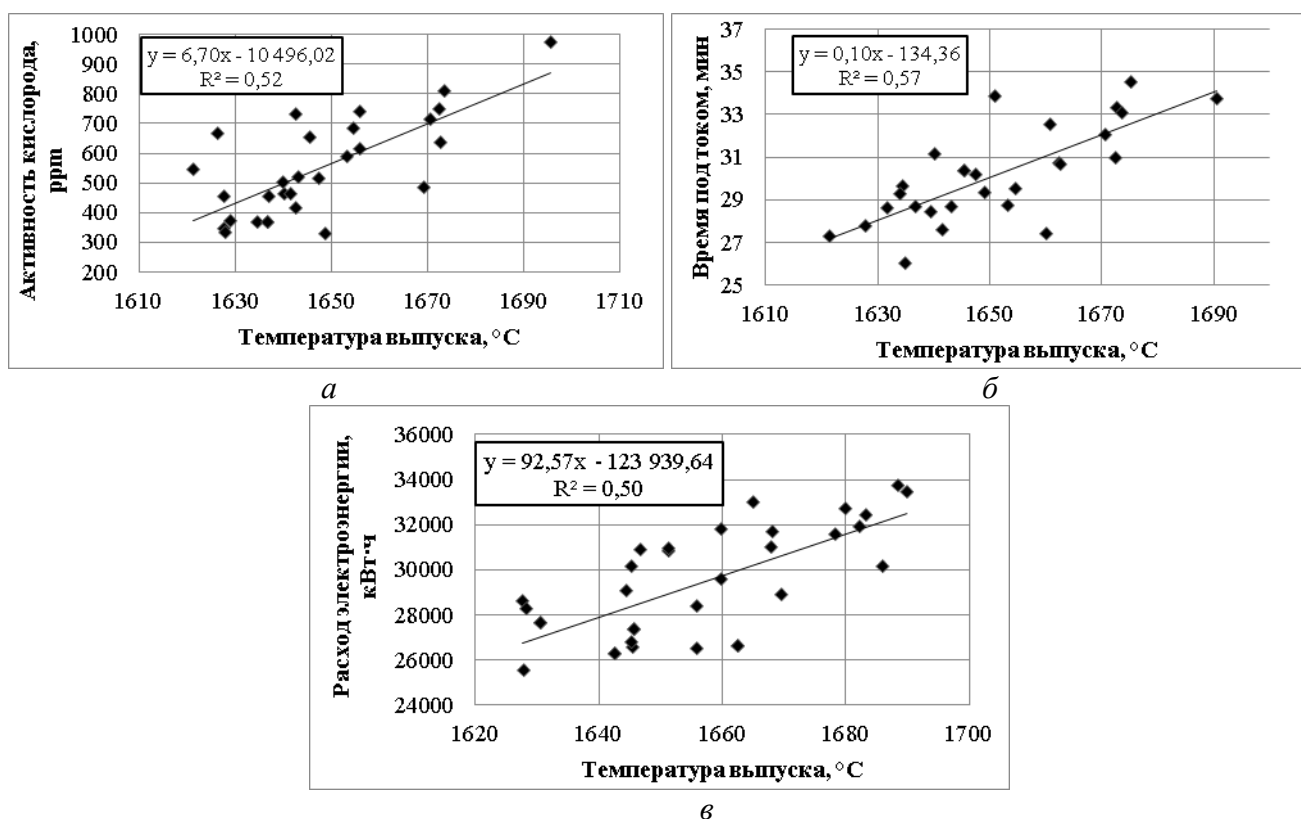


Рис. 1 – Зависимости активности кислорода (а), длительности плавки под током (б) и расхода электроэнергии (в) от температуры металла на выпуске из ДСП

Представлен аналитический обзор современных способов подогрева футеровки ковшей. Перспективным направлением подогрева ковшей является использование электрических нагревателей. Такие нагреватели, изготовленные из карбида кремния, по данным изготовителей способны быстро нагревать футеровку ковша до температуры 1200-1400 °С. Однако исследований, доказывающих эти цифры, ни в отечественной, ни в зарубежной литературе найдено не было. Таким образом, подробное изучение новых способов подогрева, расчет их технологической и экономической эффективности является актуальной задачей.

Для изучения тепловых процессов, происходящих в ковше во время внепечной обработки, широко используется математическое моделирование. В результате критического анализа работ, представленных в отечественной и зарубежной литературе, было выявлено, что простые термодинамические и статистические модели используются для моделирования в реальном времени, например, для прогнозирования температуры стали перед разливкой. Для подробного изучения тепловых процессов, происходящих в ковше во время внепечной обработки и учета влияния различных факторов технологии на эти процессы используются модели, основанные на вычислительной гидродинамике (CFD). Несмотря на то, что начальное тепловое состояние ковша оказывает сильное влияние на охлаждение металла, в большинстве моделей не учитывается футеровка ковша или учитывается с допущениями, снижающими точность моделирования. В связи с этим разработка модели, учитывающей весь цикл работы ковша, включая его охлаждение во время межплавочного простоя, а также подогрев различными способами, с целью совершенствования теплового режима работы стальной ковшевой малой вместимости является актуальной задачей.

Во **второй главе** описана разработанная комплексная математическая CFD-модель тепловой работы 30-т стальной ковшевой ГУП «ЛПЗ», а также представлены результаты лабораторных и промышленных экспериментов для идентификации и верификации модели.

Комплексная модель включает в себя субмодели охлаждения пустого ковша, подогрева ковша как газовыми горелками, так и электронагревателями и субмодель охлаждения металла в ковше. Модель основана на законах сохранения массы, импульса и энергии, входящих в систему дифференциальных уравнений Навье-Стокса, описывающую движение и теплообмен текучей среды. Для описания турбулентности использованы уравнения переноса кинетической энергии турбулентности и ее диссипации в рамках стандартной k - ϵ модели. Теплопередача в твердых телах

моделируется с помощью дифференциального уравнения Фурье. Конвективный теплообмен между поверхностью твердых тел и текучей жидкостью рассчитывается по уравнению Ньютона-Рихмана, причем коэффициент конвективной теплоотдачи α высчитывалась при моделировании пограничного слоя потока текучей среды. Радиационный теплообмен между поверхностями моделировался в соответствии с законом Стефана-Больцмана. Указанные уравнения дополнялись начальными и граничными условиями: на внешней поверхности кожуха ковша учитывались конвективные и радиационные граничные условия 3-го рода; на внутренней поверхности футеровки ковша также было принято граничное условие 3-го рода с учетом конвекции и излучения при пустом ковше и только конвекции при заполненном металлом. В субмодели подогрева ковша горение подробно не моделировалось, вместо этого температура внешней части факела или нагревателей бралась в качестве граничного условия. В субмодели охлаждения металла в ковше не учитывались тепловые потери струи металла во время выпуска и за счет легирования.

С помощью программного пакета расчетная область модели разбивалась на ячейки и основные уравнения, учитывая начальные и граничные условия, решались методом конечных объемов.

При разработке модели было обнаружено, что в литературе отсутствуют данные о значениях коэффициента черноты современных огнеупорных материалов, используемых при футеровке сталеразливочных ковшей, в частности для периклазоуглеродистых (ПУ) формованных изделий. В литературе представлены коэффициенты черноты периклазовых огнеупоров, значение которых при рабочих температурах составляет около 0,5. ПУ изделия покрыты сажей и имеют более высокую пористость после выгорания органической связки, а значит их степень черноты должна быть значительно выше, чем у периклазовых изделий. Поэтому были проведены прямые измерения степени черноты ПУ футеровки сталеразливочных ковшей в интервале температур от 500 до 900 °С. Так как значение степени черноты футеровки зависит от состояния ее поверхности, использовали два образца: образец нового ПУ кирпича типа МС90/10 (массовая доля MgO н.м. 82%; C н.м. 10%) и образец уже отработанного, ошлакованного кирпича. Масса каждого образца составляла около 200 г (рис. 2).

Для нагрева образцов использовалась промышленная муфельная печь СНОЛ 120/12 И1. Для измерения температуры применяли встроенную в печь термопару типа ТПР-6/30 и инфракрасный пирометр «Кельвин-Компакт 1200».

Степень черноты определяли по формуле:

$$\varepsilon = \frac{T_p^4}{T^4} \quad (1)$$

где T , T_p – термодинамическая и радиационная температуры, К, соответственно.

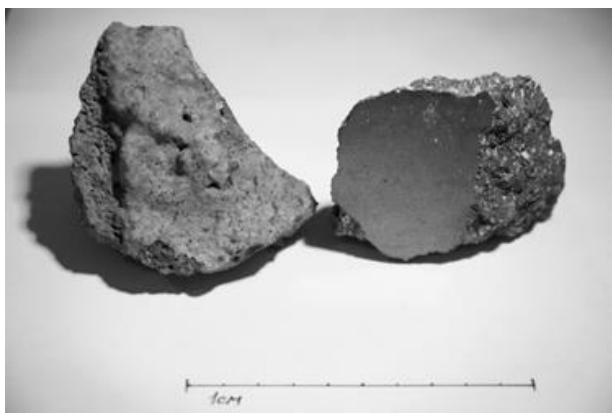


Рис. 2 – Образцы огнеупоров: ошлакованного (слева) и нового (справа)

Полученные зависимости степени черноты огнеупоров от температуры приведены на рис. 3. Видно, что степень черноты огнеупора, покрытого слоем шлака, заметно выше, чем степень черноты нового кирпича. Это можно объяснить повышенной пористостью отработанного огнеупора, а также наличием слоя шлака. Таким образом, применение полученных в настоящей работе значений степени черноты ПУ футеровки позволяет значительно повысить точность расчетов радиационного теплообмена и измерения температуры такой футеровки по сравнению с использованием данных по периклазовым огнеупорам. Например, абсолютная погрешность измерения при температуре футеровки, равной 900 °С снижается с ± 131 до ± 32 °С.

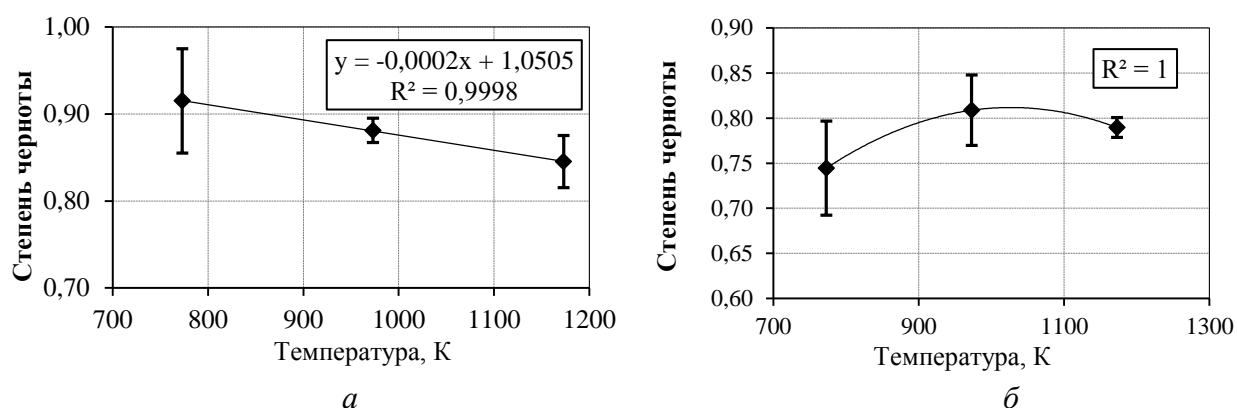


Рис. 3 – Зависимость степени черноты ошлакованного (а) и нового (б) огнеупоров от температуры

Верификация и идентификация модели осуществлялись по результатам промышленных измерений на ГУП «ЛПЗ» и на заводе «Электросталь». Как уже было отмечено, в модели охлаждения стали в ковше не учитываются тепловые потери струи

металла на выпуске и потери за счет добавки в ковш легирующих материалов и раскислителей. Чтобы оценить эти потери на ГУП «ЛПЗ» проводились измерения температуры металла в ковше сразу после выпуска из ДСП. Замеры проводились непосредственно после выпуска полупродукта из ДСП, с выдвижной платформы. Т. к. заводские средства измерения в этом месте применить невозможно из-за их ограниченного радиуса действия, использовался измерительный прибор «Сталь-4» с термопреобразователем ТПР-91. В табл. 1 приведены результаты этих измерений. Т.к. на плавках 131718 и 131719 в ковш помимо ферросплавов было дополнительно добавлено 60 и 85 кг извести соответственно, что по расчетам дополнительно снизило температуру на 5-7 °С, то в целом видно, что на выпуске теряется около 35-38 °С вне зависимости (или с минимальной зависимостью) от начальной температуры футеровки. Полученные результаты помогли скорректировать начальную температуру металла для модели.

Табл. 1 – Результаты замеров температуры (°С) после выпуска

№ плавки	Т на выпуске из ДСП	Т футеровки	Т после выпуска		ΔТ
131716	1637	750-800	1602	-	35
131717	1650	800-850	1612	-	38
131718	1647	750-800	1601	1601	46
131719	1715	1000-1050	1666	1666	49
131721	1663	900-950	1626	-	37

Для проверки адекватности субмодели охлаждения пустого ковша были проведены измерения температуры футеровки ковша после разливки с помощью пирометра «Кельвин-Компакт 1200». Экспериментальные точки были нанесены на расчетный график охлаждения ковша, полученный с помощью модели (рис. 4). Видно, что экспериментальные точки хорошо согласуются с расчетной кривой охлаждения, что подтверждается высоким коэффициентом детерминации R^2 .

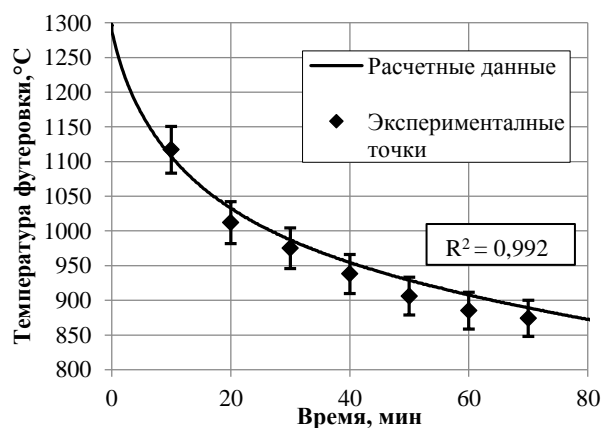


Рис. 4 – Охлаждение горячей стенки футеровки ковша после разливки

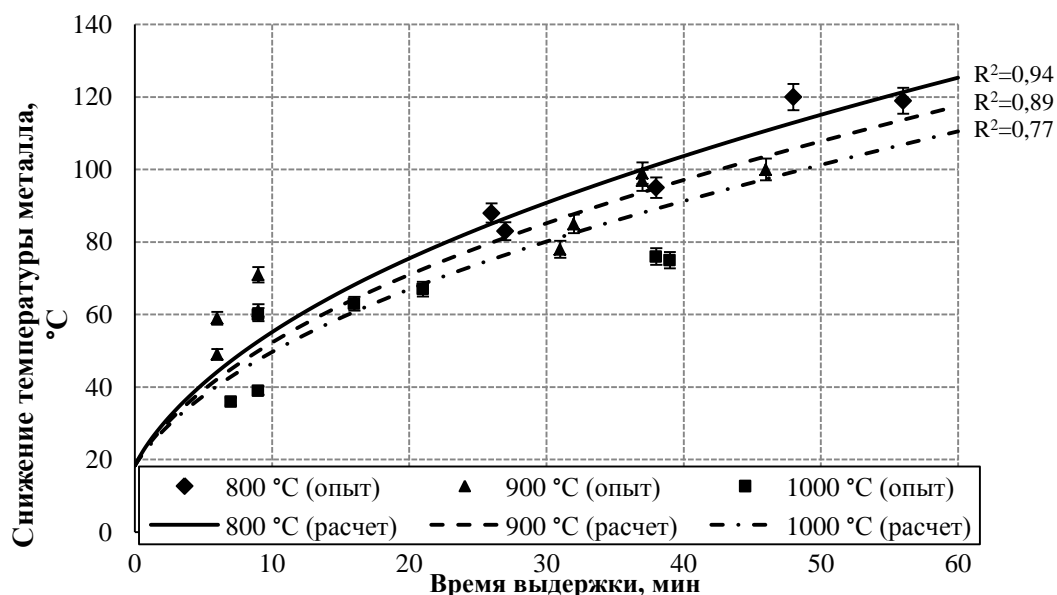


Рис. 5 – Сравнение расчетных и экспериментальных данных для трех различных температур футеровки

Адекватность субмодели охлаждения металла в ковше во время выдержки перед обработкой на АКП проверяли по результатам серии измерений температуры металла на «ЛПЗ». Температура замерялась в ДСП непосредственно перед выпуском и сразу после установки ковша под крышку АКП. Также с помощью пирометра замерялась средняя температура футеровки ковша перед выпуском. Измерения были проведены на 22 плавках. Затем при помощи субмодели были рассчитаны кривые охлаждения металла в ковше при различных начальных температурах футеровки (рис. 5). Все результаты имеют коэффициенты детерминации R^2 , превышающие 0,7, что доказывает хорошую сходимость экспериментальных и расчетных данных.

Верификация комплексной модели показала, что она обладает удовлетворительной точностью и может быть использована для дальнейших исследований.

В третьей главе описаны проведенные исследования влияния конструктивных параметров ковша и технологических параметров внепечной обработки на тепловые потери металла в ковше. На первом этапе было проведено моделирование охлаждения стали в ковше во время выдержки при различной температуре металла на выпуске с целью определения ее влияния на скорость охлаждения. Получены следующие результаты: при 1615 °C падение температуры при часовой выдержке в ковше составляет 88,04 °C, при 1650 °C – 94,49 °C, а при 1700 °C – 102,75 °C. При этом, для 160-т ковша разница в снижении температуры при 1700 °C и при 1640 °C составила всего 3 °C, в то время как в настоящей работе – около 10 °C. На основании этих данных

можно сделать вывод, что в ковшах малой вместимости перегрев металла приводит к значительным тепловым потерям.

На следующем этапе определялось влияние толщины рабочей футеровки на тепловые потери металла в ковше. На ГУП «ЛПЗ» для рабочего слоя футеровки стальковшей используется периклазоуглеродистые (ПУ) изделия. По данным, полученным на заводе критерием вывода ковша из оборота является остаточная толщина рабочего слоя, минимальная величина которой должна быть не менее 50-60 мм. Исходя из этого, толщина рабочего слоя была разделена на максимальную (180 мм), среднюю (120 мм) и минимальную (60 мм). При максимальной и средней толщине футеровки рабочего слоя тепловые потери металла оказались практически равны (95 и 98 °С/ч соответственно). В то же время, при минимальной толщине рабочих огнеупоров потери заметно увеличиваются и составляют уже 107 °С/ч. Это можно объяснить тем, что в средней ситуации повышение тепловых потерь теплопроводностью из-за уменьшения толщины футеровки нивелируются снижением потерь на повышение ее теплосодержания. При дальнейшем снижении толщины футеровки потери теплопроводностью начинают преобладать и поэтому скорость охлаждения стали увеличивается. По результатам моделирования можно сделать вывод, что толщина рабочего слоя футеровки стальковша начинает заметно влиять на скорость охлаждения металла в нем только при снижении до критических значений 50-75 мм.

Табл. 2 – Теплофизические свойства огнеупорных материалов

Тип огнеупора	Теплопроводность, Вт/(м·К)	Теплоемкость, Дж/(кг·К)	Плотность, кг/м ³	Стойкость, пл.
Периклазоуглерод	5,5-9,5	1300	2900-3100	81,8
Доломит	2,8-4,0	1030	2860	71,2
Высокоглиноземистый бетон	2,11-3,2	1100	3050	100

Таким образом, было предположено, что на тепловые потери металла в ковше сильнее влияют теплофизические свойства огнеупоров, а именно теплопроводность и теплоемкость, чем их толщина. Поэтому было смоделировано охлаждение стали в ковше, футерованным доломитовыми кирпичами, а также высокоглиноземистым огнеупорным бетоном имеющими более низкие показатели теплопроводности и теплоемкости, чем периклазоуглеродистые, при примерно равной или даже повышенной стойкости (табл. 2). Как и предполагалось, тепловые потери металла в ковше при использовании доломитовых огнеупоров и высокоглиноземистого бетона снизились на 15 и 20 % соответственно, по сравнению с ПУ футеровкой. Таким

образом, замена ПУ огнеупоров на более эффективную с теплофизической точки зрения футеровку даст возможность экономить до 6 кВт·ч электроэнергии на тонну стали без повышения удельных затрат на огнеупорные материалы.

Также исследовалось влияние толщины теплоизоляционного слоя футеровки. Предполагалось, что увеличение его толщины позволит уменьшить тепловые потери металла в ковше, а также снизить температуру кожуха. Однако, моделирование показало, что при увеличении толщины изоляционного слоя в два раза, с 10 до 20 мм, температурные потери стали в ковше при часовой выдержке уменьшились только на 3 °С. Таким образом, влияние увеличения теплоизоляционного слоя на тепловые потери металла в ковше можно считать незначительным по сравнению с общими потерями. Тем не менее, максимальная температура кожуха при утеплении футеровки ковша снижается с 310 до 250 °С что должно увеличить срок эксплуатации стальной и снизить риск прогара кожуха.

На следующем этапе проводилось сравнение тепловых потерь металла при различной толщине наведенного покровного шлака и наличия теплоизоляционной крышки с целью определения оптимального варианта. Покровный шлак моделировался с начальной температурой, равной 25 °С и толщиной 25, 50 и 80 мм.

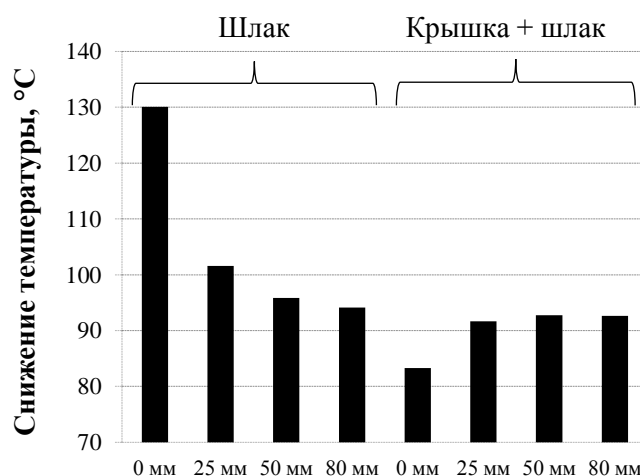


Рис. 6 – Температурные потери металла в ковше во время выдержки в зависимости от толщины наведенного шлака и наличия теплоизоляционной крышки

По гистограмме на рис. 6 видно, что применение покровного шлака снижает тепловые потери по сравнению с ковшом без шлака на ~25 %. При этом моделирование показало, что увеличение толщины покровного шлака выше 50 мм слабо влияет на тепловые потери металла. Меньше всего тепла потерял металл в ковше, накрытом теплоизоляционной крышкой. Падение температуры в таком ковше после часовой выдержки на 10-25 °С меньше, чем в ковше с покровным шлаком и почти на 60 °С меньше, чем в ковше без шлака. Расчеты показали, что оптимальным вариантом

является использование покровного шлака толщиной не больше 25-50 мм совместно с теплоизоляционной крышкой. Применение этого варианта позволяет экономить до 15 кВт·ч электроэнергии на тонну стали, при этом обеспечивая необходимое количество и основность шлака для десульфурации.

Показано, что длительность межплавочного простоя ковшей значительно влияет на тепловые потери металла в ковше. На ГУП «ЛПЗ» используются схемы с 3-мя и 4-мя ковшами в обороте, длительность межплавочного простоя при этом составляет от 30 до 60 минут и от 90 до 120 минут соответственно. При 4-х ковшах в работе на предварительный подогрев футеровки ковша отводится в среднем 30-40 минут, в то время как при 3-х ковшовой схеме подогрев исключен из-за недостатка времени.

Средняя расчетная температура горячей стенки ковша после подготовки при 4-х ковшовой схеме (45 мин) составляет 940 °С. После подогрева (60 мин) средняя температура стенки поднимается до 1140 °С. При 3-х ковшовой схеме горячая стенка футеровки за время подготовки (30 мин) остывает в среднем до 980 °С. Однако, хотя горячая стенка футеровки ковша, который не подогревался, а сразу ставился под выпуск и имела самую низкую температуру, металл в таком ковше после часовой выдержки имел практически ту же температуру (1565 °С), что и металл в подогретом ковше (1563 °С), горячая стенка футеровки которого была на 160 °С выше. Это объясняется тем, что при простое ковша успевает остыть только небольшой слой рабочей футеровки, в то время как внутренняя часть остается достаточно прогретой. Таким образом, по результатам расчетов можно сделать вывод, что 3-х ковшовой схеме работы (без подогрева футеровки) выгоднее, чем схема с 4 ковшами в обороте (с подогревом футеровки), т.к. затраты на подогрев не окупаются снижением тепловых потерь металла.

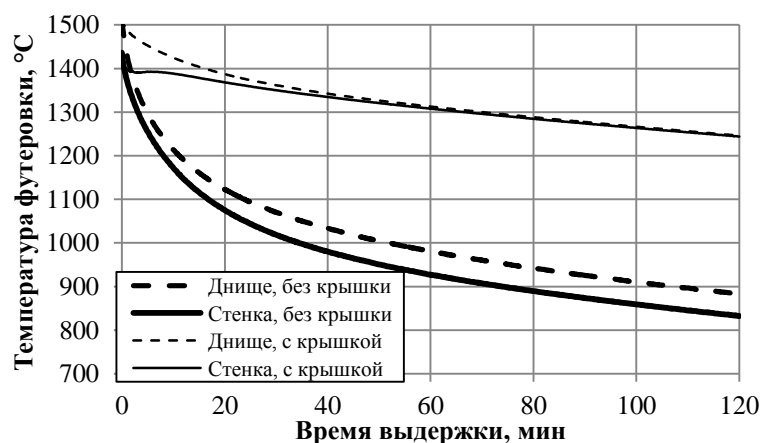


Рис. 7 – Температура внутренней поверхности футеровки в зависимости от наличия теплоизоляционной крышки

Для снижения тепловых потерь футеровки пустых стальной ковшей в течение простоя их целесообразно накрывать теплоизоляционными крышками. На рис. 7 приведен расчетный график изменения средней температуры горячей стенки футеровки стенки и днища при наличии и отсутствии крышки. Видно, что без крышки горячая стенка футеровки остывает гораздо быстрее, что объясняется высоким радиационными тепловыми потерями в окружающую среду, в то время как при наличии крышки теплообмен с окружающей средой заменяется на теплообмен с крышкой и ограниченным ею объемом воздуха. При средней выдержке металла в ковше, равной 30-40 мин использование крышки позволяет сохранить около 20 °С, что эквивалентно 6 кВт·ч/т стали или 15 руб./т.

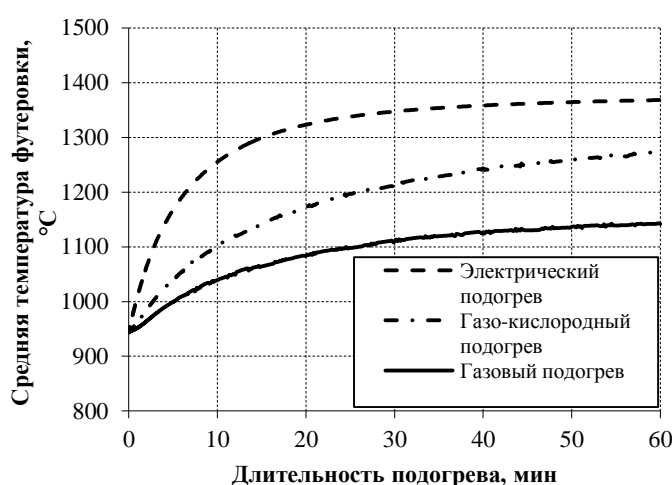


Рис. 8 – Изменение средней температуры внутренней стенки футеровки ковша при различных способах подогрева

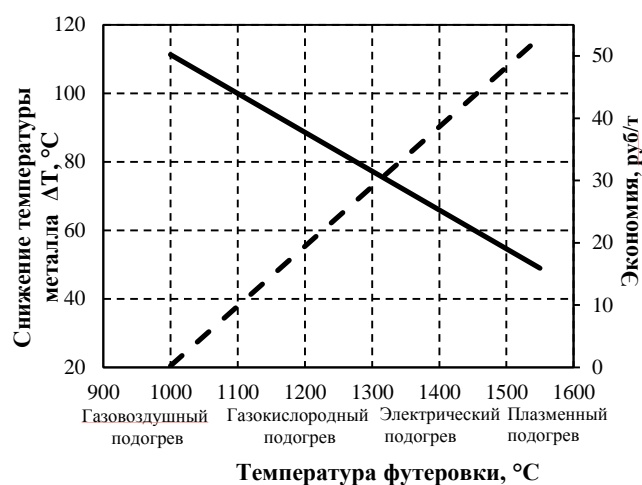


Рис. 9 – Температурные потери металла в 30-тонном ковше (сплошная линия) и удельная экономия (пунктирная линия)

Была поставлена задача сравнить топливно-воздушный подогрев ковшей с альтернативными способами нагрева: топливно-кислородными горелками (ТКГ) и электрическими нагревателями для определения эффективности внедрения новой технологии подогрева ковшей на ГУП «ЛПЗ». С помощью комплексной модели был симитирован подогрев футеровки топливно-воздушной горелкой, ТКГ и электронагревателями (рис. 8). Видно, что при электрическом подогреве средняя температура горячей стенки футеровки уже через 10 минут подогрева достигает необходимых 1200 °С, а через 30 минут – 1350 °С и в дальнейшем увеличивается незначительно. Благодаря высокой степени черноты карбида кремния передача энергии при таком нагреве происходит гораздо быстрее и эффективнее, чем у горелок. Газокислородная горелка, согласно модели, за полчаса способна подогреть футеровку до необходимых 1200 °С, а при часовом подогреве – еще на 70 °С. Благодаря использованию кислорода в качестве окислителя в таких горелках, уменьшается

количество дымовых газов, повышается КПД нагрева. Полученные данные сопоставимы с результатами, представленными производителями этих горелок. Также моделирование показало, что с помощью газовой горелки нельзя подогреть футеровку ковша до необходимой температуры 1200 °С даже за 60 минут. Эти результаты хорошо согласуются с производственными данными, полученными на ГУП «ЛПЗ», где после 40-60-минутного подогрева оборотного ковша температура его футеровки не превышает 1100 °С.

С помощью комплексной модели был произведен расчет тепловых потерь металла во время часовой выдержки в 30-тонном стальковше ГУП «ЛПЗ» в зависимости от максимальной температуры подогрева его футеровки (рис. 9). Видно, что зависимость между температурой футеровки и температурными потерями металла практически линейная. Таким образом, повышение температуры футеровки на каждые 100 °С позволяет снизить температуру выпуска металла из ДСП на ~11 °С, что эквивалентно экономии 4 кВт·ч электроэнергии на 1 т жидкой стали или 10 руб./т.

Табл. 3 – Результаты расчета экономической эффективности различных видов подогрева футеровки в условиях ГУП «ЛПЗ»

		Электронагреватели	Топливо-воздушная горелка	Топливо-кислородная горелка
Энергоноситель		Электроэнергия, кВт·ч	Природный газ, м ³	Природный газ/кислород, м ³
Цена, руб./ед.		2,5	3,8	3,8
Расход энергоносителя	ед.	190	100	50/100
	руб.	475	380	440
Снижение температуры выпуска из ДСП, °С		18	4	9
Снижение затрат эл. эн. в ДСП (с учетом КПД*)	кВт·ч	194,8	43,3	97,4
	руб.	487	108,2	243,5
Сальдо, руб.		12	-271,8	-196,5

Примечание: КПД ДСП-30 равен 0,69

Для определения целесообразности использования альтернативных способов нагрева ковшей на ГУП «ЛПЗ» вместо установок газового нагрева был проведен полный расчет энергетических затрат на нагрев ковша разными способами (табл. 3). Учитывались как прямые энергетические затраты на подогрев ковшей, так и экономия от снижения тепловых потерь металла в ковше.

Расчет показал, что при нынешних ценах на энергоносители электрический подогрев эффективнее топливно-воздушного с экономической точки зрения даже несмотря на более высокие прямые затраты на электроэнергию. Газокислородный нагрев также менее эффективен, чем электрический, т. к. затрачивает большое количество технического кислорода.

На основании проведенных исследований и экспериментов предложены рекомендации по оптимизации энергетического режима внепечной обработки на ГУП «ЛПЗ», использование которых может привести к снижению энергозатрат и повышению производительности ЭСПЦ.

Применение ряда рекомендаций на ГУП ЛПЗ позволило снизить удельный расход электроэнергии на АКП с 66 до 61 кВт·ч/т стали, что эквивалентно 3 млн. руб в год. Косвенную выгоду от увеличения производительности цеха, повышения выхода годного и т.д. также сложно переоценить.

В главе 4 разработан энерго- и ресурсосберегающий способ сушки футеровки ковшей с помощью электронагревателей. Известно, что при сушке и подогреве широко распространенных для футеровки стальной ПУ огнеупоров в окислительной атмосфере дымовых газов и воздуха углерод из поверхностных слоев окисляется, что значительно снижает их износостойкость. Кроме того, обжиг ПУ огнеупоров связан с выделением сажи на поверхности нагревателей, что может привести к их поломке. Новый способ сушки (рис. 10) заключается в 4-5-часовом обжиге футеровки при 550-600 °С в слабоокислительной атмосфере для окисления сажи, достигаемой подачей в ковш воздуха и последующем форсированном разогреве футеровки до рабочих температур в нейтральной атмосфере, достигаемой путем ввода внутрь ковша инертного газа, например, азота или аргона.

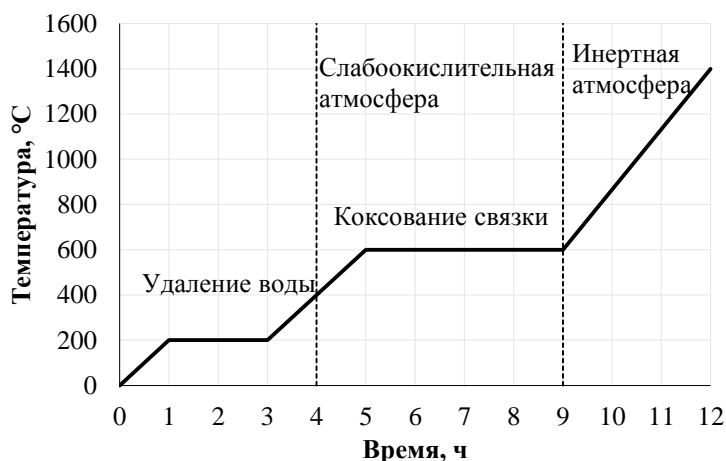


Рис. 10 – Режим сушки и подогрева новой футеровки стальной электрическими нагревателями

Для расчетов расхода воздуха на окисление сажи была предложена полуэмпирическая формула (2).

$$Q_{\text{возд}} = k \cdot M_k / \tau_{\text{сушки}}, \text{ м}^3/\text{ч}, \quad (2)$$

где k – эмпирический коэффициент, равный 47,6; M_k – вместимость ковша, т; $\tau_{\text{сушки}}$ – продолжительность сушки, ч.

Количество аргона для создания защитной атмосферы высчитывается из эмпирического уравнения (3).

$$Q_{\text{арг}} = (0,5 \dots 0,6) \cdot M_k, \text{ м}^3/\text{ч}. \quad (3)$$

Табл. 4 – Результаты моделирования сушки и подогрева стальковшей по действующему и новому режиму

Показатель	Сушка и подогрев газовой горелкой	Сушка и подогрев электрическими нагревателями
Длительность, ч	24	12
Конечная температура, °С	1070	1370
Температура на границе рабочего и арматурного слоев, °С	914	964
Температура кожуха, °С	250	263
Расчетное количество энергоносителя	2400 м ³	3040 кВт·ч
Затраты на сушку и подогрев, руб.	9120	7600
Расход аргона, м ³	0	18
Падение температуры металла в ковше после часовой выдержки, °С	97	70

В табл. 4 приведены результаты модельного расчета нагрева футеровки ковша, проведенного по предложенному режиму. За время выдержки при 600 °С температура на границе рабочего и арматурного слоев футеровки достигает 550 °С, т.е. рабочий слой успевает равномерно прогреться, а значит процесс коксования проходит по всему объему огнеупоров. Также видно, что к концу разогрева температура горячей стенки близка к заданному значению 1400 °С. В то же время температура на границе рабочего и арматурного слоев составляет около 1000 °С, что говорит о достаточной прогретости рабочего слоя футеровки даже несмотря на высокую скорость разогрева на последней стадии (~250 °С/ч). При этом максимальная температура кожуха не превышает 270 °С. Следовательно, можно сделать вывод о пригодности данного режима для подготовки новых ковшей к работе. Для сравнения проводился модельный расчет сушки ковша газовой горелкой по режиму, применяемому на заводе в настоящее время (табл. 4). Видно, что даже за 24-часовой цикл сушки и нагрева футеровка ковша не успевает

прогреться до заданных 1200 °С. Тем не менее, благодаря большой продолжительности этого режима, рабочий слой футеровки прогрет практически до стационарного состояния, о чем говорит высокая температура на границе рабочего и арматурного слоев (914 °С). Однако, длительная выдержка при температуре ~1000 °С приведет к значительному окислению углерода из поверхностного слоя огнеупоров.

Если сравнивать расход энергоносителей, то становится очевидно, что новый режим снижает общие затраты на подготовку ковша благодаря уменьшению длительности подогрева футеровки. Также, значительно снижается скорость охлаждения стали в новом ковше, а значит нет необходимости перегревать первые плавки в нем. При средней длительности выдержки на ГУП «ЛПЗ», равной 40 мин, это позволит снизить расход электроэнергии в ДСП на ~10 кВт·ч/т. Кроме того, применение нового режима сушки в защитной атмосфере приведет к увеличению стойкости футеровки на 10-15 %, что при средней цене ПУ огнеупоров, равной 30 000 руб./т эквивалентно 4500 руб./т.

В целом, ожидаемая выгода от применения нового режима сушки за счет увеличения стойкости футеровки, снижения длительности подготовки нового ковша и повышения температуры его футеровки составляет ~1 млн руб./год. На предложенный режим сушки и подогрева углеродсодержащей футеровки подана заявка на патент на изобретение от 25.04.2014 № 2014116659.

В главе 5 разработаны прогнозные модели охлаждения металла и усвоения легирующих. Модель охлаждения металла в ковше рассчитывает снижение температуры жидкой стали от выпуска из ДСП до установки ковша на стенд АКП, учитывая все тепловые потери за этот период: потери тепла струей жидкого металла при сливе в ковш; потери тепла, аккумулированного футеровкой ковша; потери тепла конвекцией и излучением от кожуха ковша; потери тепла излучением с зеркала металла в ковше, покрытого шлаком; потери тепла при легировании.

При сливе металла в ковш через эркерное выпускное отверстие струя металла теряет тепло излучением по закону Стефана-Больцмана, причем открытая часть струи обменивается теплом с окружающей средой, а закрытая – с нагретой футеровкой ковша. Таким образом, выражения для определения потерь тепла открытой и закрытой частью струи можно описать следующими формулами:

$$Q_{\text{откр.стр}} = \varepsilon_m \sigma_0 (T_m^4 - T_{o.c.}^4) \cdot f_{\text{откр.стр}}, \text{ Вт}, \quad (4)$$

$$Q_{\text{закр.стр}} = \varepsilon_{m-\phi} \sigma_0 (T_m^4 - T_{\phi}^4) \cdot f_{\text{закр.стр}}, \text{ Вт}. \quad (5)$$

Количество тепла, аккумулированного футеровкой определяется изменением энтальпии футеровки в условиях нестационарной теплопроводности, описываемое дифференциальным уравнением Фурье:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (6)$$

где $a = \lambda / \rho c$ – температуропроводность, характеризующая скорость изменения температуры, м²/с; λ – теплопроводность материала, Вт/(м·К); c — удельная теплоемкость, Дж/(кг·К); ρ — плотность материала, кг/м³.

Дифференциальное уравнение Фурье решалось методом конечных разностей. Аппроксимация дифференциального уравнения теплопроводности по методу конечных разностей приведена в формуле:

$$\frac{T_{i,k+1} - T_{i,k}}{h_\tau} = a \frac{T_{i+1,k} - 2T_{i,k} + T_{i-1,k}}{h_x^2} \quad (7)$$

из которой получили выражение для температуры:

$$T_{i,k+1} = T_{i,k} \left(1 - \frac{2ah_\tau}{h_x^2} \right) + \frac{ah_\tau}{h_x^2} (T_{i+1,k} + T_{i-1,k}) \quad (8)$$

Зная начальное и конечное распределение температуры по слоям футеровки, тепловую энергию, аккумулированную футеровкой ΔH_ϕ рассчитывали по формуле:

$$\Delta H_\phi = \sum_{i=1}^n [c_p \rho V_i (T_k - T_n)], \text{ Дж} \quad (9)$$

Тепловой поток излучением и конвекцией от кожуха ковша определяли по формуле Ньютона:

$$q_{\text{кож}} = \alpha_\Sigma \cdot (T_{\text{кож}} - T_{\text{о.с.}}), \text{ Дж/м}^2 \quad (10)$$

где α_Σ – коэффициент теплоотдачи, учитывающий потери от конвекции и излучения, $\alpha_\Sigma = \alpha_k + \alpha_u$, Дж/(м²·К).

$$\alpha_k = k \sqrt[4]{T_{\text{кож}} - T_{\text{о.с.}}} = k \Delta T^{0,25}, \text{ Дж/(м}^2 \cdot \text{К)} \quad (11)$$

где $k \approx 1,6$ для горизонтальной теплоотдающей поверхности, обращенной вниз; $k \approx 2,6$ для вертикальной поверхности; $k \approx 3,3$ для горизонтальной поверхности, обращенной вверх.

Радиационную составляющую α_u коэффициента теплоотдачи α_Σ определяли по плотности лучистого потока:

$$\alpha_u = \varepsilon \sigma_0 \frac{(T_{\text{кож}}^4 - T_{\text{о.с.}}^4)}{(T_{\text{кож}} - T_{\text{о.с.}})}, \text{ Дж/(м}^2 \cdot \text{К)} \quad (12)$$

где $\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К}^4)$ – постоянная Стефана-Больцмана; ε – степень черноты кожуха.

Потери тепла излучением и конвекцией от кожуха ковша находили по формуле:

$$Q_{\text{кож}} = q_{\text{кож}} \cdot F_{\text{кож}}, \text{ Дж} \quad (13)$$

где $F_{\text{кож}}$ – площадь кожуха ковша, м^2 .

Для определения теплового потока излучением от шлака использовалось уравнение:

$$q_{\text{шл}} = \varepsilon \sigma_0 (T_{\text{шл}}^4 - T_{\text{о.с.}}^4) = \varepsilon C_0 \left[\left(\frac{T_{\text{шл}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{о.с.}}}{100} \right)^4 \right], \text{ Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}) \quad (14)$$

где $C_0 = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ – константа излучения черного тела.

Тепло, выделяемое или поглощаемое при нагреве и плавлении легирующих определяли по формуле:

$$Q_{\text{лег}} = K_T \cdot m_{\text{лег}} \cdot c_M, \text{ Дж} \quad (15)$$

где K_T – коэффициент, определяющий изменение температуры при введении 1 кг материала в одну тонну металла; c_M – удельная теплоемкость стали, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$

На каждом шаге по времени h_t рассчитываются общие тепловые потери по формуле:

$$Q_{\text{общ}} = Q_{\text{стр}} + Q_{\text{ф}} + Q_{\text{шл}} + Q_{\text{лег}} + Q_{\text{кож}}, \text{ Дж} \quad (16)$$

после чего определяется снижение температуры расплава:

$$\Delta T_M = \frac{Q_{\text{общ}}}{c_m \cdot M}, \text{ К.} \quad (17)$$

Для реализации модели был использован язык программирования Visual Basic. Отдельно была разработана программа для расчета распределения температуры при стационарном режиме. Исходными данными для нее были толщина и тепловые свойства огнеупоров, а также максимальная температура нагрева. Результаты расчета заносились в основную программу как исходные данные. Кроме этого, в основную программу требуется ввести начальную температуру расплава (температура выпуска), количество введенных ферросплавов и раскислителей, а также длительность всех периодов работы ковша.

Адекватность прогнозной тепловой модели ковша проверялась по тем же данным, что и адекватность комплексной CFD-модели (рис. 11). Видно, что расчетное снижение температуры металла в ковше, полученное из модели очень близко к фактическим данным, о чем говорит высокий коэффициент детерминации R^2 и практически полное совпадение аппроксимирующей и идеальной прямых.

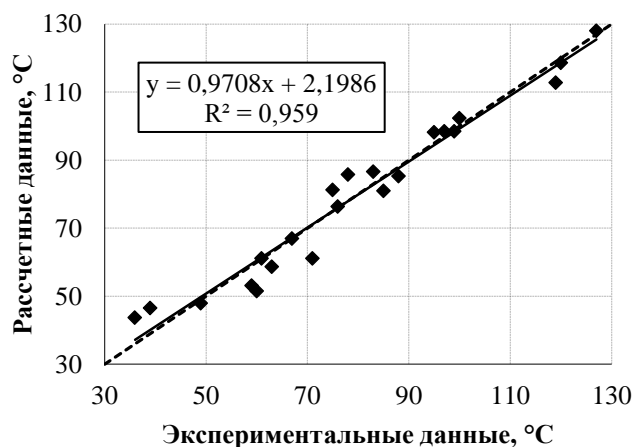


Рис. 11 – Сравнение экспериментальных и расчетных температур (сплошная – аппроксимирующая прямая, пунктир – прямая идеального совпадения расчетных и фактических данных)

С помощью предложенной модели можно с точностью ± 10 °C прогнозировать температуру металла в течение его выдержки в ковше, а также при постановке под крышку АКП. Еще одним важным применением модели может быть расчет оптимальной температуры выпуска металла из ДСП. Зная необходимую температуру металла перед обработкой на АКП и примерное время выдержки металла в ковше можно определить оптимальную (минимальную) температуру выпуска металла из ДСП, при которой металл на АКП не охладится ниже определенного уровня. Таким образом отпадет необходимость перегрева полупродукта в ДСП.

Для определения оптимального количества ферросплавов, подаваемых в ковш, были разработаны регрессионные модели усвоения ключевых элементов. Так как на ГУП «ЛПЗ» выплавляется главным образом сталь Ст3, основными легирующими элементами которой являются кремний и марганец, ограничились только этими элементами. На первом этапе рассчитали коэффициенты усвоения Si и Mn при подаче на выпуск металла из ДСП и на АКП по формуле:

$$K_y = \frac{M \cdot ([\text{Э}]_{\text{кон}} - [\text{Э}]_{\text{нач}})}{Q_{\text{ФС}} \cdot \% \text{Э}} \cdot 100\% \quad (18)$$

где M – масса металла в ковше, $M = 29\text{--}34$ т.

$[\text{Э}]_{\text{нач}}$ – содержание марганца и кремния в полупродукте перед обработкой на АКП (проба с ДСП). $[\text{Mn}]_{\text{н}} = 0,03\text{--}0,1$ %, $[\text{Si}]_{\text{н}} = 0,001\text{--}0,01$ %.

$[\text{Э}]_{\text{кон}}$ – содержание марганца и кремния в стали после обработки на АКП (последняя проба с АКП или первая проба с МНЛЗ). $[\text{Mn}]_{\text{к}} = 0,4\text{--}0,9$ %, $[\text{Si}]_{\text{к}} = 0,16\text{--}0,21$ %.

$Q_{\text{ФС}}$ – масса вводимых ферросплавов (МnC17, ФC65, 3ФС-62). $Q_{\text{МnC17}} = 250\text{--}350$ кг, $Q_{\text{ФС65}} = 0\text{--}150$ кг, $Q_{\text{3ФС-62}} = 125\text{--}250$ кг.

% Э – содержание элемента в ферросплаве. Для расчетов принято, следующее содержание элементов в ферросплавах, % масс.: $[\text{Mn}]_{\text{МnC17}} = 65$, $[\text{Si}]_{\text{МnC17}} = 17$, $[\text{Si}]_{\text{ФС65}} = 65$, $[\text{Si}]_{\text{3ФС-62}} = 62$.

При расчете коэффициентов усвоения на выпуске и на АКП выяснилось, что результаты лежат в широких интервалах и по ним нельзя судить об усвоении элементов. Это объясняется тем, что на выпуске кремний и марганец окисляются и переходят в шлак, а во время его нагрева и раскисления на АКП эти элементы восстанавливаются, поэтому коэффициенты недостоверны. Было решено использовать сквозные коэффициенты усвоения, т.к. они более точно описывают усвоение элементов с технологической (практической) точки зрения (рис. 12).

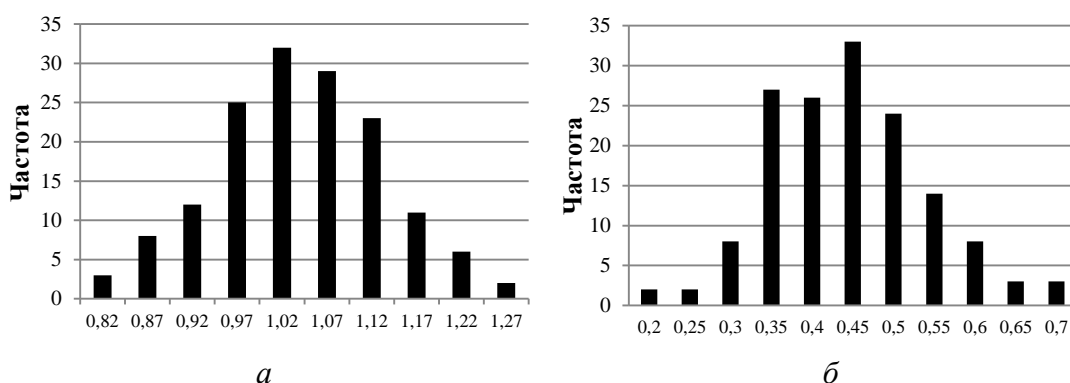


Рис. 12 – Гистограммы распределения коэффициентов усвоения марганца (а) и кремния (б)

Среднее значение сквозного коэффициента усвоения марганца примерно равно 100 %, что соответствует литературным данным. Это подтверждает предположение о том, что марганец почти полностью восстанавливается из шлака во время обработки на АКП, в то время как кремний, как элемент, имеющий большее сродство к кислороду, восстанавливается в меньшей степени.

Получены следующие уравнения регрессии:

$$\Delta[Mn] = 0,032 \cdot m_{MnC17} + 0,020 \cdot m_{з\Phi C-62} + 0,028 \cdot m_{Al} + 0,008 \cdot m_{MgO} - 0,020 \cdot m_{CaO} + 0,010 \cdot m_{\Phi C-65} + 0,164 \quad (19)$$

$$\Delta[Si] = 0,006 \cdot m_{MnC17} - 0,018 \cdot m_{\Phi C-65} + 0,004 \cdot m_{з\Phi C-62} + 0,006 \cdot m_{SiAl} + 0,136 \quad (20)$$

Для проверки адекватности полученных моделей построили соотношения расчетных и фактических значений изменения концентрации элементов (рис. 13). Видно, что регрессионные модели удовлетворительно описывают заводские данные. Об этом говорят высокие коэффициенты детерминации R^2 , а также малые стандартные ошибки оценки для обеих моделей.

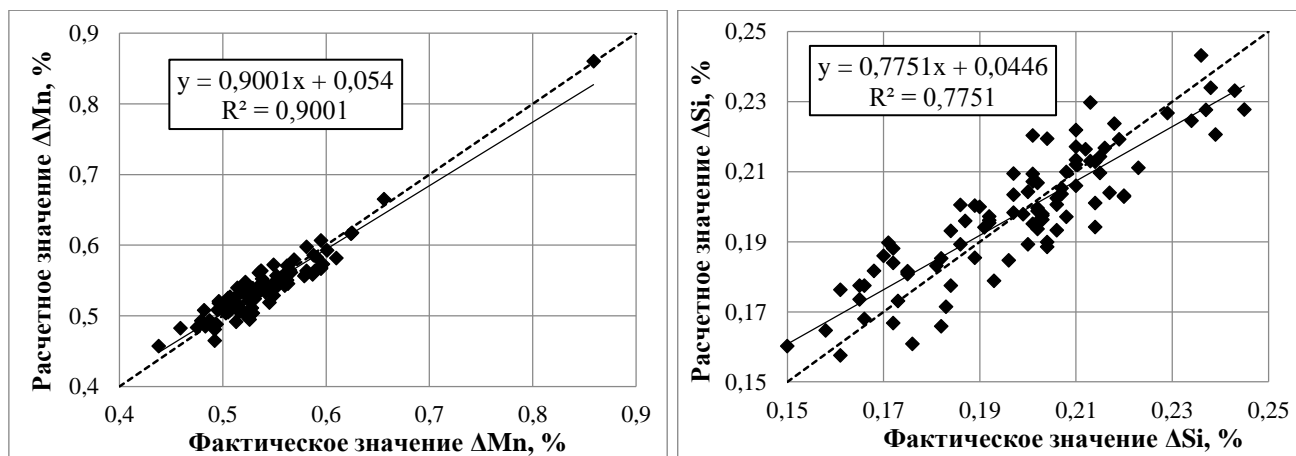


Рис. 13 – Соотношение расчетного и фактического значений изменения содержания марганца (слева) и кремния (справа) (сплошная – аппроксимирующая прямая, пунктир – прямая идеального совпадения расчетных и фактических данных)

Полученные модели можно внедрить в АСУТП плавки и внепечной обработки на ГУП «ЛПЗ» для прогнозирования температуры и химического состава плавки в реальном времени, а также для расчета оптимальной температуры и количества вводимых ферросплавов на выпуске из ДСП в режиме советчика.

ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработана трехмерная комплексная тепловая модель сталковша для изучения и совершенствования энергетического режима внепечной обработки стали. В отличие от аналогичных работ, учитывался массо- и теплоперенос в жидком металле во время выдержки, при этом на границе раздела металл-футеровка принималось граничное условие с учетом конвекции жидкого металла, причем коэффициент конвективной теплоотдачи высчитывался при моделировании пограничного слоя потока металла.

2. Определена степень черноты периклазоуглеродистой футеровки сталковша, составляющая от 0,74 до 0,91 в зависимости от температуры и состояния поверхности. Применение уточненных значений позволяет значительно повысить точность измерения температуры такой футеровки по сравнению с использованием данных по периклазовым огнеупорам.

3. С помощью разработанной модели установлено:

– толщина рабочего слоя слабо влияет на общие тепловые потери металла в ковше. Большее значение имеют теплофизические свойства огнеупора. Применение современных огнеупорных бетонов вместо периклазоуглеродистых изделий в футеровке рабочего слоя ковша позволит экономить до 6 кВт·ч/т стали без повышения удельных затрат на огнеупорные материалы. При этом, увеличение

теплоизоляционного слоя футеровки с 10 до 20 мм практически не оказывает влияние на общие тепловые потери металла в ковше, однако позволяет снизить среднюю температуру кожуха ковша с 310 до 250 °С;

- наиболее рациональным вариантом является использование покровного шлака толщиной не больше 25-50 мм совместно с теплоизоляционной крышкой. Применение этого варианта позволяет уменьшить расход электроэнергии на 15 кВт·ч/т при этом обеспечивая необходимое количество и основность шлака для десульфурации;

- длительность межплавочного простоя ковша значительно влияет на охлаждение стали в нем. Сокращение простоя путем уменьшения ковшей в обороте, а также использование теплоизоляционной крышки в течение простоя снижает тепловые потери пустого ковша, что позволит экономить около до 5 кВт·ч/т электроэнергии за счет уменьшения перегрева металла в ДСП;

- предварительный подогрев футеровки электрическими нагревателями до 1400 °С дает возможность уменьшить перегрев стали при выпуске из ДСП на 15-20 °С, что снижает удельный расход эл. эн. на 7-10 кВт·ч/т стали;

4. Разработан энерго- и ресурсосберегающий способ сушки футеровки ковшей с помощью электронагревателей. Новый способ позволяет на 20 % повысить стойкость рабочих огнеупоров, а также в 1,5-2 раза снизить длительность подготовки нового ковша к плавке по сравнению с газовым подогревом. Подана заявка на патент на изобретение от 25.04.2014 № 2014116659.

5. В виде рекомендаций предложен энерго- и ресурсосберегающий тепловой режим внепечной обработки стали на ГУП «ЛПЗ». Применение ряда рекомендаций уже позволило снизить удельный расход электроэнергии на АКП с 66 до 61 кВт·ч/т стали, что эквивалентно 3 млн. руб. в год.

6. Разработаны математические модели снижения температуры металла в ковше и усвоения легирующих, способные с удовлетворительной точностью прогнозировать температуру и состав металла в ковше во время выпуска и выдержки. Полученные модели могут быть использованы в АСУТП плавки и внепечной обработки на ГУП «ЛПЗ».

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Статистические модели усвоения кремния и марганца при ковшовой обработке стали / Краснянский М.В., Кац Я.Л., Мягков К.А. // Metallurg. 2011. №11. С. 42-48.

2. Эффективность электронагрева сталеразливочных ковшей / Краснянский М.В., Кац Я.Л., Бершицкий И.М. // *Металлург*. 2012. №5. С. 48-53.
3. Определение интегрального коэффициента теплового излучения периклазоуглеродистой футеровки / Краснянский М. В., Кац Я. Л. // *Металлург*. 2014. №5. С. 57-59.
4. Краснянский М.В., Кац Я.Л. Разработка энерго- и ресурсосберегающего режима эксплуатации сталеразливочных ковшей методами математического моделирования. Труды VI международной конференции «Металлургия-Интехэко-2013», Москва, 2013. С. 35-38.
5. Краснянский М.В., Кац Я.Л., Бершицкий И.М. Оптимизация температурного режима внепечной обработки стали методами математического моделирования: Труды XII конгресса сталеплавильщиков. М.: Metallurgizdat, 2013. С. 161-164
6. Statistical models of the assimilation of silicon and manganese in the ladle treatment of steel / M. V. Krasnyanskii, Ya. L. Kats, K. A. Myagkov // *Metallurgist*. 2012. Vol. 55. № 11-12. P. 790-798.
7. Efficiency of electrically heating the lining of steel-pouring ladles / M. V. Krasnyansky, Ya. L. Katz, I. M. Bershitsky // *Metallurgist*. 2012. Vol. 56. № 5-6. P. 357-365.
8. Determination of the Integral Emissivity of a Periclase-Carbon Lining / M. V. Krasnyanskii, Ya. L. Kats // *Metallurgist*. 2014. Vol. 58. № 5-6. P. 388-391.
9. Повышение эффективности производства стали на электрометаллургических заводах малой производительности / Белковский А. Г., Краснянский М. В., Кац Я. Л. // Сборник трудов XIII международного конгресса сталеплавильщиков. Москва-Полевской, 2014. С. 457-467.

ОТЗЫВ

научного руководителя
на работу научного сотрудника **М.В. Краснянского**
**«Исследование и совершенствование энергетического режима внепечной
обработки стали в ковшах малой вместимости»,**
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по
специальности 05.16.02 — «Металлургия черных, цветных и редких металлов»

Краснянский Михаил Викторович в 2010 г. закончил Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» по специальности «Металлургия черных металлов». В июле того же года поступил на работу в ОАО АХК «ВНИИМЕТМАШ им. академика Целикова» на должность инженера. В октябре 2010 г поступил в аспирантуру ВНИИМЕТМАШ и в 2013 г. ее закончил. В июне 2014 года был переведен на должность научного сотрудника.

Сразу после поступления во ВНИИМЕТМАШ, М.В. Краснянский принял активное участие в отработке технологии выплавки и внепечной обработки сталей на ГУП «Литейно-прокатный завод» в г. Ярцево Смоленской обл.

Новизной работы, в которой принимал участие М.В. Краснянский, является в некотором роде уникальность объекта исследования. До пуска сталеплавильного оборудования ГУП «ЛПЗ» в России не существовало дуговых печей столь малой вместительности, работающих по современной технологии с интенсификацией процессов.

В ходе этой работы была создана обновляющаяся база данных по результатам плавов, которые обрабатывались с использованием методов математической статистики. Анализ полученных таким образом эмпирических закономерностей позволил выявить взаимосвязи между технологическими параметрами процессов в ДСП-30 и АКП-30. Эти результаты, а также использование методов математического моделирования процессов теплообмена позволили определить влияние отдельных процессов на значения таких технико-экономических показателей ДСП и АКП как удельный расход электроэнергии, время плавки, температура металла и др. Рекомендации по совершенствованию технологии внепечной обработки стали на АКП-30, которые после обсуждений с персоналом завода, использовались в практике производства стали на «ЛПЗ», позволили достичь и даже превысить проектные технико-экономические показатели эксплуатации ДСП и АКП.

Кроме того, для уточнения параметров теплообмена при внепечной обработке, М.В. Краснянский провел лабораторный эксперимент по определению эффективного интегрального коэффициента излучения периклазоуглеродистых огнеупоров, что позволило существенно повысить точность прогноза результатов теплообмена в сталеразливочном ковше методами математического моделирования.

При исследовании процесса сушки и нагрева футеровки сталеразливочных ковшей М.В. Краснянский с помощью тепловых расчетов доказал экономическую целесообразность замены газоздушного нагрева на электрический. Это направление исследований представляется нам очень перспективным. Результаты этих исследований были использованы для определения параметров тиристорного источника питания установки электрического нагрева «УЭНК-20» для завода «Электросталь», о чем от предприятия-производителя установок электрического нагрева ЗАО «ТЭК-98» получен Акт об использовании результатов НИР № 58 от 14.07.14.

Эти и другие результаты работы М.В. Краснянского были доложены на 3-х конференциях, опубликованы в 5-и журнальных статьях. Кроме этого им в соавторстве подана заявка о выдаче патента РФ на изобретение №2014116659.


Таким образом, научный сотрудник ВНИИМЕТМАШ М.В. Краснянский обладает глубокими теоретическими и практическими знаниями и способен самостоятельно выполнять научно-исследовательские и проектные работы.


Как научный руководитель считаю, что М.В. Краснянский заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.02 — «Металлургия черных, цветных и редких металлов».

Научный руководитель, к.т.н.

Подпись Я.Л. Каца заверяю:

Ученый секретарь:


Я.Л. Кац


В.Г. Дрозд

Объявление о защите диссертации на соискание ученой степени кандидата наук

Диссертационный совет Д 212.132.02 при Национальном исследовательском технологическом университете «МИСиС», 119049, Москва, Ленинский проспект, 6, объявляет, что **Краснянский Михаил Викторович** представил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук «Исследование и совершенствование энергетического режима внепечной обработки стали в ковшах малой вместимости» по специальности 05.16.02 «Металлургия черных, цветных и редких металлов».

Защита диссертации состоится 26 марта 2014 г.

Текст объявления о защите диссертации и полный текст диссертации размещены на сайте НИТУ «МИСиС» 25 ноября 2014 г. по адресу:

<http://www.misis.ru/tabid/176/ArticleID/2340/>