

На правах рукописи

Гришин Андрей Анатольевич

**Исследование режима плавления металлизированных
окатышей в ванне дуговой печи с целью интенсификации
процесса электроплавки стали**

специальность 05.16.02 – «Металлургия черных, цветных
и редких металлов»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание
ученой степени кандидата
технических наук

Москва 2006

Диссертационная работа выполнена
на кафедре электрометаллургии стали и ферросплавов
Московского государственного института стали и сплавов
(технологического университета),
и кафедре металлургических и теплофизических процессов
СТИ (ф) МИСиС.

Научный руководитель:
кандидат технических наук, профессор Кочетов А.И.

Официальные оппоненты
доктор технических наук, профессор Серов Г.В.
кандидат технических наук Лактионов А.В.

Ведущее предприятие:
ОАО «Оскольский завод металлургического машиностроения»

Защита состоится « 7 » декабря 2006 г.
в 10 часов на заседании диссертационного совета Д. 212. 132. 02 по
присуждению ученых степеней в области металлургии черных, цветных и
редких металлов при Московском государственном институте стали и
сплавов (технологическом университете) по адресу: 119049, Москва,
ГСП-1, Ленинский проспект д.6 ауд. 305.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГИСиС.

Автореферат разослан « 7 » ноября 2006 г.

Справки по телефону (495) 237-84-37, факс (495) 236-82-17

Ученый секретарь
диссертационного совета Д. 212. 132. 02,
доктор технических наук, профессор

 Семин А.Е.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Введение. Для современной электрометаллургии с применением непрерывной подачи железорудных металлизированных окатышей (ЖМО) в ванну дуговой печи характерно применение различных способов интенсификации тепловых и технологических процессов, которые в основном сводятся к подогреву лома и металлизированных окатышей перед подачей в печь, а также к применению дутьевых устройств для продувки металла кислородом.

Применение кислородных фурм и топливно-кислородных горелок для интенсификации режима плавления ЖМО требует более детального изучения особенностей протекания процессов в ванне дуговой печи и разработку более совершенного метода управления тепловыми и технологическими процессами производства электростали.

Актуальность работы заключается в необходимости более детального изучения особенностей режима плавления металлизированных окатышей в ванне дуговой печи с учетом изменяющихся по ходу электроплавки процессов нагрева и обезуглероживания расплава при использовании дутьевых устройств для интенсификации энерготехнологического режима. Важным при этом является разработка математической модели и алгоритма управления режимом загрузки металлизированного продукта в синхронном режиме со скоростью плавления ЖМО при соблюдении оптимального уровня перегрева металлической ванны над температурой ликвидуса стали, что позволит сократить расход электроэнергии на процесс и улучшить технико-экономические показатели электроплавки.

В этой связи требуется проведение экспериментальных исследований в лабораторных и промышленных условиях с целью изучения режима плавления металлизированных окатышей в ванне дуговой печи с учетом изменяющихся энерготехнологических параметров плавки. Кроме того, требуется уточнение некоторых теоретических представлений о процессах плавления ЖМО нагрева и обезуглероживания металла в ванне дуговой печи для построения алгоритма управления на основе математической модели режима загрузки металлизированных окатышей в ванну дуговой печи.

Целью работы является разработка энергосберегающей технологии электроплавки металлизированных окатышей на основе интенсификации процессов плавления ЖМО и оптимизации энерготехнологического режима электроплавки, а также повышение производительности агрегата, снижение расхода электроэнергии на процесс плавки и улучшение технико-экономических показателей производства.

Уточнение теоретических представлений о кинетике и механизме плавления металлизированных окатышей с учетом образования гарнисажной корочки на его поверхности в условиях применения ТКГ и кислорода

для интенсификации процессов нагрева и обезуглероживания металла в ванне дуговой печи.

Проведение исследований, направленных на уточнение существующих теоретических представлений о механизме обезуглероживания сталеплавильной ванны при размещении металлizedованного сырья на поверхности границы раздела шлак-металл, и с учетом особенностей теплообмена в системе дуга-шлак-металл.

Объект исследования. Дуговая сталеплавильная печь с применением непрерывной загрузки металлizedованных окатышей в ванну, использованием различных способов продувки металла кислородом для интенсификации процесса плавления ЖМО и контролем параметров энерготехнологического режима электроплавки.

Предмет исследования. Процесс плавки металлizedованных окатышей в ванне дуговой печи с учетом анализа влияния гидродинамики сталеплавильной ванны, скорости обезуглероживания расплава и особенностей теплового состояния дуговой печи в период окислительного рафинирования металла.

Автором* выносятся на защиту:

- экспериментальные данные и теоретические положения о влиянии теплофизических параметров расплава на скорость плавления металлizedованных окатышей при наличии гарнисажной корочки и без нее;
- экспериментальные исследования процесса обезуглероживания металла в ванне дуговой печи по ходу плавления металлizedованных окатышей и оценка скорости их усвоения металлом в зависимости от параметров теплового состояния агрегата;
- экспериментальные данные по механизму образования и скорости плавления гарнисажной корочки на поверхности металлizedованного окатыша в зависимости от теплофизических свойств окатышей и железоуглеродистого расплава;
- теплофизическая модель процесса электроплавки ЖМО, учитывающая параметры режима нагрева и обезуглероживания металла при непрерывной загрузке металлizedованных окатышей с прогнозированием содержания углерода в металле при сверх и докритических его концентрациях;
- комплексная математическая модель и алгоритм управления процессом загрузки металлizedованных окатышей в ванну дуговой печи в синхронном режиме со скоростью плавления ЖМО, учетом состояния гидродинамики сталеплавильной ванны, процессов нагрева и обезуглероживания расплава.

* Теплофизическая часть работы выполнена под руководством профессора, доктора технических наук Меркера Э.Э.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

- установлены закономерности образования гарнисажной корочки на поверхности металлизированного окатыша при его контакте с расплавом, нагреве и плавлении в ванне дуговой печи в зависимости от теплофизических и геометрических характеристик (F_0) материала и параметров теплового состояния ванны ($T_m, \Delta T_p$);

- впервые определены кинетические константы (ϵ, γ) процесса обезуглероживания металлической ванны при непрерывной подаче металлизированных окатышей в печь в докритических областях концентраций углерода, рассчитаны параметры термодинамического равновесия системы углерод – кислород и определены значения критерия интенсивности перемешивания сталеплавильной ванны, а также установлен характер его влияния на скорость плавления металлизированных окатышей;

- разработана методика физического моделирования и установка для изучения процесса плавления металлизированных окатышей в ванне дуговой печи и установлены закономерности влияния массового барботажа расплава пузырями CO и теплофизических параметров расплава на скорость плавления и усвоения окатышей в ванне;

- выявлены новые характерные зоны в структуре металлизированного окатыша, позволяющие судить о закономерностях его плавлении в железоуглеродистом расплаве, и на компьютерной установке в комплекте с микроскопом исследована их структура;

- получена аналитическая зависимость плотности результирующего теплового потока на поверхность металлической ванны от поверхности свода и стен печи в интегральной форме по закону Ламберта с учетом конструктивных особенностей свода дуговой и уровня погружения электрических дуг в системе металл-шлак;

- разработана теплофизическая модель процесса электроплавки ЖМО и создан алгоритм управления системой загрузкой металлизированных окатышей в ванну печи в синхронном режиме со скоростью плавления окатышей при оптимальных значениях параметров теплового состояния ванны.

Практическая значимость работы.

- Полученные в работе научные результаты использованы для разработки энергосберегающей технологии электроплавки ЖМО в ванне дуговой печи, основанная на использовании принципа равенства скоростей загрузки и плавления окатышей по ходу процесса при оптимальных значениях параметров теплового состояния сталеплавильной ванны.

- Разработана усовершенствованная математическая модель процесса обезуглероживания металла в ванне дуговой печи, созданы алгоритм и программы для расчета кинетических констант режима обезуглероживания, что, позволяет с большей точностью прогнозировать содер-

жание углерода в железоуглеродистом расплаве по ходу плавки ЖМО при различных методах интенсификации процесса.

- Предложена к использованию технология электроплавки ЖМО в ванне дуговой печи, основанная на том, чтобы осуществлять непрерывную подачу окатышей в печь при значениях концентрации углерода в металле в пределах $0,15 \div 0,20$ %, т.е. в той области [С], где наблюдаются высокие значения критерия перемешивания ванны, что способствует снижению длительности плавки под током, уменьшению расхода электроэнергии и улучшению технико-экономических показателей производства.

Апробация результатов работы. Основные результаты работы докладывались, обсуждались и положительно оценены в трудах международных научных и научно-практических конференциях «Современные сложные системы управления», г. Старый Оскол, ноябрь 2002 г.; «Автоматизированные печные агрегаты и энергосберегающие технологии в металлургии», Москва, декабрь, 2002 г.; «Современная металлургия начала нового тысячелетия», г. Липецк, 2005 г.; в пятой международной научно-технической конференции «Прогрессивные процессы и оборудование металлургического производства» г. Череповец 24-25 октября 2005 г.; III международной научно-практической конференции «Металлургическая теплотехника: история, современное состояние, будущее. К столетию со дня рождения М.А. Глинкова», Москва, февраль, 2006 г.; IX Международном конгрессе сталеплавыльщиков, г. Старый Оскол, октябрь 2006 г.; на научных семинарах кафедр ЭМСиФ МИСиС и МТП СТИ (ф) МИСиС.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 7 печатных работ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения 5 глав, заключения, списка литературы (93 наименования), приложения и изложена на 162 страницах, содержит 22 таблицы и 72 рисунка.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведен краткий анализ существующих энерготехнологических режимов электроплавки ЖМО в ванне дуговой печи в условиях интенсификации процессов кислородом на основе применения фурм или топливно-кислородных горелок (ТКГ) и обоснована необходимость решения проблемы по совершенствованию технологии плавки окатышей с целью энергосбережения и повышения эффективности производства.

В первой главе «Современное состояние проблемы, постановка задачи и методика исследования» дается подробный анализ существующей технологии электроплавки ЖМО в 150 т. дуговых печах ЭСПЦ ОАО «ОЭМК» и на основе анализа особенностей технологии намечены пути решения проблемы по разработке энергосберегающей технологии плавки стали при интенсификации энерготехнологических процессов и оптимизации параметров тепловой работы агрегата.

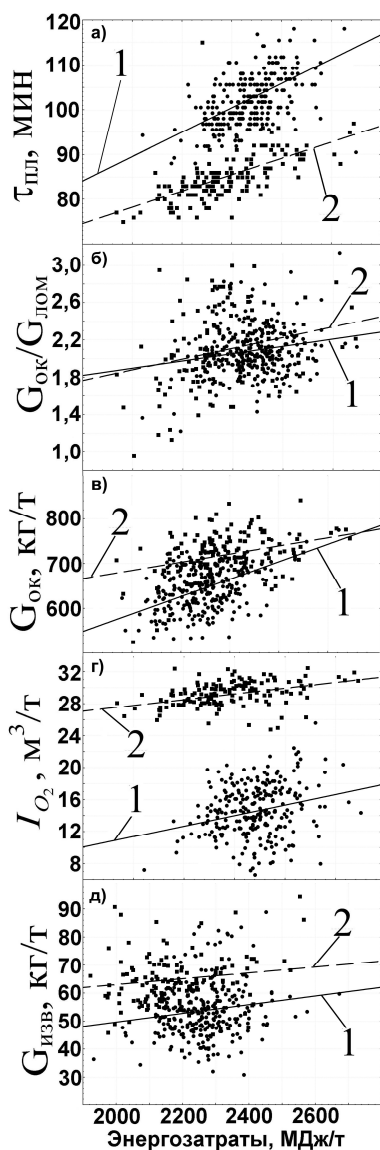


Рис. 1. Зависимость показателей технологического процесса для стали ШХ-15 от удельных энергозатрат на плавку при использовании кислородной фурмы для продувки металла (1) и ТКГ для подачи топливно-кислородной смеси и углеродсодержащий материалов (2) на шлак.

Эксперименты, проведенные на 150 т. дуговых печах в ЭСПЦ ОАО «ОЭМК», показали существенную зависимость (Рис. 1) от удельных энергозатрат таких технологических показателей, как длительность плавки (а) под током ($\tau_{пл}$, мин), соотношение расходов ЖМО (б) и лома ($G_{ок}/G_{лом}$) на процесс, удельные расходы (в) окатышей ($G_{ок}$, кг/т), извести ($G_{изв}$, кг/т) (д), а также расхода кислорода (г) через фурму или ТКГ (I_{O_2} , м³/мин) на электроплавку стали.

Статистическую обработку опытных данных осуществляли с помощью пакета программ по таким параметрам электроплавки, как температура металла и концентрация углерода в нем по ходу процесса, расходы кислорода, электроэнергии и шихтовые материалы. Для получения этих данных использовали платформенные и ленточные весы «Сименс» (погрешность $\pm 0,3\%$), а также ленточный дозатор с той же погрешностью.

Измерение температуры жидкого металла и шлака производили разовыми термопарами ПР 30/6 со вторичным прибором «Концер» ДТК 02/А, имеющим диапазон измерения $1100 \div 1800^\circ\text{C}$, с погрешностью $\pm 2,5\%$.

Химический состав металла и шлака определяли химическими и физико-химическими методами, а содержание углерода определяли на анализаторе «LECO» с точностью $\pm 0,0002\%[\text{C}]$.

Теплоусвоение металлической ванны оценивали по следующему выражению:

$$\Delta Q_{\text{в}} = Q_{\text{м}} / d\tau = G_{\tau} \cdot \bar{c}_{\text{м}} (dT/d\tau) = K_{\text{в}} \cdot V_{\text{т}}, \text{ кВт}, \quad (1)$$

где $Q_{\text{м}}$ – теплосодержание металла, кДж; $G_{\tau} = G_0 + V_{\text{ок}} \cdot \tau$ – текущий вес металла, кг; $\bar{c}_{\text{м}}$ – теплоемкость металла, кДж/(кг·°C); $K_{\text{в}}$ – коэффициент теплового состояния ванны, кДж/°C; $V_{\text{т}} = dT/d\tau$ – скорость нагрева металла по ходу плавки, °C/мин.

Для оценки уровня перегрева ванны относительно температуры ликвидуса использовали коэффициент $K_0 = K'_{\text{в}} / K''_{\text{в}} = \bar{c}'_{\text{м}} \cdot G'_{\tau} / (\bar{c}_{\text{л}} \cdot G''_{\tau})$, где $\bar{c}'_{\text{м}}$ и $\bar{c}_{\text{л}}$ – теплоемкость металла при температуре его T' и при температуре ликвидуса °C, G'_{τ} и G_{τ} – вес металла при этих же температурах. Превышение $K'_{\text{в}}$ над $K''_{\text{в}}$ характеризует такое значение K_0 , при котором степень перегрева металла ($\Delta T_{\text{р}}$, °C) над ликвидусом не влияет на скорость плавления ЖМО и численное значение K_0 находили опытным путем.

Сравнительный анализ режимов электроплавки ЖМО с применением кислородной фурмы и двух ТКГ (Рис. 1) показывает, что при одинаковых энергозатратах на процесс такие технологические показатели, как $\tau_{\text{пл}}$, $G_{\text{ок}}$, $G_{\text{ок}}/G_{\text{л}}$ улучшаются, но при более высоких удельных расходах кислорода (I_{O_2} , м³/т) и извести ($G_{\text{изв}}$, кг/т) на плавку, что объясняется необходимостью нейтрализации более окисленного шлака, повышению его вспениваемости и обеспечения хорошего кипения ванны за счет интенсификации режима обезуглероживания металла.

Применение ТКГ, помимо осуществления в теплотехнический период плавки подогрева лома факелами, позволяет осуществлять в окислительный период плавки, продувку металла через шлак кислородом с добавлением 5÷8 кг/т графитового порошка (коксика) с целью регулирования уровня вспенивания шлака и его физико-химических свойств, и при необходимости производить науглероживание металла.

При этом для обеспечения высокого уровня вспенивания шлака с целью экранирования электрических дуг над металлом и осуществления горения коксика режим электроплавки ЖМО с применением ТКГ осуществляется при более высоком расходе кислорода (Рис. 1) в сравнении с режимом плавки при использовании кислородной фурмы. Это обстоятельство способствует повышению производительности дуговой печи примерно на 3-5% и приводит к сокращению расхода электроэнергии на 35-50 кВт·ч/т стали (табл. 1).

Анализ данных (табл. 1) показывает, что длительность плавки под током ($\tau_{\text{пл}}$, мин) при использовании ТКГ снижается в среднем на 8-10 мин за счет повышения расхода окатышей в ванну ($G_{\text{ок}}$, кг/т) и кислорода (Рис. 1, г) на шлаковую ванну с добавкой коксика, причем последнее интенсифицирует режим плавления ЖМО в ванне дуговой печи.

Таким образом, интенсификация процессов электроплавки ЖМО с применением ТКГ, в сравнении с базовыми энерготехнологическим режимом при использовании кислородной фурмы, является более эффективным, т.к. представляется возможным осуществлять регулирование уровня вспененного шлака с экранированием электрических дуг, что заметно повышает теплоусвоение ванны ($\Delta Q_v \rightarrow \max$), интенсифицирует процессы нагрева и обезуглероживания металла, увеличивает расход ЖМО на плавку (табл. 1).

Таблица 1. – Сравнительные данные показателей работы 150 т. дуговой печи при выплавке стали ШХ-15 (числитель) и низкоуглеродистых марок (знаменатель).

Показатели	Интенсификация процесса электроплавки кислородом с применением:	
	Фурмы	ТКГ
Длительность плавки под током $\tau_{пл}$, мин	100/95	85/87
Удельный расход кислорода, м ³ /т	14,5/12,1	30,2/30,73
Удельный расход коксика, кг/т	18/7	13/10,5
Удельный расход окатышей, кг/т	650/640	720/700
Соотношение расходов окатышей и лома $G_{ок}/G_{лом}$	2/1,3	2,1/1,95
Удельный расход извести, кг/т	55/51	68/82,6
Энергозатраты, МДж/т	2482,17/2152	2111,46/2000
Производительность, т/ч	60,96/83,5	75,61/88,5

Однако проблема повышения эффективности процесса электроплавки ЖМО заключается не только в осуществлении согласованности режимов загрузки окатышей в ванну и уровне её теплового состояния, но и в оптимальном соответствии между скоростями загрузки и плавления окатышей по ходу процесса плавки.

Исследование особенностей режима плавления ЖМО в ванне дуговой печи, в зависимости от изменяющихся текущих энерготехнологических факторов процесса электроплавки стали, и является основным предметом настоящей работы.

Во второй главе «Исследование процесса плавления металлизированных окатышей в расплаве методом холодного моделирования» осуществляли на экспериментальной установке, представляющей из себя емкость с водой, которая имитировала расплав металла в дуговой печи с равномерно распределенной подачей снизу воздуха.

Такая подача дутья по всему объему ванны моделировала процесс объемного обезуглероживания металла и перемешивания его в печи. Размеры установки и параметры дутьевого режима рассчитывались по критериям, полученным на основе теории подобия с использованием π -теоремы Бекингема. В результате математических операций, процедур и преобразований получены критерии подобия, характеризующие адекватность

протекающих процессов при плавлении ЖМО на образце и в модели, а также обоснован их физический смысл.

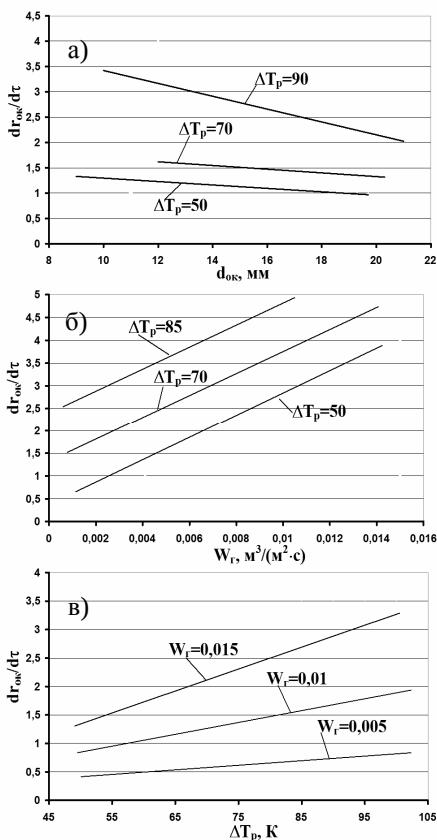


Рис.2. Зависимость скорости изменения радиуса металлизированного окатыша ($dr_{ок}/d\tau$) от диаметра окатыша ($d_{ок}$, мм) (а), приведенного расхода технологического газа ($W_{г}$, $m^3/(m^2 \cdot c)$) (б) и степени перегрева (ΔT_p , °C) (в).

плотность окатыша, $кг/м^3$; текущий радиус окатыша $r_{ок} = d_{ок}/2$, м.

Совместное рассмотрение данных (Рис. 2) и уравнения (3) показывает, что чем больше размер окатыша ($d_{ок}$, м), тем ниже его скорость изменения радиуса и соответственно скорость плавления. Однако, чем выше температура перегрева металла над ликвидусом (ΔT_p) и приведенный расход газа ($W_{г}$), тем больше скорость плавления образцов. Увеличение скорости плавления ($V_{пл} \rightarrow \max$) за счет повышения ΔT_p целесообразно лишь до пределов $50 \leq \Delta T_p \leq 100^\circ C$, т.к. дальнейший рост ΔT_p приводит к существ-

В качестве исследуемых окатышей при моделировании изготовили более 200 шарообразных ледяных шариков и погружали их в воду с разным интервалом времени при различной температуре и расходе воздуха на продувку жидкости снизу.

В результате статистической обработки большого массива (Рис. 2) экспериментальных данных получено уравнение для расчета скорости изменения радиуса окатыша при расплавлении их в ванне в зависимости от следующих значимых факторов:

$dr_{ок}/d\tau \cdot 10^3 = -0,032 \cdot d_{ок} + 3,42 \cdot 10^{-4} \cdot \Delta T_p + 5,38 \cdot W_{г}$, м/с, $R=0,84$; (2) где $d_{ок}$ – диаметр окатыша, мм; ΔT_p – температура перегрева расплава над ликвидусом, К; $W_{г}$ – приведенный расход газа $m^3/(m^2 \cdot c)$.

Скорость плавления ЖМО в ванне дуговой печи (кг/с) равна:

$$V_{пл} = \frac{dm}{d\tau} = \frac{4}{3} \pi \rho_{ок} \left(\frac{dr_{ок}}{d\tau} \right)^3, \quad (3)$$

где m – масса шарообразного окатыша, кг; $\rho_{ок}$ –

венному перерасходу электроэнергии (табл. 1) на процесс электроплавки ЖМО (Рис. 1). Следовательно, важным фактором повышения скорости плавления ($V_{пл}$) является параметр W_{Γ} , характеризующий уровень перемешивания ванны и зависящий от скорости обезуглероживания металла и интенсивности продувки его кислородом.

При этом $W_{\Gamma} = V_{CO} / S_B$, где V_{CO} – объемная скорость выделения пузырей газа в ванне, $м^3/с$; S_B – площадь поверхности ванны на уровне границы раздела шлак-металл, $м^2$.

В дуговой сталеплавильной печи уровень выделяемого технологического газа определяется скоростью обезуглероживания металла (V_c , %C/мин) и текущей металлической массой ванны (G_{τ} , т) и загружаемых в печь окатышей.

$$V_{CO} = 0,01 \left(\frac{22,4}{12} \right) \left(\frac{V_c \cdot G_{\tau}}{60} \right) = 3,1 \cdot 10^{-4} \cdot V_c \cdot G_{\tau}, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (4)$$

Изменение текущей массы металла в ванне печи определяется скоростью загрузки окатышей ($V_{ок}$, кг/с) в печь, т.е. $G_{\tau} = G_0 + \frac{60}{1000} V_{ок} \cdot \tau$, т/мин; где G_0 – масса металла перед началом загрузки окатышей в ванну дуговой печи, т.

С учетом изложенного итоговое выражение для расчета скорости плавления ЖМО, без учета влияния гарнисажной корочки в ванне дуговой печи, можно выразить в следующем виде:

$$V_{пл} = \begin{cases} \frac{dm}{dt} = \frac{4}{3} \pi \rho_{ок} \left(\frac{dr_{ок}}{d\tau} \right)^3, \\ \frac{dr_{ок}}{d\tau} = -0,032 \cdot d_{ок} + 3,42 \cdot 10^{-4} \cdot \Delta T_p + 5,38 \cdot W_{\Gamma}, \\ W_{\Gamma} = \frac{V_{CO}}{S_B} = 3,1 \cdot 10^{-4} \cdot V_c \cdot G_{\tau} / S_B, \\ G_{\tau} = G_0 + V_{ок} \cdot \tau, \\ \Delta T_p = t_m - t_l = t_m - \{1530 \cdot [C]\}; \end{cases} \quad (5)$$

где G_0 и G_{τ} – начальная и текущая масса плавки, кг; $V_{ок}$ – скорость загрузки металлизированных окатышей в печь; t_m и t_l – текущая температура и температура ликвидус стали, °C; S_B – поперечное сечение ванны на границе раздела шлак-металл, $м^2$; $[C]$ – текущее содержание углерода в металле, %.

Анализ опытных данных свидетельствует о том, что на скорость расплавления окатышей в ванне (Рис. 2) существенно влияют теплофизические и гидродинамические характеристики расплава при постоянных размерах окатышей и скорости их загрузки в печь, что указывает на необ-

ходимость определения оптимальных технологических параметров по ходу электроплавки ЖМО.

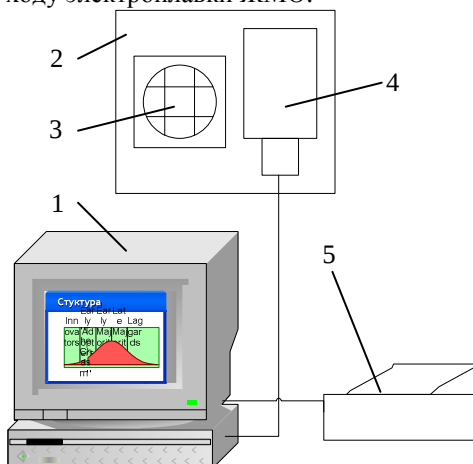


Рис. 3. Экспериментальная установка для исследования структуры образцов (1 – компьютер; 2 – микроскоп МВС-9; 3 – исследуемый образец; 4 – фотокамера Wild Photoautomat MPS 55; 5 – принтер).

В третьей главе «Исследование механизма образования гарнисажной корочки при подаче окатышей в ванну дуговой печи» проведен комплекс экспериментальных исследований в лабораторных и промышленных условиях по изучению механизма образования гарнисажной корочки и последующего плавления металлизированного окатыша в железоуглеродистом расплаве.

Для исследования использовали экспериментальную установку (Рис. 3) в ЦЗЛ ОАО «ОЭМК», включающую в своем составе (Рис. 3) компьютерный блок (1), микроскоп (2) и систему фотообработки (4) результатов исследования опытных шлифов образцов окатышей (3).

с помощью фотообработки (4) результатов исследования опытных шлифов образцов окатышей (3).

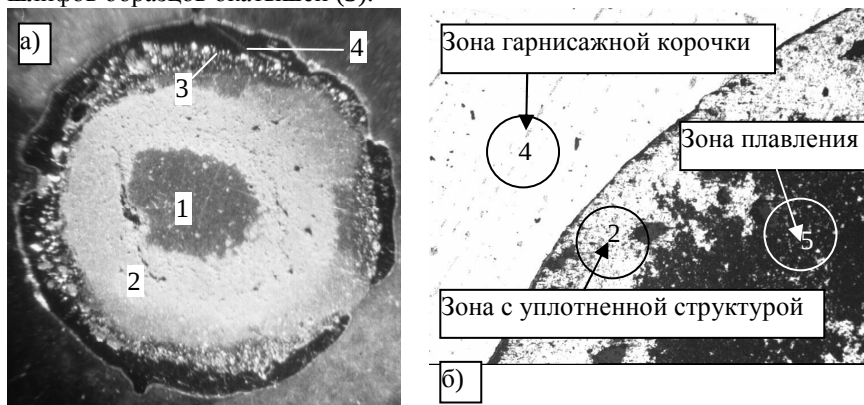


Рис. 4. а) Структура металлизированного окатыша, после погружение в расплав низкоуглеродистой стали (увеличение 4х) : 1 – сердцевина окатыша, 2 – зона с упрочненной структурой, 3 – зона взаимодвижения, 4 – гарнисажная корочка, 5 – зона плавления; б) Структура окатыша при увеличении 100 х.

На рисунке 4 приведены микрофотографии шлифов после погружения окатыша в железоуглеродистый расплав, где четко фиксируется

поверхность раздела между самым окатышем и образовавшейся гарнисажной корочкой (Рис. 4, а).

В образцах нами выявлены (Рис. 4, б) некоторые характерные зоны, образующиеся видимо в момент термического «удара» ЖМО при их погружении в расплав и рассчитаны размеры областей в зависимости от времени нахождения окатыша в расплаве.

Анализом проведенных исследований установлено, что плавление металлизированного окатыша одновременно происходит с двух сторон, т.е. от поверхности образовавшейся корочки к центру окатыша и из центра его к расплаву (Рис. 4, б).

Эти данные подтверждают вывод о том, что роль образовавшейся корочки оказывает существенное влияние на общее время расплавления окатышей в ванне дуговой печи.

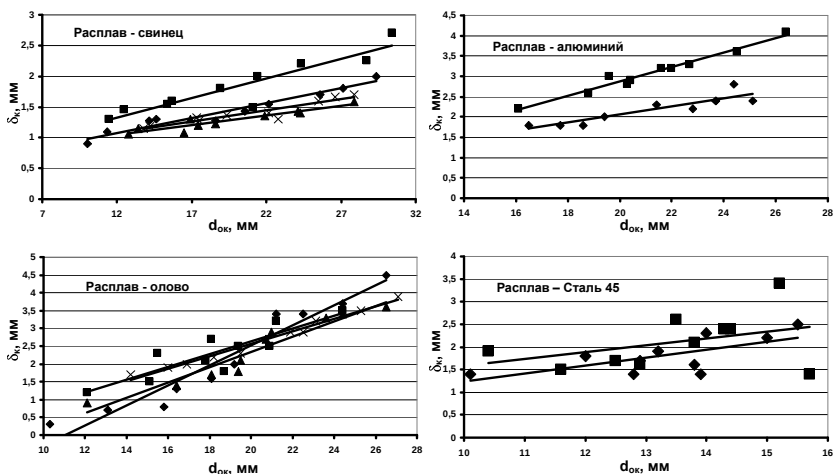


Рис. 5. Экспериментальные зависимости толщины (δ_k , мм) образовавшейся гарнисажной корочки на поверхности шарообразного тела для различных металлов и температуре расплава.

Исследования в лабораторных условиях проводили с целью изучения размеров образующейся гарнисажной корочки на поверхности шарообразного тела при его погружении в расплав в зависимости от теплофизических характеристик материала. Для этого использовали расплавы (Рис. 5) из свинца, олова, алюминия и металлизированных окатышей. Причем из этих же металлов изготовлены были круглые образцы различного диаметра. Далее образцы окатышей погружались в расплав на определенное время, фиксируемое электронным секундомером, при различной температуре. Результаты статистической обработки опытных данных приведены на рисунке 5.

Из анализа данных (Рис. 5) следует, что толщина образовавшейся гарнисажной корочки с ростом температуры расплава, в который погружаются окатыши, уменьшается. Совокупное влияние размера окатыша ($d_{ок}$) и его температуропроводности (a) на толщину корочки (δ_k) выражается зависимостью изменения размеров окатышей от значения критерия Фурье (Fo) (Рис. 6).

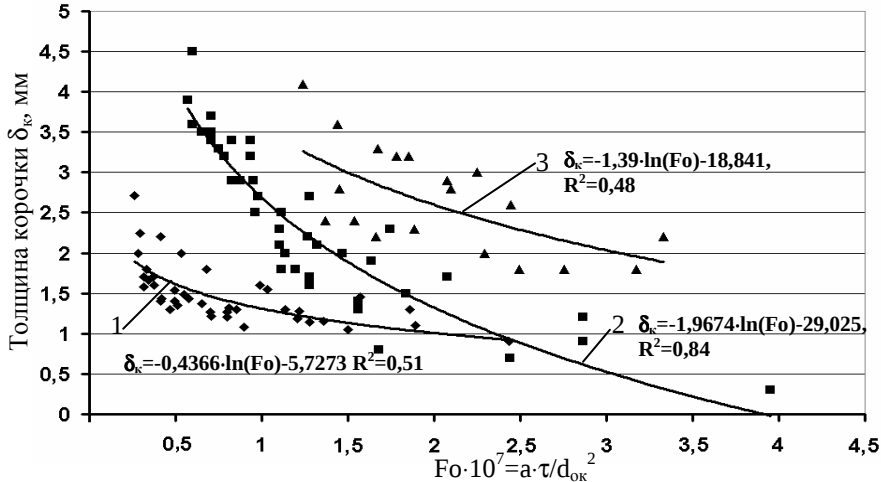


Рис. 6. Зависимость толщины гарнисажной корочки от теплофизических характеристик материала (Fo – критерий Фурье, 1-свинец, 2-олово, 3-алюминий).

Из приведенных на рисунке 6 данных следует, что чем выше коэффициент температуропроводности расплавов, то тем больше величина гарнисажного образования.

По результатам обработки экспериментальных данных получено уравнение зависимости толщины гарнисажной корочки от геометрических и теплофизических характеристик в виде:

$$\delta_k \cdot 10^3 = -0,37 \cdot T_p + 0,428 \cdot d_{ок} - 0,22 \cdot Fo + 0,703 \cdot q_T, \text{ м/с; } R=0,62, \quad (6)$$

где T_p – температура расплава, К; $d_{ок}$ – диаметр образца, м; $Fo = a \cdot \tau / d_{ок}^2$ – критерий Фурье; q_T – удельная теплота плавления окатыша, кДж/кг, a – коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2/\text{с}$.

Следует отметить, что при увеличении q_T и $d_{ок}$ толщина гарнисажной корочки возрастает (Рис. 6), а следовательно время плавления окатыша (Рис. 2) увеличивается.

При одинаковой скорости плавления окатыша в расплаве и его корочки скорость изменения размера окатыша с корочкой будет равна:

$$V_{пл} = \frac{4}{3} \pi \rho_{ок} \frac{d(r_{ок} + \delta_k)^3}{dt^3}, \text{ кг/с, где } \frac{d(r_{ок} + \delta_k)}{dt} - \text{ скорость изменения}$$

размера системы окатыш+корочка (мм/с) рассчитываем по аналогичному

выражению (5), но с учетом предварительного определения значения δ_k по выражению (6).

Далее, в соответствии с уравнением (5), определяем фактическую скорость плавления окатыша с корочкой ($V_{пл}$, кг/с) в зависимости от геометрических и гидродинамических характеристик системы металл-шлак в ванне дуговой печи.

В четвертой главе «Исследование процесса обезуглероживания металла в ванне дуговой печи с изменяющейся массой расплава» экспериментально проанализировали режим окисления углерода в ванне 150 – т дуговой печи при использовании непрерывной подачи металлizedованных окатышей в условиях интенсификации процессов электроплавки кислородом.

Кинетические закономерности процесса обезуглероживания металла изучали в области концентрации углерода менее 1%, т.е. в областях сверх и докритических значений углерода ($[C]<0,15\%$, $[C]\geq 0,15\%$).

Установили, что скорость окисления углерода практически не зависит от его концентрации при содержаниях $[C]$ более $0,2\div 0,3$ и определяет-ся в основном уровнем подвода кислорода в ванну (Рис. 7), т.е.

$$V_C = \frac{1,786 \cdot \eta_C \cdot I_{O_2}}{G_\tau}, \text{ а при значениях } [C]<0,15 \quad V_C = \gamma([C]_0 - [C]_p),$$

%[C]/мин, где η_C – коэффициент использования кислорода на окисление углерода расплава, I_{O_2} – интенсивность продувки металла кислородом м³/мин.

При обработке опытных данных использовали информацию о текущей концентрации углерода в расплаве и содержании кислорода в металле от I_{O_2} :

$$[\%O] = (0,0361 - 0,0126 \cdot I_{O_2}) [\%C]^{-(0,245 + 0,471 \cdot I_{O_2})} \quad (7)$$

Заметное торможение процесса обезуглероживания металла наступает при $[C]<0,15-0,20\%$, а при увеличении расхода кислорода через фурму или ТКГ наблюдается увеличение окисленности шлака ($FeO \rightarrow \max$).

Ниже в таблице 2 приведены расчетные данные кинетических констант процесса окисления углерода в ванне дуговой печи.

Из данных таблицы 2 следует, что при использовании ТКГ, где расход кислорода на продувку ванны примерно в 2 раза больше, чем в сравнении с режимом электроплавки при использовании фурмы, а коэффициент использования кислорода (η_C) на обезуглероживание металла примерно в 5 раз меньше. Это обстоятельство подтверждает вывод о преимущественном расходовании кислорода в первом случае на окисление шлака.

В целях раскисления переоxygenенного шлака ($\Sigma FeO > 20\div 25\%$) при подаче ЖМО в ванну с применением ТКГ подают в потоке кислорода уг-

леродсодержащий материал и присаживают известь, что способствует высокому вспениванию шлака.

Таблица 2 – Показатели параметров режима обезуглероживания металла в ванне дуговой печи при различных способах интенсификации процесса электроплавки стали.

Показатели	Интенсификация процесса с применением фурмы	Интенсификация процесса с применением ТКГ
Коэффициент использования кислорода, η_c	0,85	0,15
Кинетическая константа обезуглероживания, $\gamma, \text{с}^{-1}$	$7,25 \cdot 10^{-4} \pm 8,16 \cdot 10^{-5}$	$7,04 \cdot 10^{-4} \pm 6,48 \cdot 10^{-5}$
Средняя скорость обезуглероживания, %[C]/мин	0,051	0,058
Средняя масса плавки, т	175,51	176,52
Средний расход кислорода на продувку металла, $\text{м}^3/\text{мин}$	21,5	38,12

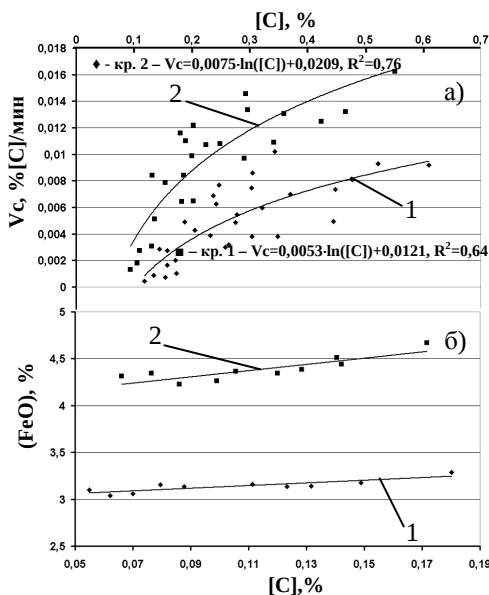


Рис.7. Зависимости скорости обезуглероживания (а) металла и содержания (FeO) в шлаке (б) в 150 т. ДСП от концентрации углерода [C] в расплаве (продувка металла кислородом 1 - при помощи фурмы; 2 – при помощи ТКГ)

Анализ полученных данных показывает, что наиболее эффективным является подача ЖМО в ванну при значениях углерода около 0,2-0,3%, т.е. при повышенных скоростях обезуглероживания металла в условиях интенсивного перемешивания металла пузырями CO и уменьшенной окисленности шлака.

Установлено, что в ванне ДСП в зависимости от содержания углерода в окатышах и жидком металле, наряду с окислением углерода может происходить процесс разбавления расплава углеродом, т.е. наблюдается науглероживание металла. Характеристикой данного процесса является коэффициент использования углерода (ϵ) металлизированных окатышей при

расплавлении их в железоуглеродистом расплаве.

Для контроля процесса изменения концентрации углерода в ванне получена зависимость, характеризующая процесс окисления углерода в металле по ходу электроплавки ЖМО:

$$[C] = \begin{cases} \frac{[C]_0 \cdot G_0 + \varepsilon \cdot C_{\text{ок}} \cdot V_{\text{ок}} \cdot \tau - 2,4\eta_{\text{C}} \cdot n_{\text{O}_2} \cdot \tau}{G_0 + V_{\text{ок}} \tau}, & \text{при } [C] \geq 0,15, \\ \frac{[C]_0 \cdot G_0 + \varepsilon \cdot C_{\text{ок}} \cdot V_{\text{ок}} \cdot \tau - (1 - \exp(-\gamma\tau))([C]_{\text{p}} - [C]_0)}{G_0 + V_{\text{ок}} \tau}, & \text{при } [C] < 0,15; \end{cases} \quad (8)$$

где $[C]$ – текущее содержание углерода в расплаве, %; $[C]_0$ – начальное для какого-то промежутка времени содержание углерода в расплаве, %; G_0 – начальная масса плавки, кг, ε – коэффициент использования углерода металлизированных окатышей железуглеродистым расплавом; $C_{\text{ок}}$ – содержание углерода в металлизированных окатышах, %; $V_{\text{ок}}$ – скорость загрузки металлизированных окатышей в ванну дуговой печи, кг/с; τ – время процесса, с; γ – кинетическая константа процесса обезуглероживания, с⁻¹; $[C]_{\text{p}}$ – равновесное с кислородом содержание углерода в расплаве, %, n_{O_2} – количество молей кислорода, идущее на окисление углерода расплава.

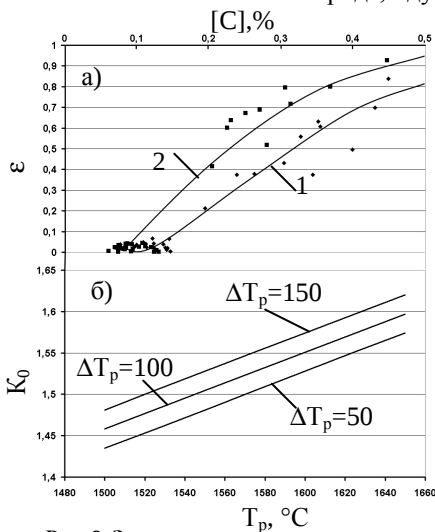


Рис. 8. Зависимость степени усвоения углерода металлизированных окатышей (ε) от концентрации углерода в металле (а) и коэффициента теплового состояния ванны (K_0) от температуры металла (б) и степени его перегрева над ликвидусом (1 – фурма $\varepsilon = -18,798[C]^3 + 16,236[C]^2 - 2,06[C] + 0,0674$; $R^2 = 0,94$; 2 – ТКГ: $\varepsilon = -52,81[C]^3 + 33,88[C]^2 - 3,11[C] + 0,067$; $R^2 = 0,94$).

В зависимости от теплового состояния ванны, расхода кислорода (топлива) на ТКГ и фурму для продувки металла результирующая скорость процессов обезуглероживания, разбавления углерода расплавом и его науглероживание за счет непрерывной подачи МЖО в ванну равна: $V_{\Sigma} = V_C + V_{\text{рн}}$, % $[C]$ /мин. Откуда скорость окисления углерода в металле в ванне дуговой печи $V_C = V_{\Sigma} - V_{\text{рн}}$, где $V_{\Sigma} = ([C]_2 - [C]_1) / (\tau_2 - \tau_1)$, а $V_{\text{рн}} = (\varepsilon \cdot C_{\text{ок}} - [C]_0) \cdot V_{\text{ок}} / (G_0 + V_{\text{ок}} \cdot \tau)$. Значения C_1 и C_2 находим в моменты плавки τ_1 и τ_2 в соответствии с выражением (8) или по данным плавки с частым отбором проб металла на углерод. Из анализа приведенных формул следует, что при $\varepsilon \rightarrow 1$ (Рис. 8) значение $V_{\text{рн}}$ возрастает и при $V_{\Sigma} = \text{const}$ скорость V_C снижается. Поэтому, для повышения

скорости окисления углерода расплава (V_C), требуется интенсифицировать подвод кислорода к фронту реакции.

Экспериментальные данные на (Рис. 8) показывает, что значения ϵ в области концентраций $[C] > 0,15 \div 0,20\%$ более чем на порядок превышают таковые при $[C] < 0,15\%$. Этот факт заметного повышения степени усвоения углерода расплавом при непрерывном плавлении ЖМО в расплаве объясняется более интенсивным кипением ванны при сверхкритических значениях углерода, т.е. когда процесс обезуглероживания лимитируется внешнедиффузионным режимом.

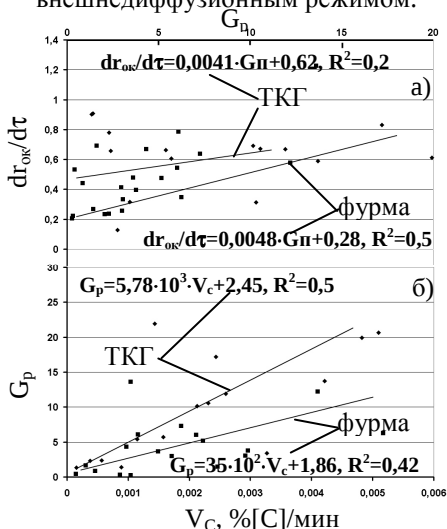


Рис. 9. а) Зависимость скорости изменения радиуса ($dr_{ок}/d\tau$) металлизированного окатыша от критерия перемешивания металлической ванны (G_p); б) Зависимость критерия перемешивания (G_p) расплава от скорости обезуглероживания металла (V_C , $\%[C]/\text{мин}$).

$0,15 < [C] < 0,3\%$, т.е. в условиях близких к периоду самораскипания ванны при обеспечении высокого уровня окисленности и перегрева металла, что создает благоприятные термодинамические условия для зарождения пузырьков СО на поверхности футеровки подины печи.

На рисунке 9 приведены данные, свидетельствующие о влиянии величины критерия перемешивания ванны (G_p) на скорость плавления металлизированных окатышей ($V_{ок}$), которая определяется не только скоростью обезуглероживания металла (Рис. 9), но и зависит от параметров теплового состояния ванны (1).

Из вышеизложенного следует важный вывод о нецелесообразности увеличения расхода ЖМО в ванну ($V_{ок} \rightarrow \max$) при $[C] \leq 0,15\%$ из-за сни-

Анализ данных показывает, что осуществление технологии электроплавки ЖМО в ванне 150 т. дуговой печи для условий ОАО «ОЭМК» не является рациональным, когда по ходу загрузки окатышей в ванну поддерживается концентрация углерода в металле более $0,3\%$ с целью обеспечения максимальной скорости обезуглероживания расплава ($V_C \rightarrow \max$) и уровня перемешивания ванны. Это связано с тем, что потребуется повышать содержание углерода в окатышах, что снижает степень их металлизации, а также при этом приходится увеличивать расход углеродсодержащих материалов в ванну через ТКГ или фурму, что является малоэффективным.

Более рациональным является обеспечение режима электроплавки ЖМО в пределах

жения V_C (Рис. 7) даже при высоких перегревах металла (Рис. 9, б), т.к. в следствии замораживающего эффекта металла снижается скорость плавления окатыша в соответствии с выражением (5) и нарушается равенство $V_{ок}=V_{пл}$, и наоборот, при $[C]>0,15\div0,20\%$ значение $V_C\rightarrow\max$, а перемешивание способствует (Рис. 8) повышению $V_{ок}$ при той же тепловой мощности печи.

Контроль эффективности плавления ЖМО в ванне печи оценивали по критерию перемешивания ванны:

$$G_p = \frac{V_{CO}}{S_b \cdot v_{ж}} \cdot \left(\frac{v_{CO}^2}{2g} \right), \quad (7)$$

где v_{CO} – скорость подъема пузыря CO , м/с; g – ускорение свободного падения; $v_{ж}$ – кинематическая вязкость металла, m^2/c .

С учетом уравнения (4) по определению объемного расхода CO из ванны (V_{CO} , m^3/c) выражение (7) после преобразования имеет вид:

$$G_p = 3,1 \cdot 10^{-4} \cdot \left(\frac{V_c \cdot G_{\tau}}{S_b \cdot v_{ж}} \right) \left(\frac{v_{CO}^2}{2g} \right). \quad (8)$$

Скорость подъема газовых пузырей определяем из термодинамических условий металла в ванне по формуле В.Г. Левича:

$$v_{CO} = \frac{g}{2v_{ж}} \frac{(r^3 - r_0^3)}{r_0}, \quad (10)$$

где r – текущий радиус пузыря CO , м, а радиус зарождающегося пузыря (r_0) на подине, как показал В.А. Григорян, определяется по следующей формуле:

$$r_0 \geq 2\sigma / (p_{атм} + g\rho_m h_m + g\rho_{ш} h_{ш}), \quad (11)$$

где $p_{атм}$ – атмосферное давление, Па; ρ_m – плотность металла, $кг/м^3$; $\rho_{шл}$ – плотность шлака, $кг/м^3$; h_m – высота металла в ванне, м; $h_{шл}$ – высота шлака над металлом, м. Радиус пузыря CO на границе шлак-металл будет равен $r = \frac{2\mu\sigma_m}{[C][O]}$. Здесь σ_m – поверхностное натяжение металла, Н/м;

$\mu = \frac{1}{K_c}$, где $\ln K_c = 4,77 + \frac{2692,5}{T}$ – константа скорости реакции, T – температура металла, К.

Экспериментальные данные, свидетельствуют о достаточно высокой окисленности металла в ванне ДСП. Следовательно, анализ выражений (8) и (10) подтверждает наличие благоприятных условий для обеспечения максимальных значениях V_c и G_p при значениях углерода в пределах $0,15 < [C] < 0,3\%$.

Из анализа опытных данных рисунка 8 следует, что режим электроплавки ЖМО с применением ТКГ является более эффективным, т.к.

параметры G_p и $V_{пл}$ существенно выше. Это связано не только тем обстоятельством, что расход кислорода на ТКГ выше, чем при использовании фурмы (Рис. 1), но и тем, что в первом случае вспениваемость, окисленность (ΣFeO) и высота шлака выше ($h_{ш} \rightarrow \max$), а это в соответствии с уравнением (10) понижает значение r_0 , увеличивает v_{CO} (ур-е 9) и повышает (ур-е 8) параметр G_p , т.е. интенсифицирует режим перемешивания ванны и ускоряет (Рис. 12) процесс плавления ЖМО в печи.

В работе опытным путем установили, что $K_0 = 1,55 \pm 0,05$ для оптимальной области перегрева металла над ликвидусом ($50^\circ C \leq \Delta T_p \leq 100$) и это обстоятельство учитывали при организации рациональной технологии электроплавки с учетом особенностей режима плавления окатышей в ванне дуговой печи.

Таким образом, при значениях $[C] < 0,15\%$ режим плавления окатышей, из-за падения скорости обезуглероживания металла и уменьшения фактора перемешивания ванны пузырьками CO , является менее эффективным, т.к. при этом степень усвоения углерода окатышей заметно ниже (Рис. 9), что уменьшает производительность агрегата.

В пятой главе «Разработка рациональной технологии электроплавки стали на основе синхронизации процессов обезуглероживания, плавления и загрузки окатышей в печь» предусматривается в условиях высокой интенсификации тепловых и технологических процессов путем продувки ванны кислородом осуществлять энерготехнологический режим плавления ЖМО при оптимальных параметрах теплового состояния металлической ванны на основе применения математической модели и алгоритма расчета теплофизических характеристик в окислительный период плавки.

Принцип управления энерготехнологическим режимом электроплавки ЖМО в ванне дуговой печи разработали на основе соблюдения равенства скоростей загрузки ($V_{ок}$, кг/с) и плавления ($V_{пл}$, кг/с) окатышей в любой момент окислительного периода плавки при условии, что фактическое текущее теплосодержание металла $Q_{T(\tau)}^M = K_0 \cdot \Delta H \cdot V_{ок} \cdot \tau$, где K_0 – коэффициент, учитывающий оптимальный перегрев металла в пределах ($50^\circ C \leq \Delta T_p \leq 100^\circ C$) над ликвидусом; ΔH – изменение энтальпии (кВт·ч/т), загружаемых в ванну металлизированных окатышей, за период времени τ , час.

Из принятого условия расход окатышей равен:

$$V_{ок} = 0,28 \frac{Q_{T(\tau)}^M}{K_0 \cdot \Delta H \cdot \tau}, \text{ кг/с} \quad (12)$$

Здесь 0,28 переводной коэффициент из т/ч в кг/с.

Для оценки теплового состояния ванны дуговой печи, где основным источником является электрические дуги, необходимо определить количество тепла, которое в итоге поступает в металлическую ванну с

учетом результирующего потока лучистой энергии (Q_b^p , кВт·ч/т) на поверхность ванны. Кроме того, следует учесть количество тепла, расходуемое на нагрев и плавление ЖМО на границе раздела шлак-металл ($Q_{ок}$, кВт·ч/т) и потери через футеровку дуговой печи.

С учетом изложенного для определения текущего теплосодержания металла по ходу плавки необходимо решать балансовое уравнение следующего вида:

$$Q_{T(\tau)}^M = Q_{T(\tau-1)}^M + Q_b^p - (Q_{шл} + Q_{ок}), \quad (13)$$

где $Q_{T(\tau-1)}^M$ - предыдущее значение теплосодержания металла в момент времени $\tau-1$, кВт·ч/т. За период времени от $\tau-1$ до τ результирующий тепловой поток на ванну (Q_b^p , кВт·ч/т) с учетом потерь тепла ($Q_{шл}$ и $Q_{ок}$) равен $Q_{T(\tau)}^M - Q_{T(\tau-1)}^M$.

Нагрев расплава в дуговой печи осуществляется в первую очередь за счет мощности трех электрических дуг (P_i , кВт), вычисляемое по выражению:

$$P_i = U_d \cdot I_d = (U_\phi^2 - (I_d \cdot x)^2 - I_d \cdot R) \cdot I_d, \quad (14)$$

где U_d - напряжение на дуге, В; I_d - ток дуги, А; x - реактивное сопротивление, Ом, а U_ϕ - вторичное фазовое напряжение трансформатора, В.

В работе приняли, что на дуги, горящие в ДСП, оказывают экранирующее влияние вспененный шлак при работе ТКГ, электрод и углубление под дугой в жидком металле.

В рабочем пространстве дуговой печи преобладает лучистый теплообмен, т.к. большая часть энергии выделяется высокотемпературными электрическими дугами в виде излучения. Распределение плотности потоков по поверхности стен, свода и ванны зависит от тепловых, электрических и геометрических параметров дуг и рабочего пространства печи.

В диссертационной работе на основе математической модели разработан алгоритм (Рис. 10) и программа расчета распределения плотности результирующего теплового потока от трех дуг на поверхность шлака. Программа составлена и написана на m- языке системы «MatLAB».

В работе показано, что при одной и той же длине дуги и мощности дуги увеличение степени экранирования заметно снижает величину падающего потока на поверхность шлака. Естественно, это благоприятно сказывается на нагреве ванны ($Q_{T(\tau)}^M \rightarrow \max$), т.к. значение $Q_b^p \rightarrow \max$, что ускоряет процесс плавления ЖМО в ванне при заметном снижении потерь тепла через футеровку печи ($Q_{пот}^\phi \rightarrow \min$). Причем значение $Q_{пот}^\phi$ учитываем с помощью коэффициента отражения (R) в результирующих тепловых потоках в рабочем пространстве ДСП. Моделированием установлено, что режим плавления ЖМО в ванне осуществляется в объеме

переходной зоны границы раздела шлак-металл и в существенной мере (Рис. 2) зависит от уровня теплопитания (табл. 1) ванны, определяемый значением результирующего теплового потока (Q_b^p) на ванну, порядок расчета которого приведен на рисунке 10.

Естественно, при $Q_b^p \rightarrow \max$ возрастает (у-ние 13) текущее значение теплосодержания металла ($Q_{T(\tau)}^m \rightarrow \max$), что повышает среднюю температуру металла в ванне печи в соответствии с уравнением $T_m = Q_{T(\tau)}^m / (\bar{c}_m \cdot G_\tau)$.

Основные блоки расчета Q_b^p отражены на рисунке 10. Особенно, расчет тепловых потоков заключается в нахождении непрерывной функции распределения плотности результирующего теплового потока, падающего на поверхность зеркала ванны.

Теоретические данные, анализ выражения (5) и данные рисунка 8 показывают, что процессы плавления и усвоения ЖМО расплавом характеризуются совокупностью тепломассообменных процессов, содержанием углерода в окатыше, температурой металла, интенсивностью теплового питания ванны.

Следовательно, можно полагать, что звеном, контролирующим скорость диффузионного плавления $V_{пл}$ (м/с) окатыша, являются как внешняя массоотдача, так и внутренняя диффузия, а также характеристики теплообмена и коэффициент массоотдачи (β) в расплаве:

$$\beta = \frac{Sh}{r_{ок} \cdot D_c} = \frac{0,37 \cdot G_p^{0,81} \cdot Sc^{0,22}}{r_{ок} \cdot D_c} = \frac{0,37 \cdot Sc^{0,22}}{r_{ок} D_c} \left[\frac{V_{co}}{S_b \cdot v_{ж}} \cdot \left(\frac{v_{co}^2}{2g} \right) \right], \quad (15)$$

где $Sc = v_{ж}/D_{ж}$ – критерий Шмидта, характеризующий физические свойства расплава; $Sh = \beta \cdot r_{ок}/D_c$ – критерий Шервуда для диффузии в твердой фазе (окатыше); $D_{ж}$ и D_c – коэффициенты диффузии углерода в железоуглеродистом расплаве и в твердой фазе, м²/с; $v_{ж}$ – кинематическая вязкость расплава, м²/с.

Из анализа выражения (15) следует, что на массообменные характеристики в системе окатыш-расплав существенное влияние оказывает критерий перемешивания ванны (G_p), который в свою очередь определяется скоростью окисления углерода, т.е. интенсивностью барботажной ванны. Следовательно, в этих условиях представляется возможным увеличивать расход окатышей ($V_{ок} \rightarrow \max$) синхронно со скоростью их плавления без обеспечения высокой степени перегрева металла ($\Delta T_p < 75^\circ C$), а уровень теплопитания ванны в системе электрические дуги-окатыш-расплав регулировать в соответствии с уравнением (12).

Следовательно, при постановке задачи увеличения производительности печи путем увеличения скорости загрузки окатышей в ванну ($V_{ок} \rightarrow \max$) на процесс, требуется выбор такого режима электроплавки

ЖМО, который обеспечивал бы реализацию предельных скоростей плавления металлизированного сырья с получением готового металла высокого качества при высоких технико-экономических показателях производства.

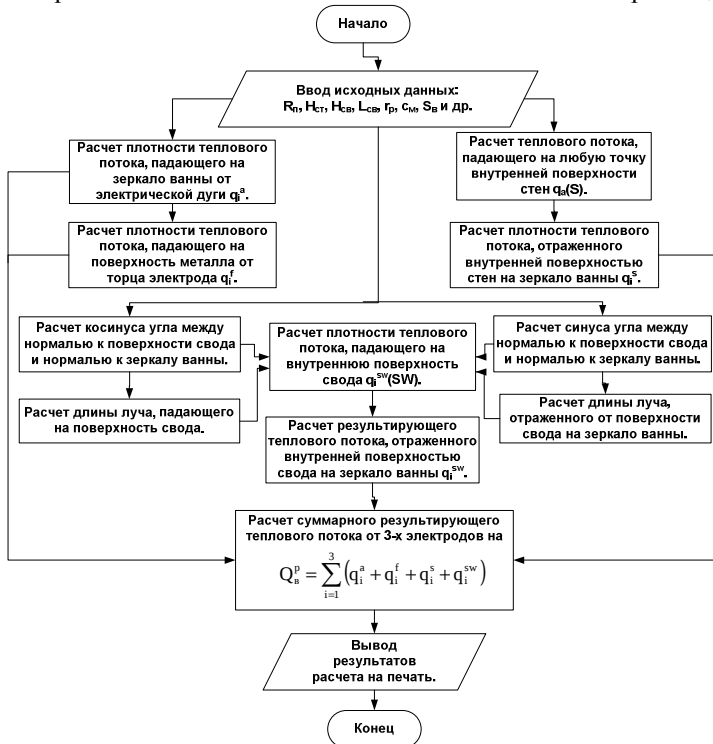


Рис. 10. Блок-схема алгоритма расчета результирующего теплового потока от электрических дуг на поверхность расплава с учетом отражения потоков от свода и стен в рабочем пространстве агрегата.

Как было отмечено выше, для обеспечения рациональной технологии электроплавки окатышей в ванне дуговой печи необходимыми являются условия при которых $V_{ок} = V_{пл}$ по ходу процесса (Рис. 11), $V_c \rightarrow \max$ при $[C] = 0,2 \div 0,3\%$ и параметры теплового состояния ванны ($Q_{T(t)}^m$, Q_v^p , ΔT_p) отвечают значениям степени перегрева металла над ликвидусом в пределах $50 \div 100^\circ\text{C}$.

На основе математической модели (Рис. 10) расчета лучистых тепловых потоков в рабочем пространстве 150 т. дуговой печи, включающей в себя уравнения для описания радиационного теплообмена в рабочем пространстве печи, а также уравнение для определения результирующего теплового потока на ванну печи, был разработан алгоритм (Рис. 11) решения поставленной задачи. При этом, алгоритм (Рис. 11) включает в себя блоки расчета параметров загрузки окатышей (блок А) в ванну, определе-

ния скорости плавления ЖМО (блок Б) и расчета параметров теплового состояния (блоки А и В) ванны, а регулирующие воздействия на электрические, тепловые и рабочие характеристики ДСП осуществляются с помощью блоков С, Д, Е с целью осуществления рационального хода технологии плавки на основе синхронизации процессов плавления и загрузки ЖМО, а также обезуглероживания и нагрева металла.

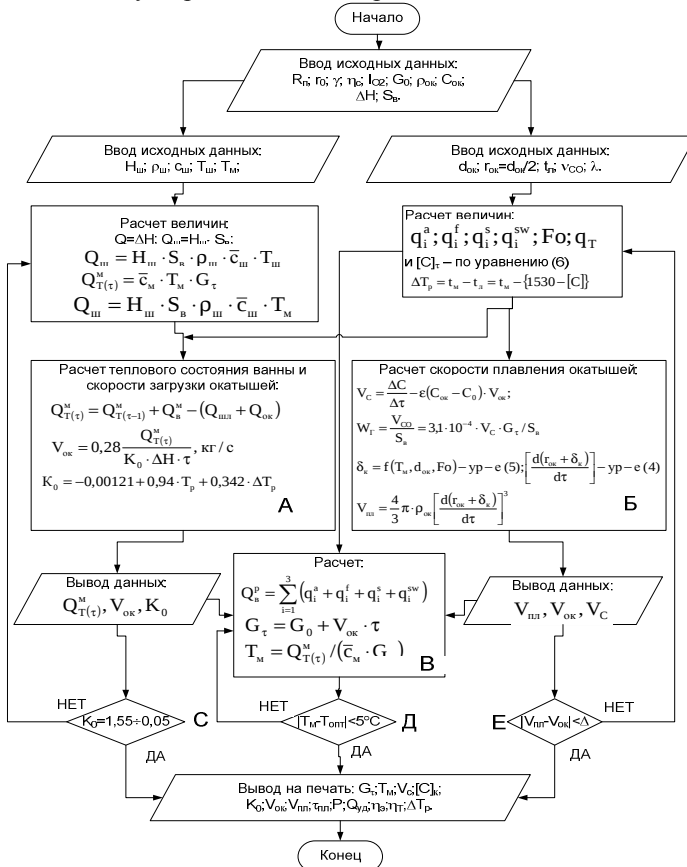


Рис. 11. Обобщенный алгоритм и функциональная схема управления режимом загрузки ЖМО в ванну дуговой печи на основе учета скорости плавления окатышей, режима обезуглероживания металла и параметров теплового состояния ванны агрегата. (А, Б, С, Д, Е – функциональные блоки системы управления).

Так, например, корректировка в системе управления (блок Е) загрузкой окатышей ($V_{ок}$) относительно фактической скорости их плавления ($V_{пл}$) осуществляется воздействием на тепломасообменные характеристики процесса (блок Б), т.е. путем изменение параметров $W_{Г}$, $G_{р}$, $V_{с}$ или $V_{ок}$ с помощью изменения режима работы ТКГ или кислородной фурмы, а также изменением электрических характеристик агрегата или режимом

загрузки ЖМО в ванну. При этом, параметр теплового состояния ванны K_0 (блок Д) поддерживают (табл. 3) на оптимальном уровне путем изменения результирующего теплового потока Q_b^B (блок В) с помощью модели (Рис. 10). Этим самым осуществляется расчет (блок В и Д) текущей температуры металла (T_m , °С) и сравнивается с оптимальной температурой металла для данного момента электроплавки.

Таким образом, предложенная модель (Рис. 10) и алгоритм расчета (Рис. 11) параметров энерготехнологического режима электроплавки ЖМО в ванне дуговой печи позволяет осуществлять принцип управления процессом на основе равенства $V_{ок}$ и $V_{пл}$, с определением параметров теплового состояния ванны, электрических и технологических характеристики, а также технико-экономических показателей процесса электроплавки.

Анализ большого массива опытных данных (табл. 3) работы 150 т. ДСП с применением трех режимов плавления ЖМО в ванне показал, что при соблюдении рекомендуемой рациональной технологии электроплавки ЖМО (Рис. 11) показатели процесса (режим I, табл. 3) значительно превышают таковые при других режимах, отличающиеся от данной технологии.

Таблица 3. – Техничко-экономические, теплотехнологические показатели электроплавки ЖМО в ванне 150 т. ДСП.

Показатели	Режимы электроплавки		
	I	II	III
	$V_{ок}=V_{пл}$	$V_{ок}>V_{пл}$	$V_{ок}<V_{пл}$
Производительность печи, т/час	75	73,5	70
Удельный расход электроэнергии, МВт/т.	550	580	570
Время плавки под током, мин	83	85	91
Расход кислорода на ТКГ, м³/т	28	30	26
Расход топлива на ТКГ, м³/т	2	2	2
Удельный расход ЖМО, кг/т ($G_{ок}/G_{пл}$)	720	730	700
Коэффициенты η/η_T	0,85/0,83	0,84/0,82	0,86/0,8
$K_0 = \bar{c}_m \cdot t_m / (\bar{c}_d \cdot t_d)$	1,55	1,59	1,52
Энергозатраты на плавку, МДж/т	1900	2100	2150
Количество плавков	12	11	8

Установлено, что в этих условиях при соблюдении всех параметров рекомендуемого режима плавки (Рис. 11) происходит (табл. 3) увеличение расхода электроэнергии и производительности печи, а также повышается энергетический (η_e) и тепловой (η_T) КПД нагрева ванны с одновременным снижением времени плавки под током и энергозатрат на технологический процесс.

Опытные данные показали, что применение (табл. 1) в технологии электроплавки ЖМО топливно-кислородных горелок интенсифицирует подогрев металла не только за счет использования топлива и коксика в сочетании с расходом кислорода на продувку ванны, но и способствует обеспечению достаточно высокого уровня окисленности и вспенивания

шлака, что позволяет осуществлять энерго - технологический режим плавки с заглублением электрических дуг во вспененный шлак и тем самым достигнуть высоких энергосберегающих условий электроплавки железорудных металлизированных окатышей.

Основные выводы

1. В результате выполненных исследований в лабораторных и промышленных условиях установили закономерности электроплавки ЖМО в ванне ДСП, с учетом образования гарнисажной корочки на поверхности окатыша, при его попадании в расплав и опытным путем впервые обоснована актуальность применения режима загрузки окатышей в печь синхронно со скоростью их плавления при значениях углерода в пределах от 0,15 до 0,3% при оптимальном уровне теплового состояния ванны.

2. На основе метода физического моделирования разработана методика и установка для определения скорости плавления металлизированных окатышей в ванне дуговой печи с учетом размера окатышей, степени перегрева расплава над ликвидусом и параметров гидродинамики сталеплавильной ванны.

3. Исследован механизм образования гарнисажной корочки на поверхности металлизированного окатыша при его попадании в железоуглеродистый расплав, а также получено уравнение для определения толщины гарнисажа в зависимости от теплофизических характеристик материала, температуры расплава и удельной теплоты плавления. Установлено, что размеры гарнисажной корочки существенны и ее необходимо учитывать при расчете времени плавления окатыша. Так, по результатам экспериментов время плавления окатыша составляет от 14 до 18 с., а с учетом корочки оно больше на 15-20%.

4. Рассмотрены особенности процесса обезуглероживания сталеплавильной ванны при непрерывной подаче металлизированных окатышей в ванну дуговой печи. Определены основные константы процесса для условий ЭСПЦ ОАО «ОЭМК» при двух вариантах продувки металла кислородом, т.е. при использовании погружной водоохлаждаемой фурмы и с применением топливно-кислородных горелок. При этом, получено уравнение для расчета концентрации углерода в ванне дуговой печи при докритических ($[C] < 0,15$) его концентрациях. Установлена зависимость коэффициента использования углерода расплавом от основных факторов, влияющих на процесс.

5. Аналитически получено уравнение для учета результирующего теплового потока от электрических дуг на поверхность шлака, с учетом отражения лучистых потоков от свода и стен печи в окислительный период расплавления ЖМО в ванне дуговой печи по закону Ламберта. Несомненным преимуществом данного уравнения является получение непрерывной зависимости плотности теплового потока, что повышает точность расчета.

6. Разработан принцип оптимального управления загрузкой металлизированных окатышей в ванну дуговой печи, на основе соблюдения равенства скорости загрузки и скорости плавления ЖМО, с учетом согласованного хода процесса нагрева и обезуглероживания металла в оптимальной области перегрева расплава над ликвидусом.

7. Разработана математическая модель, алгоритм и программа расчета на ЭВМ распределения тепловых потоков в рабочем пространстве ДСП, позволяющая определять текущие значения результирующего теплового потока на ванну и теплосодержание металла, что обеспечивает при экранировании электрических дуг в шлаке эффективное управление энерготехнологическим режимом электроплавки.

8. Предложена рациональная технология электроплавки ЖМО с контролем температуры металла, степени перегрева ванны и параметров энерготехнологического режима в условиях интенсификации процесса топливно-кислородными горелками. Опытным путем установлено, что применение рекомендуемой технологии плавки ЖМО позволяет сократить до 10% длительность плавки снизить на 35 кВт·ч/т удельный расход электроэнергии, а также повысить скорость загрузки ЖМО в ванну до 35 кг/(т·МВт) и повысить производительность печи примерно на 7%.

Основные материалы диссертации опубликованы в работах:

1. Федина В.В., Гришин А.А., Харламов Д.А., Стадничук А.В., Свириденко С.Б. Оптимизация процесса электроплавки металлизированных окатышей в дуговой сталеплавильной печи. Труды XXIII Российской школы «Наука и технологии» М.: РАН г. Миасс 2003 г. с. 68.

2. Меркер Э.Э., Федина В.В., Гришин А.А. Исследования процессов электроплавки металлизированного железорудного сырья в дуговой печи. Успехи современного естествознания №7, 2003г., с. 65-66.

3. Меркер Э.Э., Федина В.В., Бартенева О.И., Гришин А.А. К вопросу о диффузионном механизме плавления железорудных окатышей в сталеплавильной ванне. В сборнике тезисов докладов «Физические свойства металлов и сплавов». Екатеринбург 2003 с.147-149.

4. Гришин А.А., Меркер Э.Э., Бартенева О.И., Федина В.В., Филипчук А.С. Анализ факторов, влияющих на плавление металлизированных окатышей в шлаковой ванне дуговой печи. В журнале «Восточно-Европейский журнал передовых технологий», ISSN 1729-3774, 7 (1), 2004 г., с. 7-11.

5. Меркер Э.Э., Кочетов А.И., Кожухов А.А. Федина В.В., Гришин А.А. Исследование переходной зоны шлак – металл в ванне дуговой печи на холодной модели. Изв. Вуз. Черная металлургия. №1, 2005 г. с. 24-26.

6. Гришин А.А., Меркер Э.Э., Кочетов А.И. Исследование механизма плавления металлизированных окатышей в ванне дуговой печи с учетом влияния корочки. Изв. Вуз. Черная металлургия. №1, 2006 г. с. 69-70.

7. Гришин А.А. Особенности обезуглероживания металла при непрерывной подаче металлизированных окатышей в ванну дуговой печи. Изв. Вуз. Черная металлургия, №11, 2006 г. с. 62-63.

Научное издание

Гришин Андрей Анатольевич

**Исследование режима плавления металлизированных окатышей
в ванне дуговой печи с целью интенсификации
процесса электроплавки стали**

Автореферат

Технический редактор: Н.И. Иванова

Подписано в печать 30.10.2006. формат 60х90 1/16

Гарнитура Times. Усл. печ. листов 1,4

Тираж 100 экз. заказ 223 от 31.10.2006

Отпечатано с авторского оригинала в отделе оперативной печати
Старооскольского технологического института.
309516 г. Старый Оскол, м-он Макаренко, 40.