

Черменев Евгений Александрович

**Исследование процессов нагрева и плавления окатышей в
ванне дуговой печи с целью повышения
энергоэффективности электроплавки стали**

05.16.02 – «Металлургия черных, цветных и редких металлов»

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2014

Работа выполнена на кафедрах «Металлургия и металловедение» Старооскольского технологического института (филиала) и «Металлургия стали и ферросплавов» Национального исследовательского технологического университета «МИСиС».

Научный руководитель

доктор технических наук,
профессор

Меркер Эдуард Эдгарович

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки РФ,
ФГБОУ ВПО «Московский
государственный
машиностроительный университет
(МАМИ)»,
профессор

Еланский Геннадий Николаевич

кандидат технических наук,
ЗАО «Союзтеплострой Инжиниринг»,
заместитель директора по
проектированию и науке

Ибадуллаев Тимур Бахтиярович

Ведущая организация

ФГАОУ ВПО «Уральский
федеральный университет
имени первого Президента
России Б.Н. Ельцина»

Защита состоится «23» октября 2014 года в 10:00 часов 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 и на сайте Национального исследовательского технологического университета «МИСиС» - <http://misis.ru>.

Отзывы на автореферат диссертации (в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения) просьба направлять по адресу: 119049, г. Москва, Ленинский проспект, д. 4, Ученый Совет. Копии отзывов можно прислать на e-mail: evg.chermenev@gmail.com.

Автореферат разослан «__» _____ 2014 года.

Ученый секретарь

диссертационного совета,

кандидат технических наук, доцент А.В. Колтыгин

Общая характеристика работы

Актуальность работы

Для современного развития электросталеплавильного производства с применением технологии переплавки железорудных металлизированных окатышей (ЖМО) в дуговых печах важным остаются проблемы достижения высоких технико-экономических показателей, повышения качества металлопродукции и снижения энергоемкости производства.

Одним из перспективных направлений производства электростали в дуговых сталеплавильных печах (ДСП) является применение непрерывной подачи ЖМО в ванну агрегата через осевые отверстия электродов в пространство высокотемпературных электрических дуг и на поверхность расплава под их воздействием, что является существенным отличием от типовой технологии электроплавки стали. В этой связи представляется актуальным и целесообразным изучить закономерности совместного протекания процессов нагрева и плавления окатышей в сложной многофазной системе дуга-шлак-металл, проанализировать физико-химические и тепло-массообменные особенности плавления потока ЖМО в шлако-металлической ванне печи, разработать математическую модель и алгоритм оптимального управления параметрами хода электроплавки стали.

Цель работы: разработка теоретических основ и обоснование эффективности технологии электроплавки стали на основе применения непрерывной подачи металлизированных окатышей через осевые отверстия электродов в подэлектродное пространство ванны дуговой печи.

Основные задачи:

1. Выполнить экспериментальные исследования на горячей модели с анализом теплообмена в системе дуга-расплав, процессов нагрева и плавления ЖМО в ванне печи при их подаче через осевое отверстие электрода.

2. Изучить процессы распределения и усвоения тепла в системе дуга-расплав, окисления углерода металла, нагрева и плавления ЖМО в условиях их подачи в подэлектродное пространство ванны дуговой печи.

3. Разработать математические модели теплового состояния шлако-металлической ванны ДСП, процесса обезуглероживания при подаче ЖМО и использовании ТКГ, а также нагрева и плавления окатыша в агрегате.

4. Выполнить, используя полученные математические модели, расчет теплового состояния и внешнего теплообмена, анализ распределения температур в объеме шлако-металлической ванны и оценку угара железа с поверхностей менисков и параметров режима плавления окатыша, при различных условиях его подачи в ванну дуговой печи.

5. Исследовать процессы электроплавки стали при подаче ЖМО в подэлектродное пространство ванны 150 т дуговой печи для осуществления оптимального управления параметрами температурно-шлакового и энергетического режимов с обеспечением энергоэффективности и ресурсосбережения.

Научная новизна:

1. Показано, что подача металлизированного сырья через осевые отверстия электродов существенно ускоряет процессы нагрева и плавления потока окатышей, при этом трубчатые (полые) электроды используются в качестве элементов оборудования дуговой печи для непрерывной загрузки сыпучих материалов в объем электрических дуг и зону высокотемпературного шлако-металлического расплава, которая отвечает требованиям интенсификации процессов плавки, при этом энергетически положительная роль электродов заключается в том, что дуги, образующиеся на выходе из отверстий в их торцах, становятся массивнее, занимают вертикальное положение и их мощность повышается, что способствует увеличению удельной скорости нагрева расплава ванны в подэлектродном пространстве агрегата.

2. Уточнены закономерности по кинетике и механизму нагрева и плавления металлизированных окатышей при их подаче на шлак и перегретый металл с образованием соответственно шлаковой и металлической корочки, теплоемкость последней в 2-3 раза ниже и это обстоятельство способствует существенному ускорению режима их плавления в подэлектродном пространстве ванны печи на поверхностях менисков жидкого металла, причем оптимальный ход технологического процесса плавления потока сырья осуществляется в соответствии с данными, полученными по расчету температурных полей расплава и использованием разработанной математической модели теплового состояния ванны печи.

3. Предложена комплексная математическая модель, включающая описание теплового состояния шлако-металлической ванны, процесс обезуглероживания металла, нагрев и плавление окатышей, загружаемых в печь, позволяющая определять энерготехнологические показатели работы агрегата и управлять режимом плавки. При этом установлена положительная роль регулируемой подачи материалов в подэлектродное пространство печи, что обеспечивает энергосбережение, повышение производительности агрегата и увеличение выхода годного металла.

Практическая значимость и реализация работы

Полученные в работе научные результаты по распределению тепловых потоков в шлако-металлической ванне, режиму обезуглероживания при непрерывной подаче окатышей, а также механизму и кинетике их плавления использованы для разработки оптимальных температурно-шлакового и энергетического режимов плавки стали, позволяющих существенно снизить энергоемкость и пылевыведение из ванны, повысить энергетический КПД, производительность и выход годной жидкой стали.

Обоснован энергосберегающий режим переплавки ЖМО в 150 т ДСП для условий ОАО «ОЭМК», при непрерывной их подаче через осевые отверстия электродов в подэлектродное пространство ванны, позволяющий существенно снизить угар металла и повысить энергоэффективность электроплавки стали.

Разработан новый способ подачи и предложено устройство для регулируемой загрузки ЖМО, извести и других сыпучих материалов в подэлектродное пространство дуговой печи, в том числе и под давлением газовых смесей, позволяющие реализовать предложенные в работе научно-технические решения по повышению эффективности электроплавки стали.

Разработан алгоритм и программа расчета основных показателей энерготехнологического режима электроплавки ЖМО на основе учета данных их непрерывной загрузки, параметров теплового состояния ванны, процессов нагрева и обезуглероживания металла в условиях применения ТКГ при подаче окатышей, как в подэлектродное, так и в межэлектродное пространство, что позволяет осуществлять контроль параметров процесса плавки стали в дуговой печи, для соблюдения рекомендуемой рациональной технологии электроплавки стали, и тем самым обеспечить повышение технико-экономических и энерготехнологических показателей производства.

Установлено, что для условий 150 т ДСП при способе загрузки окатышей через осевые отверстия электродов удельный расход электроэнергии снижается от 3 до 5 %, производительность печи возрастает до 10%, время плавки под током уменьшается на 10-14%, а выход годного увеличивается на 1,2%.

Методы исследования: При выполнении работы использовались методы математического моделирования и усовершенствованные методы расчета и анализа лабораторных экспериментов.

Достоверность результатов работы

Достоверность подтверждается: опытными данными, полученными в лабораторных условиях, с применением компьютерной обработки; достаточной сходимостью лабораторных экспериментов (расхождение менее 10%) с литературными и производственными данными; адекватностью математических моделей.

Текст диссертации и автореферата проверен на отсутствие плагиата с помощью программы «Антиплагиат» (<http://antiplagiat.ru>).

Апробация результатов работы

Основные положения и результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на 3-й всероссийской научно-практической конференции «Моделирование, программное обеспечение и наукоемкие технологии в металлургии» (г. Новокузнецк, 2011г.); 7-й региональной научно-практической конференции «Дни науки СТИ НИТУ МИСиС» (г. Старый Оскол, 2011г.); 8-й международной научно-технической конференции «Современная металлургия начала нового тысячелетия» (г. Липецк, 2011г.); всероссийской научно-практической конференции «Образование, наука, производство и управление» (г. Старый Оскол, 2011г.); 8-й всероссийской научно-практической конференции (г. Старый Оскол, 2012г.); VI международной научно-практической конференции «Энергосберегающие технологии в промышленности. Печные агрегаты. Экология» (г. Москва, НИТУ МИСиС, 2012г.).

Публикации. По наиболее важным материалам диссертационной работы имеется 19 публикаций в центральных и региональных изданиях, в том числе 6 статей в цитируемых журналах, входящих в перечень ВАК.

Структура и объем работы

Работа состоит из введения, пяти глав, заключения, библиографического списка из 119 наименований и приложений, содержащих 155 страниц печатного текста, 103 иллюстрации и 21 таблицу.

На защиту выносятся:

- результаты экспериментальных исследований по изучению теплообмена электрических дуг и процессов нагрева и плавления ЖМО при их подаче через осевое отверстие электрода;
- теоретические положения по распределению и усвоению тепла в системе электрическая дуга-расплав, процессам теплоусвоения, нагрева, обезуглероживания расплава и их оптимальному соотношению, нагреву и плавлению ЖМО, в условиях подачи окатышей через осевые отверстия электродов в подэлектродное пространство ванны дуговой печи;
- методики расчетов теплового состояния ванны ДСП с учетом способа подачи окатышей, параметров режима обезуглероживания при непрерывной подаче ЖМО и использовании ТКГ, нагрева и плавления окатыша в условиях влияния излучения электрической дуги;
- результаты расчетов теплового состояния ванны и плавления окатыша в системе дуга-шлак-металл и анализ теплообмена при подаче ЖМО в подэлектродное пространство дуговой печи;
- энергосберегающий режим переплавки ЖМО в 150 т ДСП на основе учета в математической модели управления плавкой кинетики процессов обезуглероживания, нагрева металла и плавления окатышей, и разработка оптимальной технологии электроплавки стали путем синхронизации режимов обезуглероживания, плавления и загрузки окатышей в ванну дуговой печи.

Содержание работы

Во введении показана актуальность нового научно-технического направления развития технологии электроплавки стали в дуговых печах с применением металлizedованного сырья и ТКГ. Существенный интерес к данной проблеме подтверждается исследованиями зарубежных и отечественных авторов работ и наличием патентов на изобретения.

Отмечена и обоснована перспективность проблемы и показаны пути совершенствования технологии электроплавки стали на основе интенсификации процессов нагрева и плавления окатышей при создании системы их загрузки в пространство под электродами печи, где электрические дуги оказывают воздействие на шлаковый и металлический расплав. Определен комплекс необходимых экспериментов для выполнения научно-технических решений, сформированы актуальные предпосылки и задачи исследования.

В первой главе «Состояние вопроса, задачи и методика исследования» дается развернутая характеристика особенностей процессов электроплавки металлizedованных окатышей в ванне дуговой печи, в частности на примере 150 т печей ОАО «ОЭМК», и других зарубежных и отечественных агрегатов. В целях

разработки энергосберегающих условий электроплавки стали требуется проведение исследований по углубленному изучению закономерностей нагрева, плавления и обезуглероживания окатышей в расплаве с учетом применения нового метода подачи ЖМО через осевые отверстия электродов в высокотемпературную зону электрических дуг на ванне печи (рис. 1). Схема подачи ЖМО в ванну ДСП в подэлектродное пространство, в зону влияния электрических дуг, существенно отличается от существующей схемы подачи в межэлектродное пространство, т.е. вне их влияния. Так принципиальным является более рассредоточенная подача потока ЖМО по осевым отверстиям в трех электродах и поступление металлизированного сырья вне шлака в электрические дуги с дополнительным нагревом в них и последующим плавлением в высокотемпературном шлако-металлическом расплаве подэлектродного пространства дуговой печи.

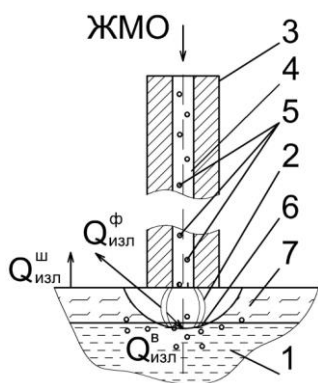


Рис. 1. Схема подачи ЖМО через осевое отверстие электрода: 1 – металл; 2 – электрическая дуга; 3 – электрод; 4 – осевое отверстие; 5 – окатыш; 6 – мениск; 7 – шлак; $Q_{изл}^в$, $Q_{изл}^ф$ и $Q_{изл}^ш$ – потоки излучения дуги на ванну и футеровку (стены, свода), и излучения шлака

Результаты обработки опытных данных работы 150 т дуговой печи и эксперименты показали, что существенным резервом по снижению энергозатрат и повышению эффективности производства является применение ТКГ с обеспечением рациональных условий хода электроплавки стали, т.е. нагрева (v_t , К/мин) и обезуглероживания (v_c , %[C]/мин) металла, степени его перегрева (Δt , К), оптимального соотношения $v_t/v_c = 119 \pm 7$ К/%[C] (соответствует $\Delta t = 75 \pm 15$ К), требуемых по технологии параметров шлакового режима т.е. его вспенивание с погружением электрических дуг (при $H_{шл} > L_d$, где $H_{шл}$ – толщина шлака, м; L_d – длина дуги, м), $v_c > 0,01$ %[C]/мин, окисленности $15\% < (FeO) < 25\%$ и температуры $T_{шл} > 1853$ К при соблюдении равенства скорости плавления ($v_{пл}$, кг/с) и загрузки ЖМО в ванну ДСП ($v_{ок}$, кг/с). Это позволяет увеличить теплоусвоение ванны:

$$\Delta q_v = \frac{Q_v}{\tau} = G_\tau c_m \left(\frac{\partial T_m}{\partial \tau} \right) = (G_0 + v_{ок} \tau) c_m v_t, \text{ кВт}, \quad (1)$$

где Q_v – текущее теплосодержание ванны, кДж; G_τ и G_0 – текущая и начальная масса металла в ванне, кг; c_m – теплоемкость металла, кДж/(кг·К); $v_{ок}$ – расход окатышей, кг/с; τ – время, с.

Экспериментальные данные и анализ научно-технической литературы показывают, что плавка в ДСП при непрерывной подаче ЖМО в расплав имеет значительные энергетические преимущества, связанные со стабилизацией работы печи и особенностями физических процессов горения дуги на жидкий металл. Они проявляются в более высокой доле активной мощности, отбираемой печью от трансформатора и сокращении расхода электроэнергии. Кроме того, технологические преимущества проявляются в сокращении продолжительности плавки и повышении производительности электродуговой печи.

Анализ научно-технической литературы по применению трубчатых электродов в ДСП показал, что электрическая дуга на выходе из отверстия такого электрода концентрируется по центру торца, становится массивней и занимает вертикальное положение, что уменьшает выдувание дуг. Это способствует увеличению

коэффициента использования мощности трансформатора на 10%, производительности агрегата на 7,5-11,5%, сокращению длительности периода плавления на 9-12%, а удельного расхода электроэнергии на 3-5% и более.

При подаче ЖМО через осевые отверстия в электродах печи основная масса окатышей расплавляется в подэлектродном пространстве под воздействием локального перегрева мениска $\Delta t_{\text{мен}} \gg \Delta t$, $v_{\text{пл}}$ и $v_t \rightarrow \max$.

Изучение процессов нагрева и плавления окатышей осуществляли в лабораторных условиях на электропечной установке (ЭПУ) (рис. 2).

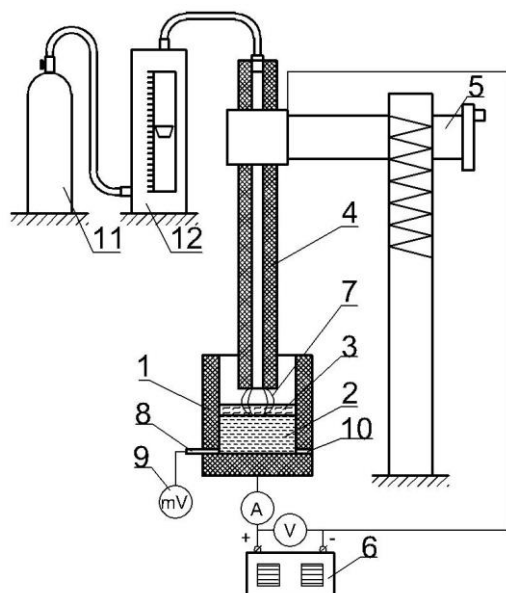


Рис. 2. Схема экспериментальной электропечной установки: 1 – тигель; 2 – металл; 3 – шлак; 4 – электрод с осевым отверстием; 5 – стойка; 6 – сварочный выпрямитель; 7 – электрическая дуга; 8 – термопара; 9 – милливольтметр; 10 – лоток для выпуска металла; 11 – баллон; 12 – расходомер

В ходе электроплавки были получены опытные данные по изменению химического состава металла и шлака, температуры металла, распределения тепловых потоков, теплоусвоения ванны, состава отходящих газов, вспенивания шлака, что позволило оценить эффективность экспериментальной плавки в сравнении с типовой, при использовании подачи окатышей вне зоны воздействия дуг на расплав.

Из приведенных сравнительных данных (табл. 1) следует, что при использовании электрода с осевым отверстием показатели работы установки улучшаются, т.к. в результате стабилизации дуга становится массивнее, занимает вертикальное положение, а ее мощность увеличивается. Это способствует созданию более направленного потока тепла дуги на ванну с увеличением скорости нагрева расплава.

Табл. 1. Сравнительные данные экспериментов по работе ЭПУ на различных типах электродов

Тип электрода	Со сквозным осевым отверстием	С не сквозным осевым отверстием	Со сквозным отверстием при подаче Аргона	Сплошной (типовой)
Эксперимент №1 (нагрев металлической пластины)				
Время работы установки, с	35,6	31,8	37,4	31,4
Разница температур, К	261	216	201	128
Скорость нагрева v_t , К/с	7,34 (+80%)	6,80 (+67%)	5,37 (+32%)	4,07
Среднее напряжение дуги, В	33,1	35,6	25,9	32,6
Средняя сила тока дуги, А	492,3	451,6	575,9	488,8
Средняя мощность дуги P_d^{cp} , кВт	15,58	15,51	14,08	14,73
v_t/P_d^{cp} , К/(с·кВт)	0,471 (+71%)	0,438 (+59%)	0,381 (+38%)	0,276
Эксперимент №2 (плавление металлических образцов одинаковой массы и размера)				
Время расплавления шихты, с	68	70	-	80

При подаче через них ЖМО, за счет дополнительного подогрева окатышей, при прохождении через электрическую дугу, и более высокой температуры расплава, в локальной зоне ее воздействия на поверхность ванны, суммарное время плавления порции ЖМО уменьшается в среднем на 10% в сравнении с подачей вне дуги.

Таким образом, обзорные (аналитические) материалы и опытные данные позволяют сформулировать задачи диссертационного исследования, заключающиеся в изучении и обосновании технологических, энергетических, экономических и экологических преимуществ электроплавки при непрерывной подаче ЖМО в подэлектродное пространство дуговой печи как перспективной электросталеплавильной технологии для российской черной металлургии.

Во второй главе «Исследование и моделирование распределения тепловых потоков в дуговой печи при образовании электрической дуги на выходе из осевого отверстия электрода в подэлектродном пространстве агрегата» рассмотрены особенности плавления окатышей в подэлектродном пространстве (рис. 1) в системе дуга-шлак-металл с оценкой эффективности процесса электроплавки стали.

Схемы распределения тепловых потоков, падающих от точечных дуг на поверхность ванны, стену и свод для ДСП приведены на рис. 3. Они даны для обоснования принципиальных особенностей распространения тепловых потоков от дуги, формируемой в торцевой части на выходе из осевого отверстия электрода, с целью определения доли тепла, поступающего на расплав агрегата (рис. 4 и 5).

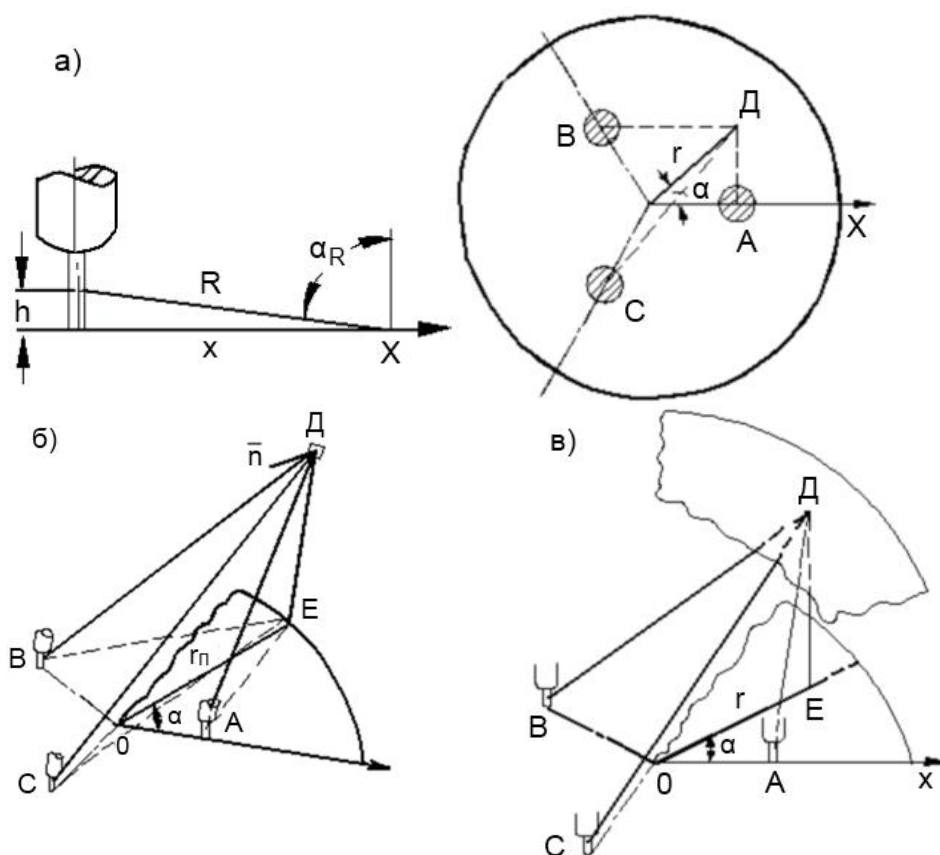


Рис. 3. Схемы падающих тепловых потоков от электрических дуг на ванну (а), стену (б) и свод (в) дуговой печи. (0 – центр поверхности ванны; А, В и С – точка на поверхности ванны под соответствующей дугой; Д – расчетная точка на поверхности ванны, стены или свода; Е – проекция точки Д на поверхность ванны; r – расстояние от точки Д до центра 0; R – расстояние от центра дуги до точки Д; r_n – радиус печи на уровне зеркала ванны; h – половина высоты дуги; α_R – угол между направлением R и нормалью к элементарной площадке; α – угол между осью x и r

Так как элементам кладки излучением от дуги передается 90 % ее мощности, на основе телесных углов, выведенных из рис. 3, получены функции распределения тепловых потоков от трех дуг по поверхности ванны:

$$q_{изл} = \frac{h}{4\pi r_{\Pi}^3} \sum_{i=1}^3 \frac{P_{д.и}}{\left[\left(\frac{h}{r_{\Pi}} \right)^2 + K^2 + \left(\frac{r}{r_{\Pi}} \right)^2 - 2K \frac{r}{r_{\Pi}} \cos \alpha_i \right]^{3/2}}; \quad (2)$$

стены:

$$q_{ст} = \frac{0,9}{4\pi r_{\Pi}^2} \sum_{i=1}^3 \frac{P_{д.и}(1 - K \cos \alpha_i)}{\left[1 + K^2 - 2K \cos \alpha_i + \left(\frac{H-h}{r_{\Pi}} \right)^2 \right]^{3/2}}; \quad (3)$$

свода:

$$q_{св} = \frac{0,9(H_1 - h)}{4\pi r_{\Pi}^3} \sum_{i=1}^3 \frac{P_{д.и}}{\left[\left(\frac{(H_1 - h)}{r_{\Pi}} \right)^2 + K^2 + \left(\frac{r}{r_{\Pi}} \right)^2 - 2K \frac{r}{r_{\Pi}} \cos \alpha_i \right]^{3/2}}; \quad (4)$$

где H_1 и H – высота свода и точки D на стене; $K = r_p/r_{\Pi}$ – отношение радиуса «распада» электродов к радиусу печи; $P_{д.и}$, $\cos \alpha_i$ – мощность и направляющий косинус i -й дуги.

Лабораторным экспериментом установлено, что при подаче ЖМО через отверстия электродов (рис. 1) вспенивание шлака в подэлектродном пространстве существенно возрастает.

Как следует из данных (рис. 4 и 5) при увеличении экранирования электрических дуг шлаком ($H_{шл} \rightarrow L_d$), доля тепла от них на ванну увеличивается, и следовательно увеличивается коэффициент использования энергии ($\eta_{киэ}$) и КИТ дуг ($\eta_{кид}$).

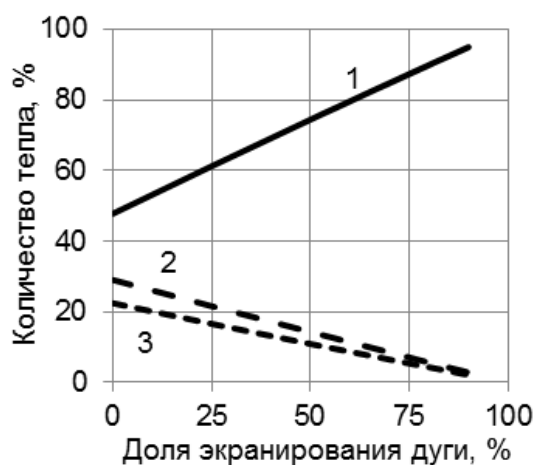


Рис. 4. Распределение тепла по элементам печи (при различном экранировании дуг): 1 – поверхность ванны; 2 – стена; 3 – свод

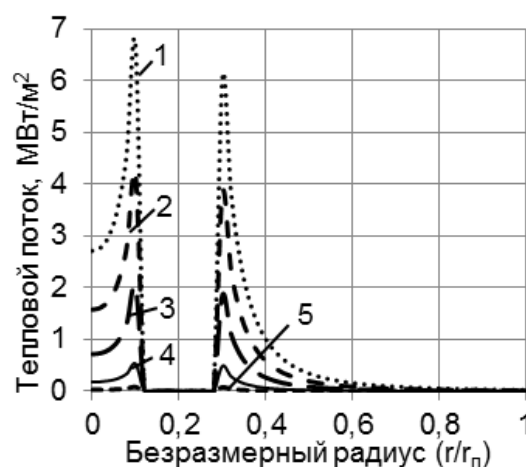


Рис. 5. Распределение падающих тепловых потоков на шлак по радиусу ванны при $\alpha = 0$ и $K = 0,2$. (за вычетом потоков под электродом) при различных степенях экранирования дуг: 1 – 0; 2 – 25; 3 – 50; 4 – 75; 5 – 90%

В работе создали модель расчета температурных полей в ванне ДСП с распределением тепла от дуг (2) расплаву, в котором идет плавление порции окатышей. Она построена с использованием метода конечных разностей для задач внутреннего теплообмена в трехмерном теле на основе использования уравнений теплового баланса и принятых допущений и ограничений. Математическое описание распределения тепла в ванне заключается в том, что искомое температурное поле удовлетворяет 3х-мерному уравнению теплопроводности в цилиндрических координатах:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial h^2} + \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial a^2} + q_v, \quad (5)$$

в области $0 < r < r_{\text{ван}}(h)$; $0 < \alpha < 60^\circ$; $0 < h < h_{\text{ван}}$, где $r_{\text{ван}}(h)$ – функция радиуса ванны по высоте, описывающая положение внешней границы, м; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); c – удельная теплоемкость, Дж/(кг·К); ρ – плотность, кг/м³, q_v – внутренние источники или стоки (плавление окатышей) тепла, Вт/м³.

При решении данной задачи использовали способ расщепления, т.е. сведение трехмерной разностной схемы к совокупности одномерных (по радиусу, по углу, по высоте). Для построения разностных схем, приняли метод балансов, причем исходили непосредственно из законов сохранения энергии и переноса тепла, примененных к дискретному температурному полю. Обобщенная блок-схема алгоритма модели (рис. 6), позволяет получить совокупное распределение температур в объеме шлако-металлической ванны, и следующие параметры:

- тепловой поток, усвоенный металлом (шлаком), $Q_{\text{усв}} = \sum \lambda / \Delta l \cdot \Delta T \cdot F$, Вт;

- КИТ дуг, $\eta_{\text{киг}} = Q_{\text{усв}} / P_d$;

- угар металла, $m_{\text{угар}} = (Q_{\text{изл.мен}} - Q_{\text{усв.мен}} - Q_{\text{охл}}) / L$, кг/с;

- потери тепла излучением шлака, $Q_{\text{изл.ш}} = \sum \varepsilon_{\text{пр}} C_0 (T/100)^4 F$, Вт;

- потери тепла через футеровку, $Q_{\text{ф.под}} = \sum k_f \Delta T_{\text{ос}} F$, Вт,

где $Q_{\text{изл}} = \sum q_{\text{изл}} F$ – излучение дуг на поверхности менисков, Вт; $Q_{\text{охл}} = \sum q_{\text{в.ок}} F \cdot \Delta l / 2$

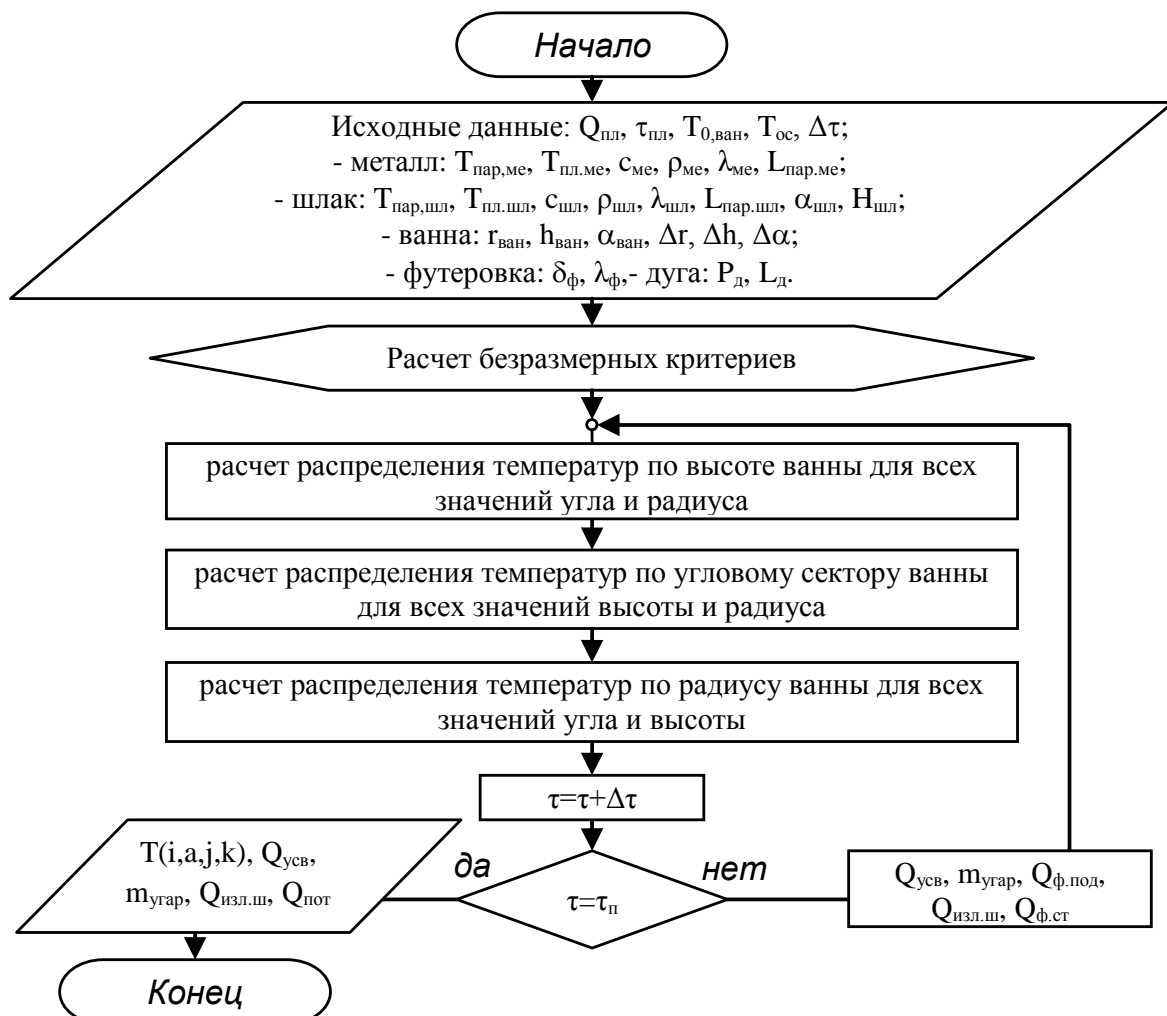


Рис. 6. Упрощенная блок-схема алгоритма расчета теплового состояния шлако-металлической ванны ДСП

– охлаждающий эффект от подачи окатышей, Вт; P_d – количество тепла, генерируемого в электрических дугах, Вт; $q_{v.ок}$ – удельный тепловой поток на плавление окатышей, Вт/м³; F – поверхность ячейки, м²; Δl – расстояние между центрами ячеек, м; ΔT , ΔT_{oc} – разность температур ячеек, ячейки и окружающей среды, К; L – удельная теплота испарения металла, Дж/кг; $\varepsilon_{пр}$ – приведенная степень черноты для жидкого шлака; $C_0 = 5,67 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}^4$ – коэффициент излучения абсолютно черного тела; T – температура поверхности ячейки шлака, К; k_f – коэффициенты теплопередачи, через футеровку ванны, Вт/м².

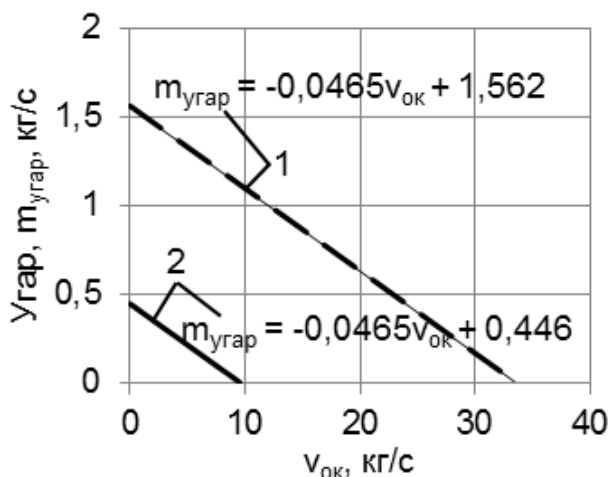


Рис. 7. Зависимость угара металла от скорости загрузки окатышей в подэлектродное пространство:

- 1 – трубчатые электроды, $\cos\varphi = 0,86$;
2 – типовые (сплошные) электроды, $\cos\varphi = 0,77$

С помощью модели (рис. 6) рассчитали угар металла при подаче ЖМО в подэлектродное пространство ванны 150 т ДСП (рис. 7). Из данных видно, что при использовании трубчатых электродов за счет увеличения коэффициента мощности, увеличивается и угар металла, но подача окатышей на поверхности менисков в качестве охладителя при $v_{ок} = 33,5 \text{ кг/с}$ позволяет его свести к нулю.

На рис. 8 приведены результаты расчетов температурных полей в расплаве при использовании схемы подачи ЖМО (рис. 1) в подэлектродное пространство дуговой печи.

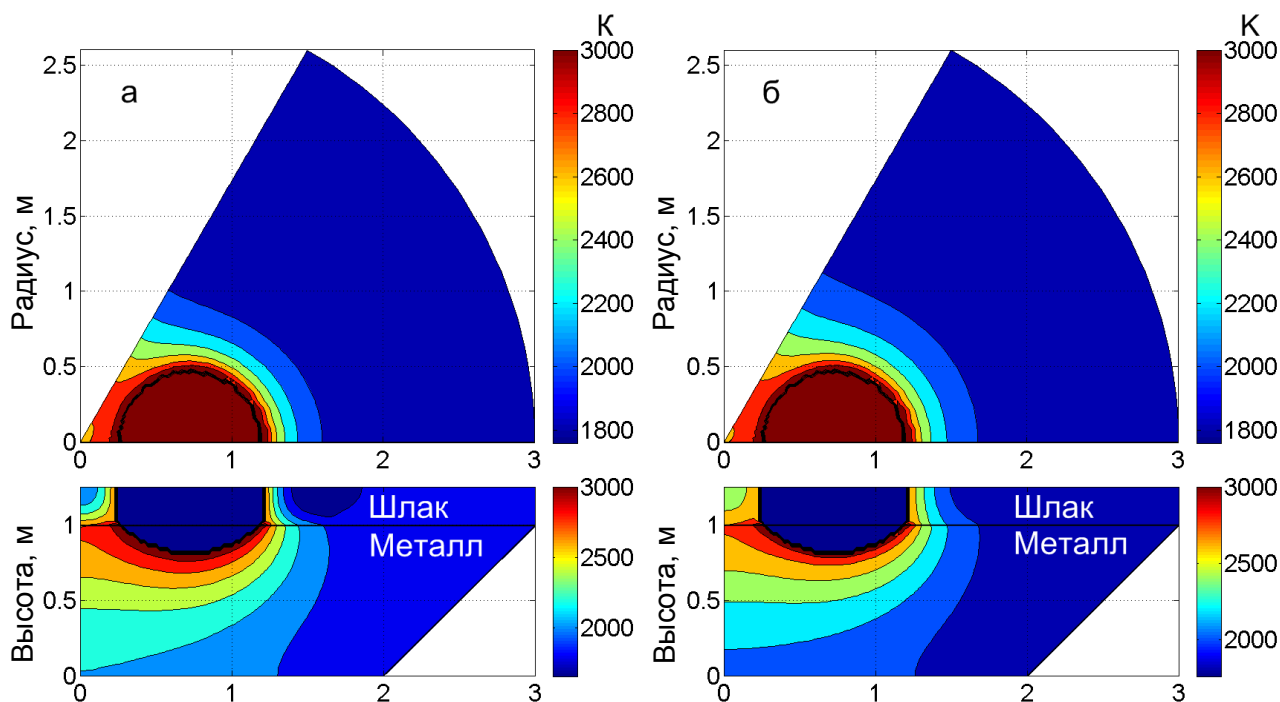


Рис. 8. Результаты расчетов распределения температур в объеме шлако-металлической ванны дуговой печи (а – подача окатышей на шлак в пространство между электродами; б – подача окатышей на металл в подэлектродное пространство (вверху сечения границы шлак-металл $h=H_{ме}$ (вид сверху), внизу вертикальное сечение для угла ванны печи ($\alpha=0^\circ$))

Табл. 2. Расчетные показатели для различных способов подачи окатышей в ванну ДСП

Способ подачи окатышей в ванну	в пространство между электродами	в подэлектродное пространство
Тепловой поток, усвоенный металлом, МВт	64,18	73,58
Тепловой поток, усвоенный шлаком, МВт	5,142	1,645
КИТ дуг	0,768	0,833
Угар металла, кг/с	1,265	0,0056
Потери тепла через футеровку, МВт	0,931	0,929
Потери тепла излучением шлака, МВт	8,996	10,27
Средняя температура расплава межэлектродного (подэлектродного) пространства, К	1944 (2953)	2373 (2883)

Результаты моделирования для 150 т ДСП (рис. 8) свидетельствуют об энергоэффективности способа подачи ЖМО в зону высоких температур подэлектродного пространства. Установлено (табл. 2), что подача ЖМО через осевые отверстия электродов позволяет повысить КИТ дуг на 6,5%, усвоение тепла металлом через мениск на 14,5% и практически исключить угар металла в подэлектродном пространстве дуговой печи, что улучшает энерготехнологические показатели работы агрегата.

Из анализа данных моделирования (рис. 8) следует, что поверхность мениска в обоих случаях нагревается до температуры испарения. При подаче окатышей в подэлектродное пространство в результате охлаждающего эффекта слои металла под поверхностью мениска менее нагреты, градиент температур и соответственно теплоотвод от нее вглубь ванны выше, что уменьшает угар металла и повышается выход годного. Но при этом температура шлака в центре печи выше, что ведет к увеличению потерь от излучения шлаком.

В третьей главе «Исследование кинетических закономерностей процессов обезуглероживания металла в дуговой сталеплавильной печи при электроплавке ЖМО» на основе известных теоретических положений и экспериментальных данных по обезуглероживанию металла в ванне дуговой печи разработали математическую модель процесса окисления углерода в ванне переменной массы с учетом его составляющих и термодинамических особенностей.

Кинетика процесса обезуглероживания может быть представлена следующим обобщенным уравнением: $d[C](\tau)/d\tau = v_C$, где $v_C = -v_{C,1} - v_{C,2} - v_{C,3} + v_{C,4}$, %[C]/мин; здесь v_C – обобщенная скорость окисления углерода в ванне дуговой печи при электроплавке ЖМО; $v_{C,1}$ – скорость окисления углерода в объеме металла на поверхности пузырьков СО; $v_{C,2}$ – на границе раздела шлак-металл; $v_{C,3}$ – кислородом ТКГ; $v_{C,4}$ – скорость науглероживания металла за счет подачи ЖМО в ванну печи. После расшифровки составляющих уравнение v_C примет вид системы:

$$v_C = -12/16\beta_O([O] - [O]_{p.c.}) \frac{60S_{пуз}}{V_{me}d_O} - 12/16\beta_O([O]_{p.ш.} - [O]) \frac{60S_{ш.м.}}{V_{me}d_O} - \rho_{O_2}a_{O_2}x_{O_2}I_{O_2}\eta_C 100/M_{me} + v_{ок}([C]_{ок} - [C]_{реакц})/M_{me}, \%[C]/мин, \quad (6)$$

где V_{me} и M_{me} – объем (m^3) и масса (кг) металла в печи; β_O – коэффициент массопереноса кислорода, ($10^{-3} \div 10^{-5}$ м/с); $S_{пуз}$ и $S_{ш.м.}$ – площадь поверхности пузырьков СО и поверхности шлак-металл, m^2 ; $[O]$, $[O]_{p.c.}$ и $[O]_{p.ш.}$ – содержание кислорода текущее в металле, равновесное с углеродом металла и равновесное со шлаком, %; η_C – доля кислорода на окисление углерода; a_{O_2} – коэффициент усвоения кислорода ванной; I_{O_2} – интенсивность подвода технического кислорода, $m^3/мин$; ρ_{O_2} – плотность кислорода, ($1,42 \cdot 10^{-3}$ кг/ m^3); x_{O_2} – доля кислорода в дутье; $v_{ок}$ – скорость подачи

окатышей в печь, кг/мин; $[C]_{\text{ок}}$ и $[C]_{\text{реакц}} = 12/16[O]_{\text{ок}}$ – содержание углерода в окатышах и углерод окатышей, идущий на довосстановление оксидов железа, содержащихся в них, %; d_O – коэффициент, учитывающий накопление кислорода в металле.

Учитывая изменение массы металла, находим концентрацию углерода в нем:

$$[C] = ([C]_{\text{нач}} - v_C(\tau - \tau_0))M_{\text{ме.0}}/M_{\text{ме}}, \quad (7)$$

где τ_0 – начало окислительного процесса; τ – окончание окислительного процесса; $[C]_{\text{нач}}$ – начальная концентрация углерода, %; $[C]$ – конечная концентрация углерода, %; $M_{\text{ме.0}}$ – начальная масса металла в печи, кг.

Скорость образования $\Sigma(\text{FeO})$ в шлаке за счет продувки кислородом:

$$v_{(\text{FeO}),1} = 72/16\rho_{\text{O}_2}a_{\text{O}_2}x_{\text{O}_2}I_{\text{O}_2}\eta_{\text{Fe}}, \quad \text{кг/мин}, \quad (8)$$

где η_{Fe} – доля кислорода на окисление железа.

Скорость изменения $\Sigma(\text{FeO})$ в шлаке за счет окисления углерода в ванне печи:

$$v_{(\text{FeO}),2} = -72/12v_C M_{\text{ме}}/100, \quad \text{кг/мин}. \quad (9)$$

При плавлении окатышей происходит довосстановление оксидов железа FeO , содержащихся в них. Скорость поступления $\Sigma(\text{FeO})$ в шлак за счет загрузки окатышей:

$$v_{(\text{FeO}),3} = v_{\text{ок}} 72/16([O]_{\text{ок}} - 16/12[C]_{\text{ок}})/100, \quad \text{кг/мин}. \quad (10)$$

Тогда суммарная скорость образования $\Sigma(\text{FeO})$ в шлаке:

$$v_{(\text{FeO})} = v_{(\text{FeO}),1} + v_{(\text{FeO}),2} + v_{(\text{FeO}),3}. \quad (11)$$

Накапливающаяся масса шлака ($M_{\text{шл}}$), исходя из непрерывной подачи окатышей и шлакообразующих, с учетом образующегося (FeO), рассчитывается по формуле:

$$M_{\text{шл}} = M_{\text{шл.0}} + (v_{\text{ок}}B/100 + v_{(\text{FeO})} + v_{\text{изв}})(\tau - \tau_0), \quad (12)$$

где B – содержание пустой породы в окатышах (CaO и SiO_2), %; $v_{\text{изв}}$ – скорость подачи извести в печь, кг/мин.

Текущая масса металла, с учетом подачи окатышей, образующегося FeO , скорости обезуглероживания и угара металла, рассчитывается по формуле:

$$M_{\text{ме}} = M_{\text{ме.0}} + ((v_{\text{ок}}\text{Fe}_{\text{ок}}^{\text{мет}} - v_C M_{\text{ме.0}})/100 - 56/72v_{(\text{FeO})} - m_{\text{угар}})(\tau - \tau_0). \quad (13)$$

Следовательно, фактическое содержание $\Sigma(\text{FeO})$ в шлаке находим по формуле:

$$\Sigma(\text{FeO}) = (\Sigma(\text{FeO})_{\text{нач}} M_{\text{шл.0}}/100 + v_{(\text{FeO})}(\tau - \tau_0))/100/M_{\text{шл}}, \quad (14)$$

где $\Sigma(\text{FeO})_{\text{нач}}$ – начальное содержание $\Sigma(\text{FeO})$ в шлаке, %.

Текущее содержание кислорода в металле принимаем равным:

$$[O] = [O]_{\text{р.с.}}(S_{\text{пуз}} + S_{\text{ш.м.}}) + [O]_{\text{ш.м.}}S_{\text{ш.м.}}/(S_{\text{пуз}} + 2S_{\text{ш.м.}}). \quad (15)$$

Ванна ДСП в упрощенном виде представляет собой усеченный конус с углом $\alpha = 45^\circ$, направленный вниз, высотой $H_{\text{ван}}$. Тогда высоту слоя металла и шлака можно определить из формулы:

$$H_{\Sigma} = \left(\sqrt[3]{3V_{\Sigma}/(\pi \cdot \tan \alpha)} + R_{\text{под}} - R_{\text{под}} \right) \cdot \tan \alpha, \quad \text{м}, \quad (16)$$

где $V_{\Sigma} = V_{\text{ме}} + V_{\text{шл}}$ – объем металла и шлака в печи, м^3 , высоту слоя металла находим из (16) путем подстановки данных по $V_{\text{ме}}$.

Одним из основных факторов вспенивания шлака является выделение CO , объем которого определяем по формуле:

$$V_{\text{CO}} = 28/12((v_{\text{C.1}} + v_{\text{C.2}} + v_{\text{C.3}})M_{\text{ме}} + v_{\text{ок}}[C]_{\text{реакц}})/(60 \cdot 100\rho_{\text{CO}}), \quad \text{м}^3/\text{с}, \quad (17)$$

где ρ_{CO} – плотность газа пузырей, кг/м^3 .

Внешнее давление на пузырьки: $p_{\text{CO}} = p_{\text{вн.}} = p_{\text{атм.}} + (H_{\text{ме}}\rho_{\text{ме}} + H_{\text{шл}}\rho_{\text{шл}})g$, (18)

где $p_{\text{атм.}}$ – атмосферное давление, Па; g – ускорение свободного падения, м/с^2 ; $H_{\text{ме}}$, $H_{\text{шл}}$ – высота слоя металла и шлака над пузырьком, м; $\rho_{\text{ме}}$ – плотность металла; $\rho_{\text{шл}}$ – плотность шлака.

$$\text{Скорость всплытия пузырьков при этом равна: } w_{\text{CO}} \approx \sqrt{4/3rg}, \quad (19)$$

где $r = \sqrt{2\sigma/(\rho g)}$ – радиус пузырька; σ – поверхностное натяжение расплава, Дж/м².

$$\text{Объем СО в ванне находим по формуле: } V_{\text{CO,в}} = V_{\text{CO}}H/w_{\text{CO}}. \quad (20)$$

$$\text{Количество пузырей СО равно: } N_{\text{пуз}} = V_{\text{CO,в}}/V_{\text{пуз}}. \quad (21)$$

где $V_{\text{пуз}} = 4/3\pi r^3$ – объём пузырька, м³.

Для определения площади поверхности металл-шлак использовали выражение:

$$S_{\text{ш.м.}} = S_{\text{з.в}} + 0,1S_{\text{пуз}} \text{ и } S_{\text{пуз}} = SN_{\text{пуз}}, \quad (22)$$

где $S_{\text{з.в}}$ – площадь зеркала ванны, м²; $S = 4\pi r^2$ – поверхность пузырька, м².

$$\text{Тепловой эффект от реакций: } q_{v_c} = (q_{c,1}v_{c,1} + q_{c,2}v_{c,2} + q_{c,3}v_{c,3} + q_{c,4}v_{c,4})M_{\text{ме}}/100, \quad (23)$$

$$q_{v_{(\text{FeO})}} = q_{(\text{FeO}),1}v_{(\text{FeO}),1} + q_{(\text{FeO}),2}v_{(\text{FeO}),2}, \quad (24)$$

где q – теплоты реакций: $q_{c,1}$, $[\text{C}] + [\text{O}] \rightarrow \{\text{CO}\}$; $q_{c,2}$, $[\text{C}] + (\text{FeO}) \rightarrow [\text{Fe}] + \{\text{CO}\}$; $q_{c,3}$, $[\text{C}] + 1/2\text{O}_2 \rightarrow \{\text{CO}\}$; $q_{c,4}$, $\text{C}_{\text{ок}} \rightarrow [\text{C}]$; $q_{(\text{FeO}),1}$, $[\text{Fe}] + 1/2\text{O}_2 \rightarrow (\text{FeO})$; $q_{(\text{FeO}),2}$, $[\text{Fe}] + [\text{O}] \rightarrow (\text{FeO})$.

$$\text{Потери тепла с уходящими газами составят: } Q_{\text{ух,газ}} = c_{\text{CO}}V_{\text{CO}}\rho_{\text{CO}}t_{\text{CO}}. \quad (25)$$

Тогда скорость нагрева шлако-металлического расплава от обезуглероживания:

$$v_{t,c} = \frac{q_{v_c} - q_{\text{ух,газ}}}{M_{\text{ме}}c_{\text{ме}} + M_{\text{шл}}c_{\text{шл}}}. \quad (26)$$

Уравнения (6)-(26) составляют структуру математической модели окислительно-восстановительных процессов при обезуглероживании металлического расплава в ванне дуговой печи переменной массы, которая учитывает отдельные составляющие реакции окисления углерода (v_c), распределение кислорода на окисление, формирование пузырьков, содержание углерода, параметры теплового состояния ванны и другие технологические факторы плавления ЖМО в печи по ходу плавки. На основе модели разработали алгоритм и программу расчета режима обезуглероживания (рис. 9) и других технологических параметров процесса электроплавки ЖМО.

Расчет начинается с определения коэффициентов распределение кислорода на окисление и концентраций кислорода в металле, равновесных с содержанием углерода в металле $[\text{O}]_{\text{р.с}}$ и со шлаком $[\text{O}]_{\text{м.ш}}$ с учетом параметров образования пузырей в ванне. Затем, задавая нулевое приближение величин поверхностей пузырей в металле и раздела шлак-металл, находим составляющие обезуглероживания и науглероживания металла. По полученным данным определяем объем выделяющегося СО и новое приближение величин поверхностей пузырей в металле и раздела шлак-металл. При погрешности полученных значений меньше заданной производим расчет содержания углерода $[\text{C}]$, окисленности $\Sigma(\text{FeO})$ шлака, и тепловых эффектов. Далее повторяем расчет для следующего промежутка времени, до завершения процесса.

Программа позволяет определять по ходу плавки концентрацию углерода $[\text{C}]$, окисленность $\Sigma(\text{FeO})$ шлака, и оценивать тепловые эффекты в результате обезуглероживания. Определяя v_c (6) и скорость нагрева металла по уравнению (26) представляется возможным осуществлять контроль соотношения процессов (v_t , К/мин) и (v_c , % $[\text{C}]$ /мин) с тем, чтобы оптимизировать ход электроплавки ЖМО.

Адекватность проверяли путем сравнения расчетных значений содержания углерода в металле $[\text{C}]$ с фактическими, по данным проб металла 150 т ДСП (рис. 10). Разброс не превышает 5%, что свидетельствует об адекватности предложенной модели и о возможности практического использования ее алгоритма и программы для

расчета управляемого окислительного рафинирования при электроплавке ЖМО в ванне дуговой печи.

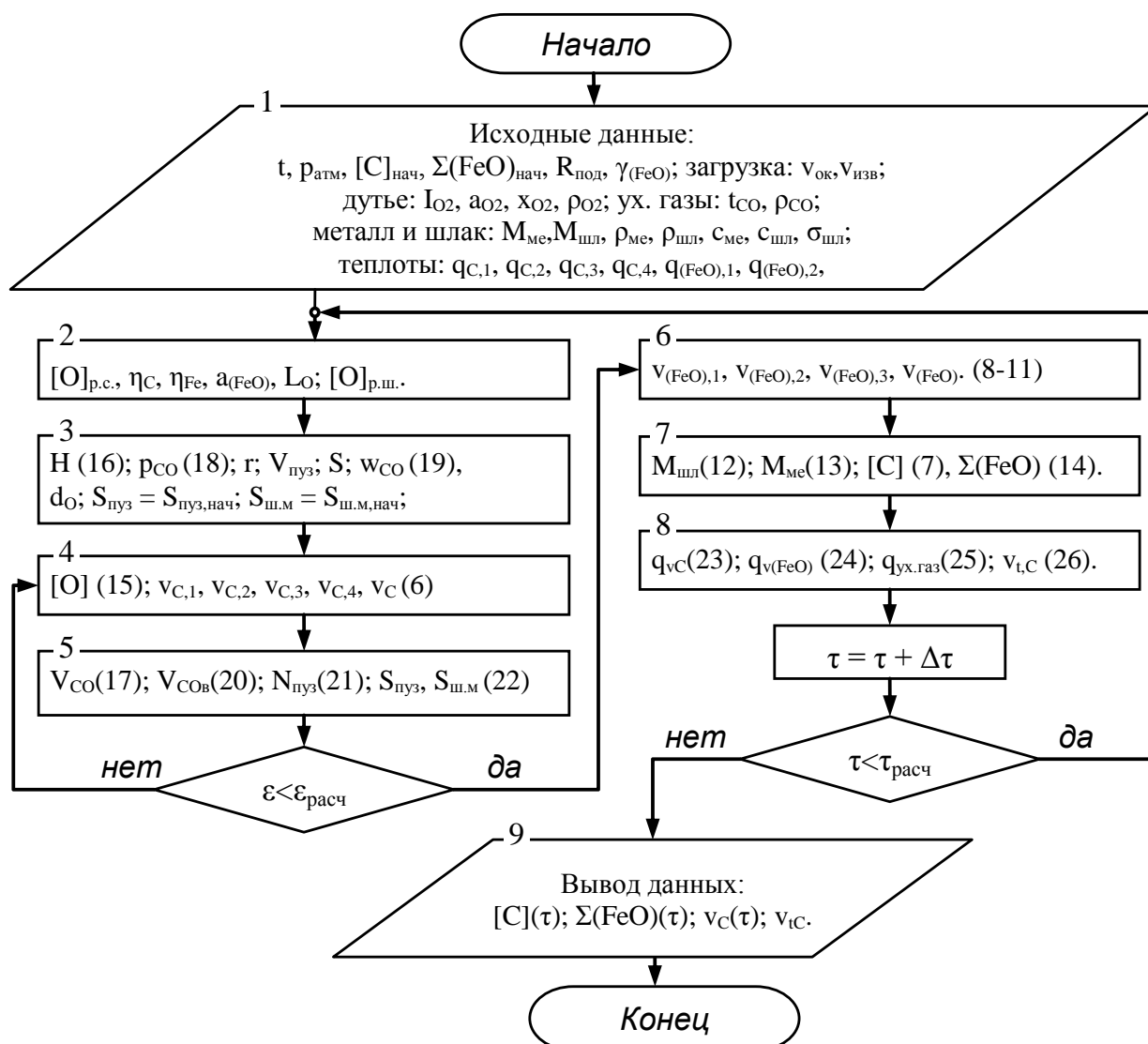


Рис. 9. Блок-схема алгоритма расчета режима обезуглероживания металла в дуговой печи с применением непрерывной подачи ЖМО

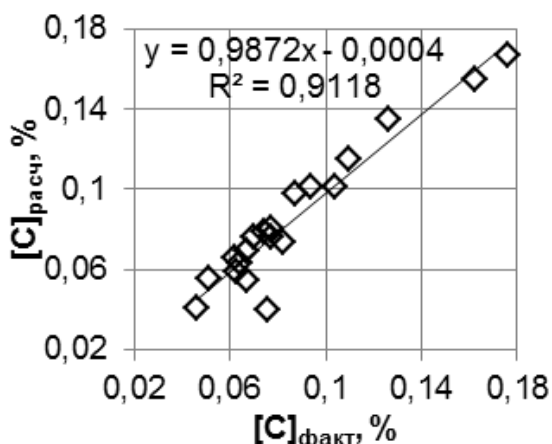


Рис. 10. Сравнение расчетных значений содержания углерода в металле, по предложенной модели, с фактическими, по пробам плавки 150 т ДСП

Результаты моделирования параметров обезуглероживания при постоянной скорости подачи окатышей и количестве кислорода ТКГ на плавку в ванне 150 т ДСП от начала загрузки ($M_{\text{ме.нач}} = 50$ т) до достижения массы металла в печи 150 т приведены на рис. 11 и 12.

Данные рис. 11 (кривая 3) подтверждают решающий вклад кислорода от ТКГ в обезуглероживание расплава. При этом $v_{C,1}$, $v_{C,2}$ являются незначительными, но оказывают влияние на вспенивание шлака. Общий вид кривых совпадает с литературными и опытными данными.

Как следует из данных рис. 12 при

постоянном количестве извести и кислорода на расчетный период, кривые содержания углерода (поз. а) имеют вид экспоненциальной зависимости. В начальный период $[C]$ практически линейно зависит от времени, затем при $[C] = 0,2 \pm 0,05$ % скорость изменения уменьшается и на конечном отрезке практически неизменна. Конечные содержания углерода при этом приблизительно равны. Окисленность шлака (рис. 12, б) в конечный период растет быстрее, так как при снижении содержания углерода ниже $[C] = 0,2 \pm 0,05$ % доля кислорода на его окисление уменьшается, а на окисление железа соответственно увеличивается, что может существенно повысить потери железа со шлаком. Кривые скорости нагрева от обезуглероживания (рис. 12, в) имеют вид экспоненциальной зависимости и непрерывно снижаются в связи с постоянным увеличением массы шлако-металлического расплава.

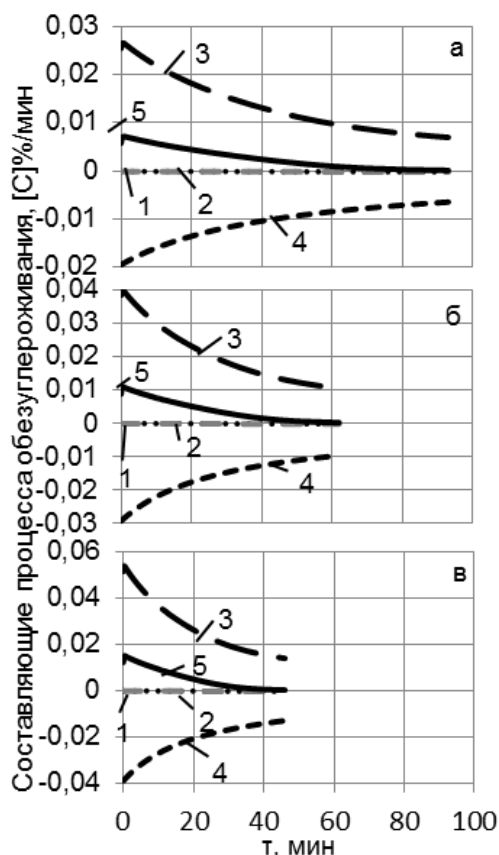


Рис. 11. Зависимости составляющих скорости окисления углерода сталеплавильной ванны 150 т ДСП (1,2,3,4,5 - $v_{C,1}$, $v_{C,2}$, $v_{C,3}$, $v_{C,4}$ и $v_{C,5}$, % $[C]$ /мин) при непрерывной загрузке ЖМО $v_{ок}$ (а - 20 кг/с; б - 30 кг/с; в - 40 кг/с)

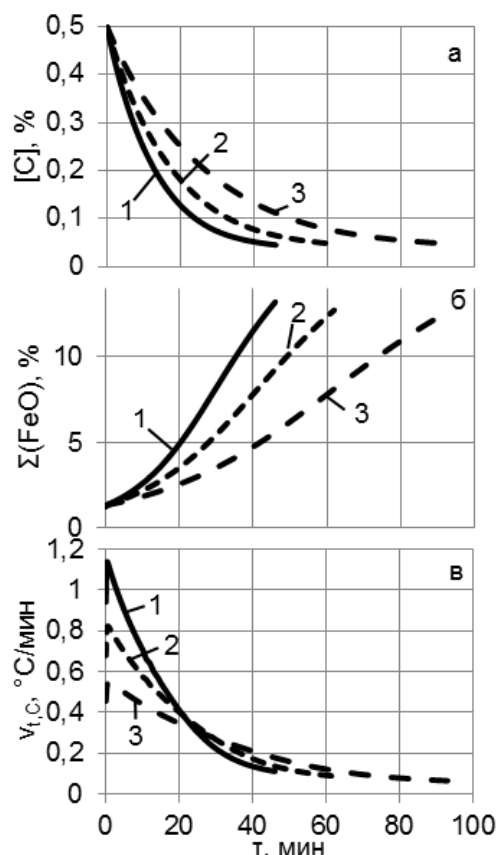


Рис. 12. Характер изменения содержания углерода в металле (а), окисленности шлака (б) и скорости нагрева от обезуглероживания (в) по ходу плавки при непрерывной загрузке ЖМО $v_{ок}$ (1 - 40 кг/с; 2 - 30 кг/с; 3 - 20 кг/с)

При расчете также определяются составы, массы и уровни металла и шлака и объем выделяющихся газов, что можно использовать для расчета температуры металлической ванны и управления режимом загрузки ЖМО.

В четвертой главе «Исследование кинетики и механизма плавления окатышей в системе дуга-шлак-металл, разработка математической модели и алгоритма расчета параметров нагрева и плавления ЖМО в ванне ДСП» рассмотрены вопросы интенсификации плавления окатышей при их подаче в зону воздействия дуг на шлако-металлический расплав.

Разработана математическая модель нагрева и плавления окатыша в системе дуга-шлак-металл. Плавление окатыша в расплаве и в дуге представляет собой задачу теплопроводности с движущейся границей. При этом плавление в подэлектродном пространстве имеет особенности. Исходя из того что окатыш первоначально подвергается интенсивному излучению дуги, проходя в непосредственной близости от неё, а температура плавления металла больше температуры плавления окатыша, механизм процесса плавления включает в себя следующие этапы:

1. Нагрев поверхности окатыша до температуры плавления в результате воздействия излучения от дуги, во время падения.

2. Плавление окатыша во время его падения в дуге. При этом расплав окатыша, накапливается на поверхности твердого остатка, передает тепло теплопроводностью и его поверхность, под действием дуги, нагревается выше температуры плавления.

3. Плавление окатыша в жидком металле подэлектродного пространства.

При построении модели приняли соответствующие допущения и ограничения.

Для 1-го периода (нагрев в дуге). Искомое температурное поле удовлетворяет одномерному уравнению теплопроводности в сферических координатах:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right), \quad 0 < r < r_{ок}. \quad (27)$$

Основное граничное условие выражает уравнение теплового баланса на поверхности окатыша: $\lambda \frac{\partial T(r_{ок}, \tau)}{\partial r} = q_{изл}$, (28)

где $q_{изл}$ – тепловой поток излучения от дуги на поверхность окатыша, Вт.

Для 2-го периода (плавление в дуге). Так как в результате плавления расплав остается на поверхности, то искомое температурное поле удовлетворяет уравнению (27) но в области $0 < r < r_{пов}(\tau)$ для окатыша и $r_{пов}(\tau) < r < r_{ок}$ для расплава (где $r_{пов}(\tau)$ – функция радиуса твердой поверхности окатыша). То есть имеем 2 границы: движущуюся между остатком окатыша и его расплавом и постоянную на поверхности расплава, которая воспринимает излучение дуги.

Для 3-го периода (плавление в металле). Искомое температурное поле удовлетворяет уравнению (27) но в области с движущейся границей $0 < r < r_{пов}(\tau)$. А основное граничное условие выражает уравнение теплового баланса на границе раздела окатыш-расплав: $-\lambda \frac{\partial T(r_{пов}(\tau), \tau)}{\partial r} + q_0 \pm L v_{пл} = 0$, (29)

где $v_{пл}$ – скорость кристаллизации (+) или плавления (-) слоя, кг/с; L – удельная теплота плавления расплава, Дж/кг; $q_0 = \alpha(t_p - t_{пов})$ – тепловой поток конвективной теплоотдачи от расплава к поверхности окатыша; α – коэффициент конвективной теплоотдачи, Вт/(м²·К); t_p и $t_{пов}$ – температура расплава и поверхности, К.

Для решения задачи использовали неявную 4-х точечную разностную схему и сетку с переменным числом узлов, принимая, что за один шаг по времени граница перемещается на один шаг по координате. При построении разностной схемы использовали метод баланса. Исходили непосредственно из законов сохранения энергии и переноса тепла, примененных к дискретному температурному полю.

Адекватность модели проверяли путем сравнения результатов расчета с опытными данными толщины намерзающей корочки на опытных образцах при их погружении в перегретый расплав (рис. 13). Разница не превышает 6%, что свидетельствует об адекватности предложенной модели.

Результаты расчета приведены на рис. 14. Из данных рис. 14 видно, что время плавления при подаче окатышей на расплав под дугой в 4 раз меньше, чем при плавлении их в шлаке. При подаче окатыша в шлак на нем образуется корочка

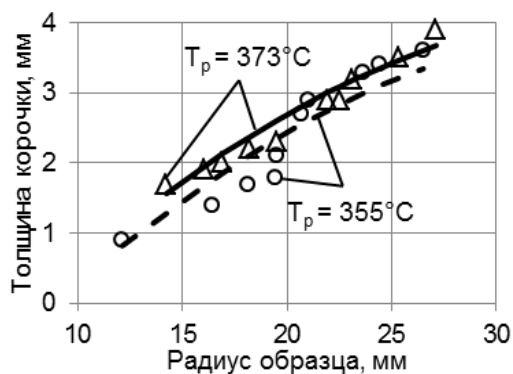


Рис. 13. Толщина намерзшей корочки от радиуса исследуемого опытного образца (на основе лабораторного эксперимента). Линии – расчет, Δ и \circ – пробы металла

толщиной до 25% от его радиуса, а сам тепловой период достигает 35% времени плавления. При подаче в расплав под электродом корочка более чем в 3 раза меньше, продолжительность теплового периода не превышает 20%, а при высоких значениях α корочка не образуется вовсе.

Температурные условия окатыша проанализировали в динамике по ходу нагрева и плавления. Установили, что при плавлении в шлаке к концу теплового периода окатыш успевает прогреться, в то время как при подаче в подэлектродное пространство по его сечению присутствует существенный градиент температур.

В пятой главе «Разработка энергосберегающей технологии электроплавки стали с применением комплексной математической модели расчета процессов нагрева, обезуглероживания, плавления и загрузки окатышей через осевые отверстия электродов дуговой печи» предусматривается, на основе предложенного нового метода загрузки ЖМО в ванну ДСП (рис. 15), осуществлять энерготехнологический режим плавления ЖМО в сочетании с рациональной скоростью их загрузки ($v_{ок} = f(t_{в}, \Delta t, v_{пл}$ и др.) при оптимальных параметрах теплового состояния металлической ванны агрегата ($v_t, v_c, v_{пл}, \Delta t, \Delta q_v$ и др.) и в условиях высокой интенсификации тепловых и технологических процессов ($v_{пл} \rightarrow \max$) путем воздействия ТКГ на шлаковую ванну. При подаче ЖМО по схеме рис. 15 процессы их нагрева и плавления интенсифицируются, а управление процессом электроплавки осуществляется в соответствии с существующей системой АСУ-ТП.

Расчеты показали, что время падения в электроде слабо зависит от скорости загрузки. Так при длине электрода 4,5 м и диаметре отверстия 150 мм время падения составит $\tau_{пад} = 0,926$ и $0,892$ с, соответственно при $v_{ок} = 30$ и 60 кг/с.

Также определили порозность потока ЖМО в трубчатом электроде (рис. 16), длиной 4,5 м (2 секции) с различным диаметром отверстия. Из полученных данных следует, что при диаметре отверстий более 75 мм, объемная доля ЖМО меньше 30% и их подача возможна со скоростями которые используются на 150 т ДСП «ОЭМК».

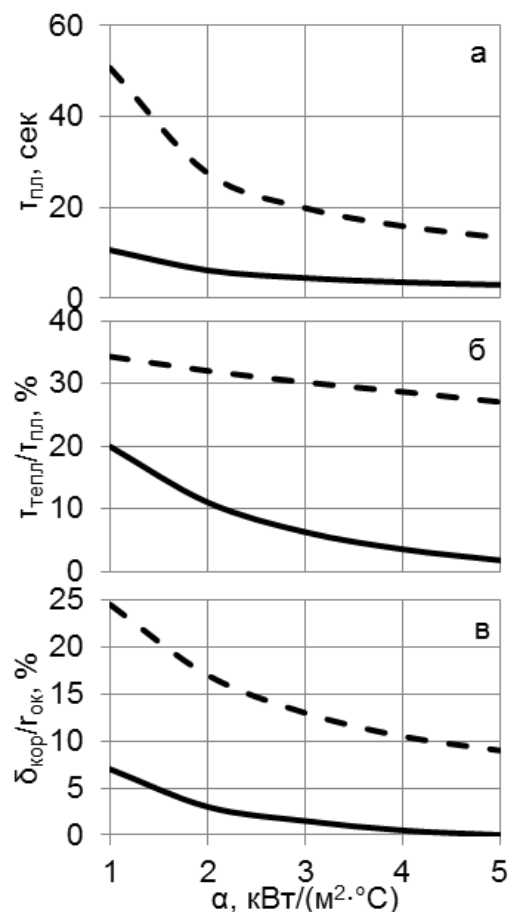


Рис. 14. Время плавления окатыша (а) доля теплового периода (б) и относительная толщина корочки (в) от α при разных способах подачи (— на расплав под дугой; - - - в шлак)

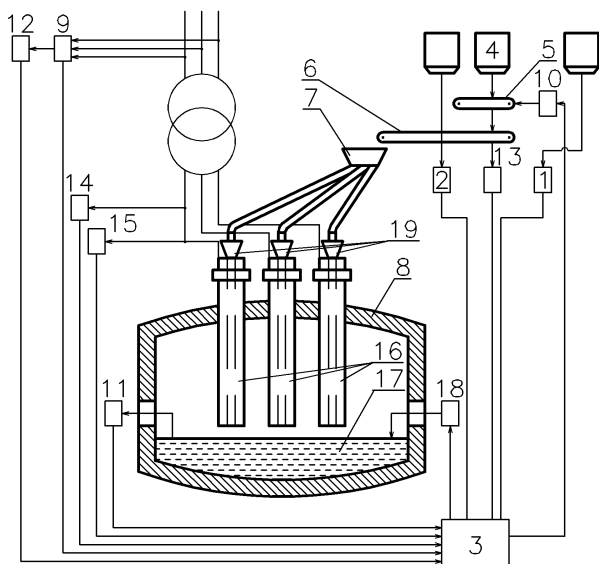


Рис. 15. Схема устройства загрузки металлизированных окатышей в дуговую печь:
 1 – расход металлошихты на электроплавку;
 2 – датчик расхода сыпучих материалов;
 3 – управляющая ЭВМ;
 4 – бункер ЖМО;
 5-6 – конвейеры загрузки окатышей и сыпучих материалов;
 7 – приемная воронка;
 8 – ДСП;
 9 – датчик активной мощности;
 10 – исполнительный механизм загрузки окатышей и сыпучих;
 11 – система контроля температуры металла;
 12 – активная мощность;
 13 – расход окатышей;
 14 – датчики тока;
 15 – датчики напряжения;
 16 – трубчатые электроды;
 17 – металл;
 18 – расчет теплоусвоения ванны;
 19 – конусные воронки с патрубками для подачи газа

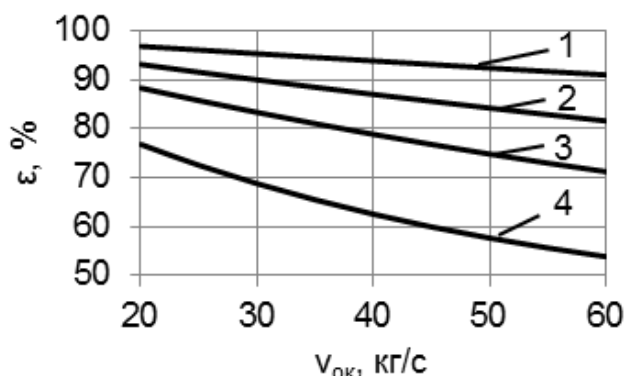


Рис. 16. Зависимость порозности (ϵ) потока ЖМО в осевом отверстии электрода (длиной 4,5 м) от расхода окатышей, при различных диаметрах отверстия: 1 - 150мм; 2 - 100мм; 3 - 75мм; 4 - 50мм

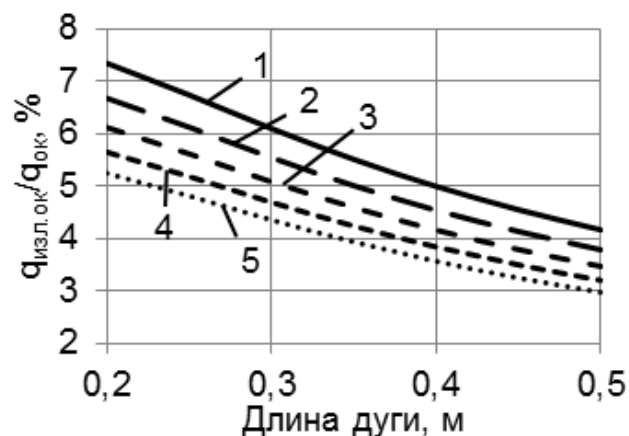


Рис. 17. Отношение количества тепла, полученного окатышем при движении в подэлектродном пространстве ($q_{изл.ок}$) к теплу полного его усвоения ($q_{ок}$) в зависимости от длины дуги (1 - $r_{ок} = 5\text{мм}$; 2 - $r_{ок} = 5,5\text{мм}$; 3 - $r_{ок} = 6\text{мм}$; 4 - $r_{ок} = 6,5\text{мм}$; 5 - $r_{ок} = 7\text{мм}$)

При движении окатышей в объеме электрической дуги они нагреваются за счет излучения. Характер влияния длины дуги и радиуса окатышей ($r_{ок}$) на тепло, полученное окатышем от воздействия на его поверхность излучения дуги ($q_{изл.ок}$), отнесенное к теплу необходимому для полного его нагрева и расплавления ($q_{ок}$), что приведено на Рис. 17.

Анализ данных (рис. 17) свидетельствует о том, что окатыш, проходя путь от попадания в дугу до шлако-металлического расплава в ванне ДСП, получает от 3% необходимой энергии для его усвоения. С уменьшением длины дуги и его размера доля возрастает до 7,5%. Это способствует ускоренному росту теплосодержания потока ЖМО.

При оптимизации энергетического и технологического режимов электроплавки ЖМО учитываем следующие обстоятельства. Тепло, усвоенное ванной:

$$Q_{\tau} = Q_{\Sigma} - (Q_{ух.газ} + Q_{ф.в} + Q_{ш} + Q_{охл} + Q_{пот}), \text{ кВт}, \quad (30)$$

где $Q_{\Sigma} = 3\eta_{кит} P_{д}$ – тепловая мощность электрических дуг, усвоенная ванной печи, кВт; $Q_{ух.газ}$, $Q_{ф.в}$, $Q_{ш}$, $Q_{охл}$ и $Q_{пот}$ – потери тепла с уходящими газами,

теплопроводностью через футеровку ванны, от излучения шлаком в рабочее пространство, потери тепла с охлаждающей водой и другие потери, кВт. Величины ($Q_{ф.в}$, $Q_{ш}$) находим на основе модели теплового состояния ванны (Глава 2), $Q_{ух.газ}$ из расчета обезуглероживания расплава (25). Потери тепла с охлаждающей водой:

$$Q_{охл} = (t_{в.п} - t_{в.у})v_{вод}, \text{ кВт}, \quad (31)$$

где $t_{в.п}$, $t_{в.у}$ – температура воды поступающей к охлаждающим панелям и уходящей из них соответственно, К; $v_{вод}$ – расход воды на охлаждение, м³/с.

Другие потери (принимая равными 0,1 от общих потерь):

$$Q_{пот} = 0,1 (Q_{ух.газ} + Q_{ф.в} + Q_{ш} + Q_{охл}), \text{ кВт}. \quad (32)$$

Усвоенное тепло идет на нагрев ванны (теплоусвоение), протекание химических реакций, и нагрев и плавление поступающих окатышей.

$$Q_{т} = \Delta q_{в} + q_{хим} + q_{ок}, \text{ кВт}. \quad (33)$$

При этом тепловой поток необходимый для нагрева окатышей до температуры плавления, подаваемых в ванну ДСП, собственно их плавления и нагрева получившегося расплава до текущей температуры металла в печи, равен:

$$q_{ок} = [c_{ок}(t_{пл} - t_{ок}) + L_{пл} + c_p(t_{ме} - t_{пл})]v_{ок}, \text{ кВт}, \quad (34)$$

где $c_{ок}$, c_p – удельная теплоемкость окатыша и получившегося расплава, Дж/(кг·К); $t_{ок}$, $t_{пл}$, $t_{ме}$ – температуры начальная и плавления окатыша, металла в ванне, К; $L_{пл}$ – удельная теплота плавления окатыша, Дж/кг.

Главными составляющими тепла затрачиваемого (получаемое) за счет протекания химических реакций в агрегате являются тепло от обезуглероживания (23), тепло окислительно-восстановительных реакций железа (24) и тепло на довосстановление оксидов содержащихся в окатышах:

$$q_{хим} = q_{v_c} + q_{v_{(FeO)}} + q_{C+FeO \rightarrow Fe+[CO]}[C]_{реак} v_{ок}/100. \quad (35)$$

Энергосберегающие условия электроплавки ЖМО в дуговой печи определяются взаимосвязью уровня теплоусвоения ванны и фактическим расходом окатышей ($v_{ок}$) в соответствии с уравнением (1). Применяя уравнения (12) и (13), учитывающие поступление материалов в печь (1) примет вид:

$$\Delta q_{в} = (M_{ме} c_{ме} + M_{шл} c_{шл})v_t. \quad (36)$$

Из анализа вышеизложенного, на основе совместного рассмотрения уравнений (32), (33) и (36) представляется целесообразным расход ЖМО на электроплавку стали оценивать по текущим теплоэнергетическим и технологическим параметрам работы агрегата: $v_{ок} = \frac{Q_{т} - q_{хим} - (M_{ме} c_{ме} + M_{шл} c_{шл})v_t}{c_{ок}(t_{пл} - t_{ок}) + L_{пл} + c_p(t_{ме} - t_{пл})}$. (37)

Исходя из оптимального перегрева металла над ликвидусом $\Delta t = 75 \pm 15$ К и $t_{ликв} = 1539 + 273 - 85$ [%C], К, следует: $t_{опт} = \Delta t + (1812 - 85$ [C]).

$$\text{Тогда } v_t = \frac{t_{опт} - t_{ме}}{\tau} = \frac{\Delta t + (1812 - 85[C]) - t_{ме}}{\tau}. \quad (38)$$

Необходимым энергосберегающим и важнейшим условием электроплавки ЖМО в ДСП является соблюдение принципа равенства скоростей загрузки $v_{ок}$ и плавления $v_{пл}$ окатышей.

При непрерывной подаче ЖМО в печи (рис. 15) скорость плавления окатышей в объеме металла (шлака) равна: $v_{пл} = Nm_{ок}/\tau_{пл}$, (39)

где N – количество одновременно плавящихся окатышей. При попадании окатышей в расплав на поверхностях менисков $N < 0,9069 \cdot 3S_{мен}/S_{ок}$; 0,9069 – коэффициент плотности размещения окатышей при наилучшем заполнении

поверхности; $S_{\text{мен}}$ – поверхность мениска, м^2 ; $S_{\text{ок}} = \pi r_{\text{ок}}^2$ – поверхность которую занимает один окатыш, м^2 ; $\tau_{\text{пл}}$ – время плавления окатыша, (рис. 14, а).

Наиболее вероятная форма лунки в месте соприкосновения дуги с ванной – шаровой сегмент. Тогда поверхность мениска определяется следующим образом:

$$S_{\text{мен}} = 2\pi(L_{\text{д}} + r_3)h_{\text{мен}}, \quad (40)$$

где $L_{\text{д}}$ – длина дуги, м; $h_{\text{мен}}$ – глубина мениска, м.

Заглубления дуг в 100 и 200 тонных печах составляет 3 мм/кА:

$$h_{\text{мен}} = 3 \cdot 10^{-3} \cdot I_{\text{д}}, \quad (41)$$

где $I_{\text{д}}$ – ток дуги, А.

Длину дуги, можно вычислить по формуле:

$$L_{\text{д}} = (U_{\text{д}} - U_{\text{а-к}}) / \beta_{\text{У}}, \quad (42)$$

где $U_{\text{д}}$ – напряжение дуги, В; $U_{\text{а-к}}$ – анодно-катодное падение напряжения, (для условий выплавки электростали в ДСП $U_{\text{а-к}} = 30$ В); где $\beta_{\text{У}}$ – градиент напряжения в столбе дуги, (в зависимости от периода плавки $\beta_{\text{У}} = 500-1000$ В/м); r_3 – радиус электрода, м.

При этом скорость эффективного плавления:

$$v_{\text{пл}} < \frac{4 / 3\pi r_{\text{ок}}^3 \rho_{\text{ок}}}{\tau_{\text{пл}}} \frac{0,9069 \cdot 3S_{\text{мен}}}{\pi r_{\text{ок}}^2} = \frac{3,6276S_{\text{мен}} r_{\text{ок}} \rho_{\text{ок}}}{\tau_{\text{пл}}}, \text{ кг/с.} \quad (43)$$

По ходу плавки необходимо также поддерживать оптимальный уровень основности шлака ($B=\text{CaO}/\text{SiO}_2$), подавая в печь соответствующее количество извести. Для ее расчета распишем массы CaO и SiO_2 из уравнения (12):

$$(\text{CaO}) = (\text{CaO})_0 + (v_{\text{ок}} \text{CaO}_{\text{ок}} / 100 + v_{\text{изв}})(\tau - \tau_0), \quad (44)$$

$$(\text{SiO}_2) = (\text{SiO}_2)_0 + (v_{\text{ок}} \text{SiO}_{2,\text{ок}} / 100)(\tau - \tau_0), \quad (45)$$

где $\text{CaO}_{\text{ок}}$, $\text{SiO}_{2,\text{ок}}$ – содержание этих оксидов в окатышах, кг; $(\text{CaO})_0$, $(\text{SiO}_2)_0$ – начальная масса оксидов в шлаке, кг.

Тогда из (44) и (45) получим скорость подачи извести:

$$v_{\text{изв}} = (B\text{SiO}_{2,\text{ок}} - \text{CaO}_{\text{ок}})v_{\text{ок}} / 100 + (B(\text{SiO}_2)_0 - (\text{CaO})_0) / (\tau - \tau_0). \quad (46)$$

Уравнения (6)-(26) и (30)-(46) составляют структуру математической модели для определения расхода окатышей и других параметров электроплавки. В соответствии с базовой системой управления электрическим режимом 150 т ДСП в ЭСПЦ ОАО «ОЭМК», при использовании нового метода загрузки окатышей в подэлектродное пространство (рис. 15), разработан алгоритм и программа расчета энерготехнологических параметров электроплавки ЖМО в дуговой печи. Он позволяет согласовать режимы плавления ($v_{\text{пл}}$) и загрузки ($v_{\text{ок}}$) окатышей, на основе учета параметров теплового состояния ванны, оптимального перегрева металла над линией ликвидус, оптимального соотношения скоростей нагрева и обезуглероживания ванны при подаче окатышей как в подэлектродное, так и в межэлектродное пространство агрегата. Блок-схема алгоритма приведена на рис. 18.

После задания исходных данных (блок 1) производим расчет электрических параметров (блок 2) и процесса обезуглероживания (блоки 3-9), на основе ранее рассмотренного алгоритма. Далее находим тепловые эффекты в результате протекания всех реакций и потери тепла ванны печи ($Q_{\text{ух.газ}}$, $Q_{\text{ф.в}}$, $Q_{\text{ш}}$, $Q_{\text{охл}}$ и $Q_{\text{пот}}$), и определяем тепло усвоенное ванной $Q_{\text{т}}$ (блок 10). По полученным значениям и формулам (37), (38), (43), (46) находим скорость нагрева, загрузки и плавления ЖМО, и загрузку извести (блок 11). Проверяем погрешность полученной скорости загрузки ЖМО (блок 12) при необходимости повторяя расчет начиная с обезуглероживания (блок 3). Исходя из

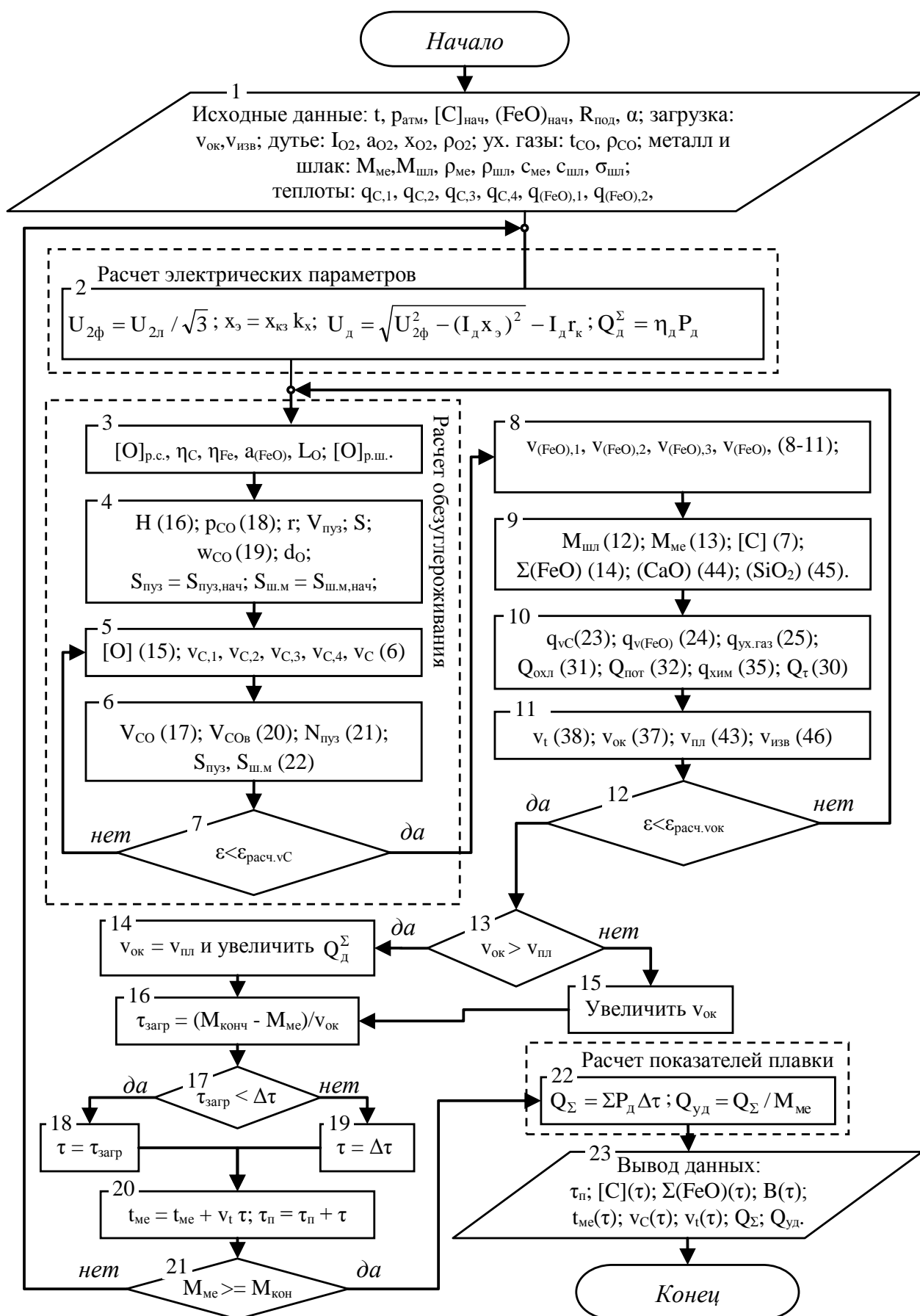


Рис. 18. Блок-схема алгоритма расчета энерготехнологических параметров электроплавки ЖМО в дуговой печи при согласованном ходе режимов плавления и загрузки окатышей

соотношения скоростей загрузки и плавления ЖМО, производим корректировку расхода электроэнергии или скорости загрузки (блоки 13-15).

В случае существенных расхождений между ними, осуществляем корректирующее воздействие изменением мощности дуги, либо производим перерасчет значений $v_{пл}$ и Q_t , вводя корректировку по k и по температуре металла в печи. Определяем время до окончания загрузки, шаг по времени, время с начала загрузки и температуру (блоки 16-20). Далее расчет повторяем до достижения заданной массы (блок 21), рассчитываем показатели плавки (блок 22) и выводим результаты расчета (блок 23).

Конечным итогом расчета по алгоритму (рис. 18) являются следующие параметры плавки: τ_n – время плавки, мин; $[C](\tau)$ – содержание углерода, %; $\Sigma(FeO)(\tau)$ – окисленность шлака, %; $B(\tau)$ – основность шлака; $t_{mc}(\tau)$ – температура металла, К; $v_t(\tau)$ – скорость нагрева (К/мин) и $v_c(\tau)$ – скорость обезуглероживания ($[C]/\text{мин}$) металла по ходу плавки и другие. Данный алгоритм может быть использован, как при существующей в ЭСПЦ ОАО «ОЭМК» технологии, так и в перспективе при использовании новых методов загрузки ЖМО и других технологических приемов электроплавки стали в дуговых печах.

Адекватность проверяли путем сравнения расчетных значений температуры металла с фактическими, измеренными термопарой в 150 т ДСП (Рис. 19). Разница не превышает 5%, что свидетельствует о возможности ее практического применения, в том числе для контроля и оптимизации энерготехнологического режима электроплавки ЖМО.

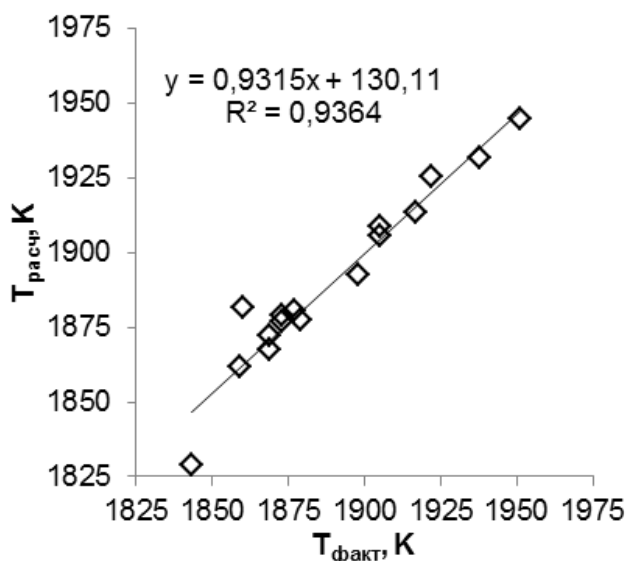


Рис. 19. Сравнение расчетных значений температуры металла по предложенному алгоритму с фактическими, по замерам плавки 150 т ДСП

Произвели перерасчет существующих технологических показателей плавки для 150 т ДСП (табл. 3) при использовании нового метода загрузки (рис. 18) окатышей в подэлектродное пространство ДСП через осевые отверстия электродов в зону электрических дуг (рис. 1).

Установили, что при использовании нового метода загрузки и соблюдении всех параметров рекомендуемого режима плавки, удельный расход электроэнергии снижается от 3 до 5 %, производительность печи возрастает до 10%, $\cos\phi$ возрастает примерно на 10%, время плавки под током уменьшается на 10-14%, а выход годной жидкой стали увеличивается на 1,2%. Из приведенных сравнительных данных (табл. 3)

следует, что при новом методе загрузки, по рекомендуемой технологии электроплавки стали, с учетом ее отработки на основе предложенного алгоритма, представляется возможным повысить энергоэффективность электроплавки стали.

Табл. 3. Анализ эффективности работы 150 т ДСП при плавлении ЖМО по типовой технологии (А, Б) и при использовании метода подачи окатышей через осевые отверстия электродов в подэлектродное пространство (В, Г)

Показатели электроплавки стали при различной мощности трансформатора	А (90МВА)	Б (105МВА)	Расчетные значения		Улучшения показателей, %	
			В (90МВА)	Г (105МВА)	В и А	Б и Г
Производительность печи, т/ч	88	102	96	115	9,1	12,7
Удельный расход электроэнергии, кВт·ч/т	560	540	540	517	-3,5	-4,2
Время плавки под током, мин	85	72	76	62	-10,6	-13,9
Плавление завалки лома, мин	16	14	14	12	-12,5	-14,3
cosφ в период расплавления металлошихты	0,76	0,77	0,84	0,86	10	11
Плавление ЖМО, мин	69	58	62	50	-10,1	-13,8
Скорость загрузки ЖМО, кг/с	34	40	39	46,5	14,7	16,25
Выход годной стали, %	90	90	91,2	91,2		

Основные выводы и результаты

1. На экспериментальной электропечной установке постоянного тока, установили, что при использовании электродов с осевыми отверстиями в результате стабилизации дуги увеличивается ее мощность и создается более направленный поток тепла дуг на ванну с увеличением скорости нагрева расплава на 70%. При подаче через них ЖМО, за счет дополнительного подогрева дугой и более высокой температуры расплава, время плавления порции окатышей уменьшается в среднем на 10%.

2. Разработана математическая модель теплового состояния ванны с учетом способа подачи окатышей. Моделированием для 150 т ДСП установлено, что подача ЖМО через осевые отверстия электродов позволяет повысить КИТ дуг на 6,5%, усвоение тепла металлом через мениск на 14,5% и практически исключить угар металла в подэлектродном пространстве, что улучшает энерготехнологические показатели работы печи и повышает выход годного.

3. Предложена математическая модель процесса обезуглероживания при непрерывной подаче окатышей и использовании ТКГ с учетом изменения, по ходу плавки, окисленности шлака и распределения кислорода на окисление компонентов расплава, что позволяет использовать ее для расчета управляемого окислительного рафинирования при электроплавке ЖМО в ванне дуговой печи. При расчете определяются составы, массы и уровни металла и шлака и объем выделяющихся газов, что можно использовать для расчета температуры ванны и управления режимом загрузки ЖМО.

4. Уточнен механизм нагрева и плавления окатыша с учетом влияния излучения электрической дуги, образования корочки металла на нем и положения области его подачи, и разработана математическая модель процесса плавления окатыша при его подаче в подэлектродное пространство, которая позволяет прогнозировать время его плавления. Результаты моделирования подтвердили эффективность подачи окатышей на расплав под

дугой. Так время плавления в 4 раз меньше, чем при плавлении их в шлаке, а при прохождении через дуговой разряд окатыш может получить до 3-7,5% от суммарно необходимой энергии.

5. Предложены и запатентованы устройство и способ загрузки металлизированных окатышей в ДСП, которые позволяют реализовать технические решения по плавке ЖМО в зоне высоких температур.

6. Разработан алгоритм расчета энерготехнологических параметров электроплавки ЖМО в дуговой печи. Алгоритм может быть использован для контроля и оптимизации энерготехнологического режима электроплавки ЖМО, как при существующей в ЭСПЦ ОАО «ОЭМК» технологии, так и в перспективе при использовании новых методов загрузки ЖМО и других технологических приемов электроплавки стали в дуговых печах.

7. Перерасчетом существующих технологических показателей 150 т ДСП для условий использования метода загрузки окатышей через осевые отверстия электродов установлено, что при соблюдении рекомендуемых параметров режима плавки удельный расход электроэнергии снижается от 3 до 5 %, производительность печи возрастает до 10%, cosφ возрастает примерно на 10%, время плавки под током уменьшается на 10-14%, а выход годного увеличивается на 1,2%. Таким образом, при новом методе загрузки, по рекомендуемой технологии электроплавки стали, с учетом ее отработки на основе предложенного алгоритма, представляется возможным повысить энергоэффективность электроплавки стали.

Публикации по теме диссертации в изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Черменев Е.А., Меркер Э.Э. Роль окисленности и обезуглероживания металла при плавлении окатышей в дуговой печи // Известия Вузов. Черная металлургия. - 2011. - №9. - С. 8-10.

2. Меркер Э.Э., Черменев Е.А., Сазонов А.В. Исследование эффективности электроплавки металлизированных окатышей при их непрерывной подаче в ванну дуговой печи // Известия Вузов. Черная металлургия. - 2012. - №5. - С. 14-17.

3. Черменев Е.А., Меркер Э.Э., Харламов Д.А. Моделирование передачи тепла, нагрева и плавления окатышей в ванне дуговой печи // Известия Вузов. Черная металлургия. - 2013. - №5. - С. - 67-68.

4. Черменев Е.А., Меркер Э.Э., Степанов В.А. Исследование кинетических закономерностей обезуглероживания металла при электроплавке окатышей в дуговой печи // Вестник ЧГУ. - 2013. - №3. Т.1. - С. 21-26.

5. Черменев Е.А., Меркер Э.Э., Степанов В.А. Разработка математической модели нагрева и плавления железорудных окатышей в дуговой печи // Известия Вузов. Черная металлургия. - 2014. - №1. - С. - 65-69.

6. Меркер Э.Э., Черменев Е.А. Математическая модель обезуглероживания металла при электроплавке железорудных окатышей в дуговой печи // Сталь. - 2014. - №3. - С. - 28-32.

Другие публикации:

7. Черменев Е.А., Меркер Э.Э., Сазонов А.В. Влияние шлакового режима на параметры электроплавки окатышей в дуговой печи // Моделирование, программное обеспечение и наукоёмкие технологии в металлургии: труды 3-й Всероссийской

научно-практической конференции / под редакцией С.П. Мочалова, В.П. Цымбала; Сиб. гос. индустр. ун-т. - Новокузнецк: Изд. центр СибГИУ, 2011. - С. 325-331.

8. Черменев Е.А., Меркер Э.Э. Влияние шлакового режима на параметры электроплавки окатышей в дуговой печи // Сборник трудов седьмой региональной научно-практической конференции студентов и аспирантов. Т.1. - Старый Оскол: СТИ НИТУ МИСиС, 2011. - С. 68-69.

9. Черменев Е.А., Меркер Э.Э. Энергосберегающие условия хода электроплавки железорудных металлизированных окатышей в дуговой печи // Сборник трудов седьмой региональной научно-практической конференции студентов и аспирантов. Т.1. - Старый Оскол: СТИ НИТУ МИСиС, 2011. - С. 69-70.

10. Сазонов А.В., Меркер Э.Э., Черменев Е.А. Интенсификация плавления окатышей при их загрузке в зону воздействия электрической дуги на шлакометаллический расплав // Бюллетень «Черная металлургия». - 2011. - №8. - С. 62-64.

11. Черменев Е.А., Меркер Э.Э., Сазонов А.В. Влияние окисленности металла и режима обезуглероживания на процессы плавки железорудного сырья в дуговой печи // Современная металлургия начала нового тысячелетия [Текст]: сб. науч. труд. Часть I. - Липецк: Изд-во ЛГТУ, 2011. - С. 168-173.

12. Черменев Е.А., Меркер Э.Э. Условия образования гарнисажной корочки на поверхности окатышей и особенности их плавления в ванне дуговой печи // Современная металлургия начала нового тысячелетия [Текст]: сб. науч. труд. Часть I. - Липецк: Изд-во ЛГТУ, 2011. - С. 181-187.

13. Черменев Е.А., Меркер Э.Э., Сазонов А.В. Об эффективности электроплавки металлизированных окатышей в дуговой печи с полыми электродами // «Образование, наука, производство и управление» (сборник научных и научно-методических докладов всероссийской научно-практической конференции преподавателей, сотрудников и аспирантов с международным участием). Т.1. - Старый Оскол: СТИ НИТУ МИСиС, 2011. - С. 119-124.

14. Черменев Е.А., Меркер Э.Э., Малахова О.И. Условия образования гарнисажной корочки на поверхности окатышей и особенности их плавления в ванне дуговой печи // «Образование, наука, производство и управление» (сборник научных и научно-методических докладов всероссийской научно-практической конференции преподавателей, сотрудников и аспирантов с международным участием). Т.1. - Старый Оскол: СТИ НИТУ МИСиС, 2011. - С. 124-129.

15. Черменев Е.А. К вопросу о моделировании тепловых потоков в дуговой печи при точечном излучении энергии // «Восьмая всероссийская научно-практическая конференция студентов и аспирантов с международным участием» (сборник научных трудов). Т.1. - Старый Оскол: СТИ НИТУ «МИСиС», 2012. - С. 177-181.

16. Меркер Э.Э., Черменев Е.А. Моделирование процесса обезуглероживания металла при электроплавке окатышей в дуговой печи // Энергосберегающие технологии в промышленности. Печные агрегаты. Экология: Сб. научн. тр. - М.: Изд-во ООО «ИТЕП». НИТУ «МИСиС», 2012. - С. 353-357.

17. Черменев Е.А., Меркер Э.Э., Коберник О.П. Об эффективности электроплавки стали при загрузке металлизированного сырья через трубчатые электроды в ванну дуговой печи // Бюллетень «Черная металлургия». - 2013. - №5. - С. 48-51.

18. Патент - 2487306 С1 РФ, МПК С21С 5/52. Устройство для загрузки металлизированных окатышей в дуговую печь / Меркер Э.Э., Карпенко Г.А., Черменев Е.А.; ФГАОУ ВПО НИТУ МИСиС. - № 2011144195/02; заяв. 02.11.2011; опубл. 10.07.2013, Бюл. № 19.

19. Патент - 2487172 С1 РФ, МПК С21С 5/52. Способ загрузки металлизированных окатышей в дуговую печь (варианты) / Меркер Э.Э., Карпенко Г.А., Черменев Е.А.; ФГАОУ ВПО НИТУ МИСиС. - № 2011144194/02; заяв. 02.11.2011; опубл. 10.07.2013, Бюл. № 19.

Научное издание

Черменев Евгений Александрович

Исследование процессов нагрева и плавления окатышей в ванне дуговой печи с целью повышения энергоэффективности электроплавки стали

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Редактор
Вёрстка

Подписано в печать 5.03.14.
Формат 60 х 84/16. Бумага офсетная.
Гарнитура Times New Roman. Усл. Печ. Л. 1,4.
Тираж __ экз. Заказ № ____

Издательство «Тонкие Наукоёмкие Технологии»
309530, г. Старый Оскол, Белгородская обл.,
м-н Макаренко, д. 40.
тел./факс (4725) 42-35-29, 42-35-39

Отпечатано в типографии
«Тонкие Наукоёмкие Технологии»
309530, г. Старый Оскол, Белгородская обл.,
м-н Макаренко, д. 40.
тел./факс (4725) 42-35-29, 42-35-39