

Выводы

1. В связи с внедрением агрегата ковш-печь показана принципиальная возможность работы на нижних допустимых значениях по содержанию Ni, Cr при выплавке коррозионностойких сталей. Разработаны суженные пределы содержания основных легирующих элементов.

2. Установлены основные факторы, влияющие на повышенную отбраковку по дефектам УЗК и поверхности титансодержащих коррозионностойких марок стали. Разработана технология выплавки, внепечного рафинирования и раскисления коррозионностойких сталей легированных титаном с пониженным содержанием азота. Значительно снижена отбраковка проката по всем видам дефектов.

3. За счет снижения содержания никеля при выплавке стали марок 08-12X18H10T по заказам ТУ 14-1-565-84 суммарный экономический эффект за последние годы составляет около 60 млн. грн.

Библиографический список

1. Садовник Ю.В., Нефедов Ю.А. Рабинович А.В. и др. Повышение качества высоколегированных сталей методом газокислородного рафинирования // Черная металлургия. - 1997. – Вып. - 5-6. - С. 23-24.

2. Нефедов Ю.А., Рабинович А.В., Садовник Ю.В. Разработка и промышленное освоение технологии выплавки коррозионностойких сталей методом газокислородного рафинирования // Современные проблемы металлургии. Науч. тр. ГМетАУ. - Вып. 1. - Днепропетровск, 1999. - С. 112-132.

3. Шульга В.О., Сальников А.С., Логозинский И.Н. Оптимизация периода газокислородного рафинирования коррозионностойких сталей // Сталь. - 2004. - № 11. - С. 19-20.

4. Шульга В.О., Король Л.Н., Сальников А.С. и др. Опыт освоения производства легированной высококачественной стали с обработкой на установке ковш-печь // Сталь. - 2004. - № 2. - С. 22-23.

5. Рабинович А.В., Садовник Ю.В., Венец Ю.С. и др. Исследование возможности уменьшения содержания никеля в стали типа X18H10 при сохранении ее технологической пластичности // Сталь. - 2002. - № 6. - С. 75-77.

Поступила 19.04.2013



УДК 669.14.018.294.001.57:669.046.554

Есаулов Г.А. /к.т.н./, Климчик Ю.В.
ООО «МЗ «Днепросталь»

Наука

Жаданос А.В. /к.т.н./, Гасик М.И. /д.т.н./,
Кукушкин О.Н. /д.т.н./
НМетАУ

Математическое моделирование теплотехнологических процессов в агрегате ковш-печь в условиях ООО «МЗ «Днепросталь»

Применительно к условиям ООО «МЗ «Днепросталь» разработана динамическая модель, позволяющая прогнозировать температуру расплава по ходу его обработки на установке ковш-печь с точностью ± 5°. Полученные аналитические выражения изменения температуры расплава во время обработки на установке ковш-печь позволяют интегрировать разработанную модель в существующие АСУ внепечной обработкой стали. Выполнена оценка статей энергетического баланса УКП, что позволяет определить технологические режимы, которые обеспечивают максимальный энергетический КПД. Ил. 3. Табл. 1. Библиограф.: 10 назв.

Ключевые слова: внепечная обработка стали, установка ковш-печь, теплотехнологические процессы, температура жидкой стали, энергетический баланс, автоматизированная система управления

With regard to the conditions of LTD «Dneprostal» the dynamic model has been developed. This model allows to the temperature prediction of liquid steel during ladle-furnace treatment processes with an accuracy of ± 5°. That makes a possibility of further application in automated control system of ladled steel treatment. Completed estimation of energy balance items makes it possible to define technological regimes leading to the best power efficiency.

Keywords: ladled steel treatment, ladle-furnace aggregate (LF), heat-energy processes, temperature of liquid steel, power balance, automated control system

Постановка задачи

Внепечная обработка стали на электродуговой установке ковш-печь (УКП) и вакуумной установке

- одно из инновационных направлений в современной металлургии. На украинских металлургических предприятиях на текущий момент функционирует 16

Таблица 1. Характеристики действующих УВОС предприятий Украины

Предприятие (производительность, млн. т.)	Емкость ковша, т	LF	Мощность тр-ра, МВА	VD	Производители оборудования
Енакиевский металлургический завод (2 + (I) ^{п*})	145	2 + (I)	25	-	HKMЗ
Донецкий электрометаллург. завод (0,8)	120	1	18	1	Daniely
Днепроспецсталь (0,7)	60	2	16, 20	1	Daniely, SMS Demag
Донецксталь (1,15)	155	1	18	-	Fuks Systemtechnik
Алчевский металлургический комбинат (5)	300	1	50	1	Siemens VAI
Энергомашспецсталь (Краматорск) (0,23)	75, 130	1	18	1	HKMЗ
Азовсталь (4)	300	2x2	45	1x2	Siemens VAI
НКМЗ (Краматорск)	60, 90	2	18	1	HKMЗ
Азовэлектросталь (0,45)	60	1	12	1	Совм. с STG group
ДМК им. Дзержинского (1 + (I))	250	1 + (I)	35	(I)	Siemens VAI
ООО Электросталь (Курахово) (0,3)	50	1	13	-	STG group (Италия)
Днепросталь (1,32)	160	1x2	29,7	1x2	Daniely

Примечание: Жирным курсивом в табл. 1 выделены планируемое дальнейшее увеличение производительности и планируемые к установке LF и VD

установок ковш-печь типа LF и 8 вакуумных установок типа VD (табл. 1) [1-4] и web-сайтов предприятий. В ближайшие годы планируется дополнительно ввести в эксплуатацию еще 8 агрегатов ковш-печь и 5 вакууматоров.

В 2012 г. в Украине (Днепропетровск) введен в строй новый электрометаллургический завод ООО «МЗ «Днепросталь» мощностью 1,32 млн. т, на котором производятся колесные и трубные марки стали по технологической схеме ДСП-УКП-ВАКУУМАТОР-МНЛЗ.

Температура расплава – один из наиболее важных технологических параметров, который контролируется во время обработки стали на установке ковш-печь. Исследования [5] показали, что далеко не всегда при обработке обеспечиваются режимы эффективного нагрева расплава, гарантированных поставщиками установок по контракту. Причиной этого является значительный разброс значений входных параметров процесса (толщины шлакового покрова, массы расплава, температуры футеровки ковша, расхода аргона, начальной температуры расплава). Температура расплава контролируется путем промежуточных замеров термомпарами, выполнение которых возможно лишь при отключении установки, что приводит к увеличению продолжительности обработки, потерям тепла и снижению энергетического и теплового к.п.д. установки. Поэтому необходимо для прогнозирования температуры расплава разработать математическую модель, которая, с одной стороны, обеспечивала бы точность, сопоставимую с термомпарой, а с другой (для упрощения ее интеграции в АСУ), описывалась бы достаточно простыми аналитическими выражениями с минимумом входных параметров.

Структура динамической модели

Установка ковш-печь является сложным теплофи-

зическим объектом с переменными состояниями. Переменность состояний модели обусловлена тем, что периоды нагрева металла чередуются с периодическими остановками для замеров температуры расплава. Повышение температуры расплава зависит от подводимой электрическими дугами мощности и тепловых потерь вследствие теплопередачи через футеровку ковша, излучения с поверхности шлакометаллического расплава, расплавления легирующих и шлакообразующих материалов, продувки аргоном. Так как с целью гомогенизации расплава по ходу обработки проводится про-

дувка аргоном, при дальнейших теплофизических расчетах принимаем допущение, что расплав однороден по температуре и химическому составу.

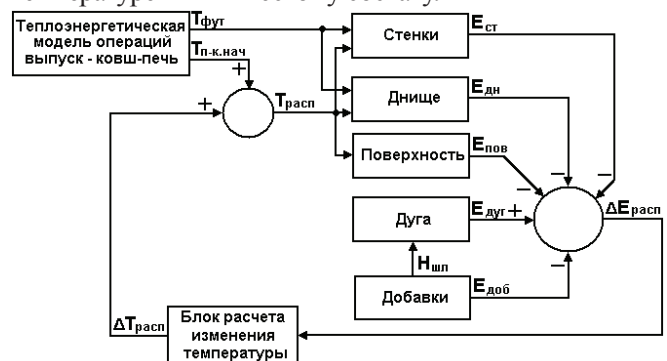


Рис. 1. Структурная схема динамической модели тепловых процессов в агрегате ковш-печь

Тепловые потери в связи с продувкой инертным газом происходят вследствие образования открытой от шлака поверхности жидкой стали в ковше и нагрева аргона. Выполненные нами расчеты показали, что при суммарном расходе аргона 50 нм³ потери энергии расплавом на нагрев аргона незначительны (≤0,5°), поэтому при расчетах их не учитывали.

Разработанная динамическая модель теплоэнергетических процессов в агрегате ковш-печь (рис. 1) включает следующие подсистемы: «Дуга», «Добавки», «Поверхность», «Стенки», «Днище» [4]. В данных подсистемах оцениваются основные статьи энергетического баланса установки. При заданной начальной температуре стали перед обработкой на установке T_{п-к.нач}, температуре футеровки ковша T_{фуг}, а также массе M_{расп} и теплоемкости расплава C_{расп} определяется текущее значение температуры жидкой стали T_{расп}.

Моделирование и анализ результатов

В подсистеме модели «Дуга» определяется энергия электрических дуг установки, поступающая на нагрев расплава [6]

$$E_{\text{дуг}} = K \cdot \sqrt{3} U_{2,j} \cdot I_{2,j} \cdot \cos \phi_j \cdot \eta_{\text{эл}} \cdot t_{\text{нагр}}, \quad (1)$$

где K – коэффициент, учитывающий потери мощности дуг на облучение стенок ковша и свода У КП в зависимости от толщины шлакового покрова; $U_{2,j}$, $I_{2,j}$ – соответственно, номинальные напряжения и токи на вторичной обмотке трехфазного трансформатора j -ой ступени напряжения; $\cos \phi_j$ – коэффициент мощности трансформатора ступени напряжения j ; $\eta_{\text{эл}}$ – электрический КПД У КП; $t_{\text{нагр}}$ – время нагрева металла.

При определении коэффициента K необходимо учитывать три основных периода состояния поверхности шлако-металлического расплава: начальный период формирования шлакового покрова, период нарастания толщины шлакового покрова по мере ввода новых порций шлакообразующих и раскислителей, период работы дуг при полном их экранировании шлаком. По данным [7], по мере нарастания шлакового покрова коэффициент K меняется в диапазоне от 0,1 до 1.

В подсистемах модели «Добавки», «Поверхность», «Стенки», «Днище» производится определение энергетических потерь расплавом вследствие нагрева, расплавления введенных шлакообразующих и легирующих материалов, потерь через границу расплав-шлак, теплопередачи через футеровку ковша. Ввод химических добавок приводит к существенному снижению температуры расплава, способствуя при этом повышению эффективности нагрева электрическими дугами. По результатам анализа литературных источников, для оценки затрат энергии (кДж) на нагрев и расплавление шлакообразующих, легирующих добавок, раскислителей (подсистема «Добавки») нами предложена линейная модель [8]

$$E_{\text{доб}} = 2095 \cdot m_{\text{CaO}} + 1676 \cdot m_{\text{CaF}_2} + 1680 \cdot m_{\text{SiMn}} - 419 \cdot m_{\text{FeSi}} + 1341 \cdot m_{\text{FeMn}} + 4190 \cdot m_c \quad (2)$$

где m_i – масса вводимой добавки, кг.

При определении тепловых потерь через футеровку ковша, состоящей из нескольких слоев огнеупорных материалов (рабочий слой, подрабочий слой, слой теплоизоляции), рассматривался процесс нестационарной теплопередачи. Считали, что стенки ковша представляют собой цилиндр, а днище ковша – плоскую поверхность. Тогда уравнения теплопроводности для каждого m -го материала футеровки имеют вид [9]

$$C_m(T_m) \cdot \rho_m \frac{\partial T_m}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \cdot \lambda_m(T_m) \frac{\partial T_m}{\partial r} \right) \text{ для стенки ковша} \quad (3)$$

$$C_m(T_m) \cdot \rho_m \frac{\partial T_m}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_m(T_m) \frac{\partial T_m}{\partial z} \right) \text{ для днища ковша}$$

где r – радиус ковша; z – координата высоты расплава; $C_m(T_m)$ – удельная теплоемкость;

T_m – температура; ρ_m – плотность; $\lambda_m(T_m)$ – теплопроводность.

Для границы расплав – футеровка задаются граничные условия 3-го рода [10]

$$- \lambda_p(T_p) \cdot \left(\frac{\partial T_p}{\partial n} \right)_{n_{p,0}} = \delta_{\text{раст}} (T_{\text{раст}} - T_{p,0}) \quad (4)$$

где $T_{\text{раст}}$ – температура расплава; $T_{p,0}$ – температура внутренней поверхности рабочего слоя футеровки; $\delta_{\text{раст}}$ – коэффициент теплоотдачи расплава, Вт/м²·К.

На стыках слоев футеровки и кожуха ковша задаются граничные условия 4-го рода

$$\left. \begin{aligned} T_{\text{тп},0} = T_{p,1}; T_{\text{из},0} = T_{\text{тп},1} \\ \lambda_{p,\phi}(T_{p,\phi}) \cdot \left(\frac{\partial T_{p,\phi}}{\partial n} \right)_{n_{p,\phi,1}} = \lambda_{\text{тп}}(T_{\text{тп}}) \cdot \left(\frac{\partial T_{\text{тп}}}{\partial n} \right)_{n_{\text{тп},0}}; \\ \lambda_{\text{тп},\phi\kappa}(T_{\text{тп}}) \cdot \left(\frac{\partial T_{\text{тп}}}{\partial n} \right)_{n_{\text{тп},1}} = \lambda_{\text{из}}(T_{\text{из}}) \cdot \left(\frac{\partial T_{\text{из}}}{\partial n} \right)_{n_{\text{из},0}} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где $T_{p,1}$ – температура внешней поверхности рабочего слоя футеровки; $T_{\text{тп},0}$ – температура внутренней поверхности подрабочего слоя футеровки; $T_{\text{тп},1}$ – температура внешней поверхности подрабочего слоя шамотной футеровки; $T_{\text{из},0}$ – температура внутренней поверхности теплоизоляционного слоя; $T_{\text{из},1}$ – температура внешней поверхности СЛОЯ изоляции; $\lambda_m \left(\frac{\partial T_m}{\partial n} \right)_{n_m}$ – тепловые потоки, проходящие через поверхности соприкосновения соответствующих слоев.

С учетом того, что в металлическом кожухе ковша градиент температуры невелик, при теплопередаче он не учитывается. Поэтому для наружной поверхности ковша граничные условия 3-го рода задаются следующим образом

$$\lambda_{\text{из},\phi} \cdot \left(\frac{\partial T_{\text{из},\phi}}{\partial x} \right) = - \delta_{\text{окр}} (T_{\text{из},1} - T_{\text{окр}}) \quad (6)$$

где $\lambda_{\text{окр}}$ – коэффициент теплоотдачи в окружающую среду, $T_{\text{из},1}$ – температура внешней поверхности теплоизоляционного слоя, $T_{\text{окр}}$ – температура окружающей среды.

Сложность оценки теплотерь на нагрев футеровки ковша и теплопередачи через нее заключается в том, что начальные условия для решения уравнений (3) с граничными условиями (4-6) неизвестны. Поэтому дополнительно рассматривались теплофизические процессы в период между выпуском и нагревом расплава на установке ковш-печь: теплопередача через футеровку ковша (принималось допущение о стационарности начальных условий внутри футеровки ковша на момент выпуска расплава в ковш) и излучение с поверхности системы расплав-шлак. Расчет теплового состояния футеровки ковша выполнялся методом конечных разностей. При оценке

тепловых потерь с поверхности расплава необходимо учитывать, что часть энергии теряется излучением с поверхности, покрытой шлаком, а часть с открытой поверхности расплава, которая образуется восходящими потоками аргона. Полный тепловой поток излучением с поверхности расплава, покрытой шлаком, определяется из выражения [8]

$$Q_{p-ш\dot{\varphi}} = \gamma_0 \cdot e_{p-ш-кр} \cdot (T_{расп\dot{\varphi}}^4 - T_{кр}^4) \cdot F_{p-ш} \quad (7)$$

где $Q_{p-ш\dot{\varphi}}$ – тепловой поток с поверхности металл-шлак в τ -ю минуту обработки стали на ковше-печи; $\gamma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ – константа излучения абсолютно черного тела; $e_{p-ш-кр}$ – степень черноты системы, которая включает в себя поверхность расплав-шлак и водоохлаждаемую крышку установки; $T_{расп\dot{\varphi}}$ – температура расплава в τ -ую минуту обработки на ковше-печи; $T_{кр}$ – температура водоохлаждаемой крышки; $F_{p-ш}$ – площадь покрытой шлаком поверхности.

Во время технологических остановок, при оценке тепловых потерь с поверхности расплава, покрытого шлаком, необходимо учитывать уменьшение потерь вследствие затвердевания шлакового покрова. Поэтому при оценке тепловых потерь излучением с поверхности расплав-шлак принимали допущение, что степень черноты $e_{p-ш-кр}$ изменяется по выражению $e_{p-ш-кр,2} = a \cdot (\dot{\varphi} + 1)^b$, эмпирические коэффициенты которого получены во время адаптации модели.

Полный тепловой поток с открытой поверхности расплава определяется из выражения [8]

$$Q_{откр\dot{\varphi}} = \gamma_0 \cdot e_{расп-кр} \cdot (T_{расп\dot{\varphi}}^4 - T_{кр}^4) \cdot F_{откр} \quad (8)$$

где $Q_{откр\dot{\varphi}}$ – тепловой поток с открытой поверхности расплава в τ -ую минуту обработки стали на ковше-печи; $e_{расп-кр}$ – степень черноты системы расплав-водоохлаждаемая крышка; $F_{откр}$ – площадь открытой поверхности расплава.

Масса расплава в ковше - 160 т Время работы под током 22 мин
 $E_{акт} = 7680 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$ $E_{акт,уд} = 48 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{т}$ $T_{обр.кон} = 1612 \text{ }^\circ\text{C}$

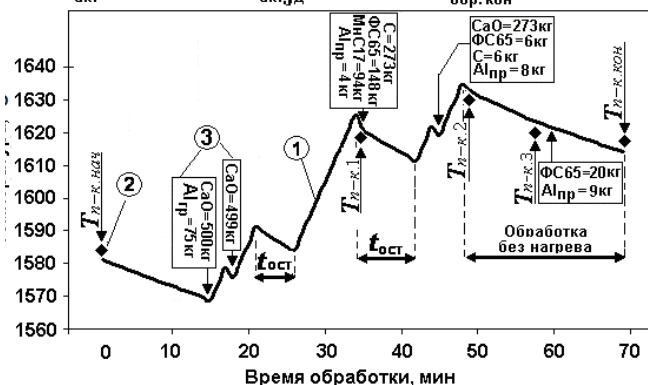


Рис. 2. Динамика температуры колесной стали по ходу обработки на УКП: 1 - модельные значения, 2 - результаты замеров термомпарами, 3 - ввод добавок

Агрегат «ковш-печь», под который адаптировалась разработанная модель, имеет следующее технологические параметры: $M_{расп} = 160 \text{ т}$, $U_{2,j} = 270-390 \text{ В}$, $I_{2,j} = 20,8-46,3 \text{ кА}$, активная мощность

$P_{акт} = 8,8-21,6 \text{ МВт}$, длина электрической дуги $L_0 = 60-135 \text{ мм}$, $P_{дюз} = 8,1-18,8 \text{ МВт}$, $\cos\varphi = 0,66-0,86$, $\eta_{эл} = 0,84-0,91$. В качестве параметров, которые подстраивались в модели, учитывались, коэффициент теплоотдачи стали $\alpha_{расп}$, степени черноты $e_{p-ш-кр}$, $e_{расп-кр,2}$, $e_{расп-кр}$. Основной целью адаптации модели является минимизация суммы квадратов разностей между реальными и модельными значениями изменения температуры расплава. Максимальное отклонение между модельными и экспериментальными данными не превышают $\pm 5^\circ$, т.е. находится в пределах погрешности термомпары (рис. 2).

Установлено, что приращение температуры расплава во время нагрева на УКП без учета введения шлакообразующих, легирующих добавок, раскислителей хорошо описывается уравнением вида

$$\Delta T_{расп} = k_1 \cdot t_{нагр} \quad (9)$$

где k_1 – эмпирический коэффициент, определяемый из выражения

$$k_1 = a_j \cdot H_{шл} + b_j \cdot M_{расп} + c_j \cdot Q_{Ar} + d_j \cdot t_{вып} + e_j \cdot T_{н-к,нач} + f_j \cdot T_{ф,т.0} + g_j \quad (10)$$

где $H_{шл}$ – толщина шлакового покрова, мм; $M_{расп}$ – масса расплава, т; Q_{Ar} – удельный расход аргона, л/мин·т; $t_{вып}$ – время с момента окончания выпуска стали в ковш, мин; $a_j, b_j, c_j, d_j, e_j, f_j, g_j$ – коэффициенты уравнения, зависящие от ступени напряжения трансформатора.

На рис. 3 приведены данные об энергетическом балансе установки при следующих электрических параметрах: $U_{2,j} = 360 \text{ В}$; $I_{2,j} = 35,3 \text{ кА}$; $P_{полн} = 22 \text{ МВА}$; $P_{акт} = 17,3 \text{ МВт}$; $P_{дюз} = 15,4 \text{ МВт}$; $U_{дюз} = 146 \text{ В}$; $L_0 = 111 \text{ мм}$; $\cos\varphi = 0,79$; $\eta_{эл} = 0,89$.

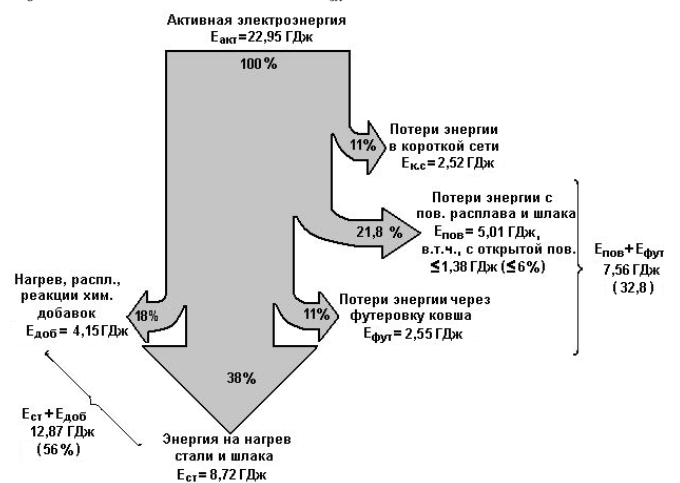


Рис. 3. Энергетический баланс установки ковш-печь

Выводы

1. Разработана динамическая модель тепловых процессов в агрегате ковш-печь, в которой в отличие от полученных ранее теплофизических моделей учтено наличие открытой поверхности металла, площадь которой зависит от интенсивности продувки инерт-

ным газом, а также нестационарность начальных условий внутри футеровки ковша. Модель адаптирована к реальным промышленным условиям.

2. Полученные аналитические выражения изменения температуры расплава позволяют интегрировать разработанную модель в существующие АСУ внепечной обработки стали.

3. Анализ статей энергетического баланса установки показывает, что существуют резервы для повышения энергетического и теплового к.п.д. установки: сокращение по возможности технологических остановок (в случае, если такие остановки необходимы с точки зрения технологии, то расход аргона должен быть меньше, чтобы не образовывалась открытая поверхность металла; переключение ступеней напряжения с низких на более высокие должно осуществляться по мере увеличения толщины шлакового покрова, чтобы избежать потерь энергии дугами на облучение стенок ковша.

Библиографический список

1. Основные направления и перспективы развития сталеплавильного производства в Украине / Ю.С. Кривченко, А.А. Малик, В.Я. Орман, А.В. Филяк // *Металлург. и горноруд. пром-сть*. - 2007. - № 1. - С. 16-18.

2. «Мини» вместо «Комби». Электрометаллургические мини-заводы – альтернатива интегрированным меткомбинатам / Ю.С. Кривченко, М.И. Гасик // *Металлургический компас. Украина - Мир*. - 2006. - № 1. - С. 26-30.

3. Проектирование современных производств обработки металлов давлением: учебник / Ю.Н. Ставовский, Ю.С. Кривченко, Г.С. Бабенко. - Днепропетровск: Монолит, 2009. - 745 с.

4. Оптимизация энергетического режима внепечной обработки колесной стали на основе математиче-

ского моделирования / А.В. Жаданос, О.Н. Кукушкин // *Теория и практика металлургии*. – 2010. - № 3-4. – С. 37-43.

5. Управление тепловым и электрическим режимами агрегата ковш-печь / Е.Б. Агапитов, Г.П. Корнилов, Т.Р. Храмшин и др. // *Электрометаллургия*. - 2006. - № 6. - С. 11-16.

6. Исследования с помощью математической модели теплового состояния агрегата ковш-печь при внепечной обработке металла / Н.Ф. Ахметшин, И.Ю. Зинуров, В.С. Галян и др. // *Электрометаллургия*. – 2001. - № 10. - С. 23-26.

7. Проектирование и оборудование электросталеплавильных и ферросплавных цехов: Учебник / В.А. Гладких, М.И. Гасик, А.Н. Овчарук, Ю.С. Проидак. - Днепропетровск: Системные технологии, 2004. - 736 с.

8. Динамическая модель теплоэнергетических процессов в электротермическом агрегате ковш-печь для создания АСУ / А.В. Жаданос, О.Н. Кукушкин, И.В. Деревянко // *Теория и практика металлургии*. - 2007. - № 2-3. - С. 64-69.

9. Energiehaushalt eines Pfannenofens / W. Hoppmann, F.N. Fett, T. Klages, L. Fiege // *Stahl und Eisen*. - Band (108) 5. September 1988. - № 18. - P. 841-847.

10. Кучаев А.А. Численно-экспериментальный метод моделирования трехмерного индукционного трехфазного поля в жидкой стали установки «печь-ковш» // *Физико-технический институт стали и сплавов НАН Украины*. – Киев, 1998. - 79 с. – Рус. - Деп. в ГНТБ Украины 13.07.98, № 326 - УК98.

Поступила 31.07.2013



ВНИМАНИЮ АВТОРОВ!

В редакции можно приобрести по льготной цене авторские экземпляры журнала. Просим заблаговременно подать заявку для формирования тиража.

контактный телефон 056-744-81-66
(факс) 0562-46-12-95