

С. Н. Кузьменко /к. т. н./

ПАО НЗФ, г. Никополь, Украина
e-mail: kuzmenko61@ukr.netВ. А. Гладких /д. т. н./, М. И. Гасик /д. т. н./,
Ю. С. Пройдак /д. т. н./, А. В. РубанНациональная металлургическая академия
Украины, г. Днепро, Украина
e-mail: artem_ruban@ukr.net

Контроль и управление процессами, протекающими в приэлектродном пространстве ДСП переменного тока

S. N. Kuzmenko /Cand. Sci. (Tech.)/

National Metallurgical Academy of Ukraine,
Dnipro, Ukraine
e-mail: artem_ruban@ukr.netВ. А. Gladkich /Dr. Sci. (Tech.)/,
М. I. Gasik /Dr. Sci. (Tech.)/,
U. S. Proydak /Dr. Sci. (Tech.)/, A. V. RubanPublic Joint Stock Corporation «Nikopol
Ferroalloys Plant», Nikopol, Ukraine
e-mail: kuzmenko61@ukr.net

Control and operation of the processes occurring in the near-electrode space of the EAF alternating current

Цель. Повышение эффективности процесса электроплавки стали в ДСП путем разработки технологии управления электрическим и шлаковым режимами на базе технических возможностей, предоставляемых современными информационно-техническими системами.

Методика. Контроль параметров электрического режима плавки электростали специальным комплексом измерительно-вычислительной аппаратуры.

Результаты. Установлены оптимальные значения электрических характеристик приэлектродного пространства ДСП, в частности рациональные значения распределения активной мощности, выделяемой в зонах дуги и расплава, и разработана технология управления электрическим режимом на различных этапах получения стали в ДСП.

Научная новизна. Выявлены и определены дополнительные дифференциальные характеристики электрического сопротивления расплава и дуги ДСП, позволившие в непрерывном режиме управлять процессом шлакообразования и регулировать процесс вспенивания шлака.

Практическая значимость. Разработана и внедрена автоматическая система управления электрическим и шлаковым режимами ДСП, реализуемая на основе контроля параметров электрического режима плавки специальным комплексом измерительно-вычислительной аппаратуры, позволяющим по дополнительно определяемым параметрам, характеризующим процесс горения дуги в ДСП, максимально объективно определить рациональный режим ведения электроплавки. (Ил. 5. Библиогр.: 4 назв.)

Ключевые слова: дуговая сталеплавильная печь, электрический и шлаковый режимы, мощность дуги, сопротивление дуги и расплава, ТЭП.

Постановка проблемы. Современное состояние электросталеплавильного производства характеризуется реализацией различных технологических схем, среди которых можно выделить следующие: одностадийный двушлаковый переплав легированных отходов с продувкой ванны кислородом, одностадийная плавка электростали «на свежей шихте» с полным окислением двушлаковым процессом, плавка электростали на шихте из металлизированных окатышей и собственных легированных отходов и ряд других вариантов. Однако в последние годы бурно развивается и получила широкое распространение в результате реконструкции уста-

ревших предприятий и строительства новых электросталеплавильных комплексов, особенно мини-заводов, «технология высшего уровня», предусматривающая получение электростали дуплекс-процессом: дуговая сталеплавильная печь (ДСП) – агрегат комплексной обработки стали (АКОС), включающий печь-ковш (ПК) с электроподогревом стали дугами и вакуумную установку различного типа.

Среди множества технологических приемов можно выделить: совмещение дефосфорации электростали с плавлением шихты, интенсивную продувку сталеплавильной ванны кислородом вместе с твердыми или газообразными

углеродсодержащими материалами, применение альтернативных источников тепла путем использования топливно-кислородных горелок (ТКГ), доведение электростали до заданного химсостава и температуры в АКЭС, работе ДСП на «жидком болоте» металла. Конструктивное оформление процесса включает работу ДСП на «жидком болоте металла», обеспечение отсечки печного шлака путем донного выпуска стали, применение водоохлаждаемых панелей взамен огнеупорной футеровки стен, использование водоохлаждаемого «циклонного свода», выполненного из секторов водоохлаждаемых труб, использование различных схем подогрева стального лома в виде отдельного агрегата или конструктивно совмещенного с ДСП и другие совершенствования.

Одной из наиболее значимых технологических операций является обеспечение работы ДСП на высоком напряжении за счет создания вспененного шлака, путем вдувания кислорода, периодической присадки шлакообразующих и углеродсодержащих материалов. Этот прием обеспечивает экранирование электрических дуг и предохраняет футеровку свода и стен печи от высокой тепловой нагрузки, создает на водоохлаждаемых панелях защитный гарнисажный слой.

Оценка эффективности производства электростали осуществляется по нескольким параметрам, из которых можно выделить производительность, качество и стоимость. В структуре себестоимости электростали значительную часть занимают расходы по переделу, среди которых около 50 % приходится на электроэнергию, по 15–20 % на электроды и огнеупоры. Поэтому при совершенствовании технологических режимов и конструкции ДСП необходимо, прежде всего, уделять внимание оптимизации каждого из этих показателей, обеспечивающих на конечном этапе высокие ТЭП.

Работа ДСП на высоком напряжении связана, прежде всего, с ограничением максимального значения силы тока, которая ограничена рациональным диаметром графитированного электрода, обусловленным допустимой плотностью тока. Ведение процесса на повышенном напряжении связано с увеличением длины дуги, которая прямо пропорциональна напряжению:

$$l_d = f(U_d) \quad (1)$$

При работе на напряжении 800–900 В и силе тока $I = 50$ кА длина дуги может достигать 600 мм. Это вызывает высокую тепловую нагрузку на стены и свод печи и, как следствие, их повышенный износ и увеличенный расход огнеупоров на единицу продукции. Введение техноло-

гической операции вспенивания печного шлака в значительной степени экранирует дуги и повышает эффективность использования электроэнергии для нагрева металлической ванны, что хорошо демонстрируется на рис. 1 [1].

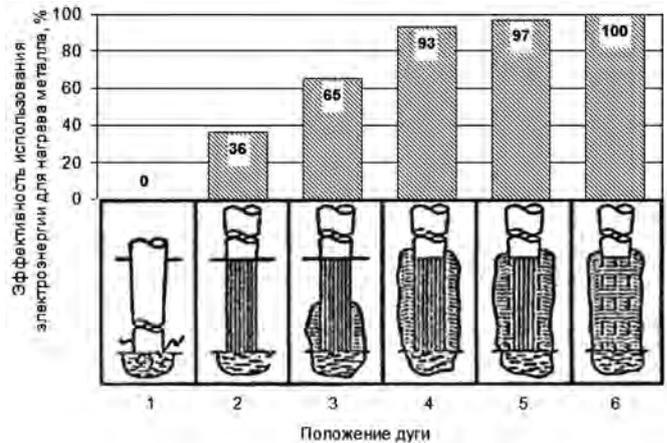


Рис. 1. Диаграмма эффективности преобразования электрической энергии в тепловую при различном режиме работы ДСП:

- 1 – режим короткого замыкания; 2 – свободно горящая дуга; 3 – дуга частично экранирована шлаком; 4 – дуга полностью экранирована шлаком; 5 – сочетание дугового режима и режима сопротивления при экранировании шлаком; 6 – нагрев по методу сопротивления

Поэтому контроль и управление процессами шлакообразования и вспенивания шлака должен обеспечить снижение расхода электроэнергии, углеродистых и шлакообразующих материалов и уменьшение длительности плавки.

Формулировка цели. В ванне дуговой электропечи полезная мощность выделяется в приэлектродном пространстве, состоящем из газовых (дуга) и жидких (шлаковый и металлический расплавы) проводников. Электрические характеристики объекта мгновенно отражают изменчивое во времени физико-химическое состояние каждой из указанных зон, что предоставляет практическую возможность контролировать и управлять процессами, протекающими в ванне ДСП. В период расплавления шихты мощность, выделяемая в дуге, максимальна, а мощность, выделяемая в расплаве, минимальна. Жидкая фаза процесса характеризуется по мере увеличения объема шлака уменьшением доли мощности, выделяемой в дуге, и ростом мощности расплава, причем чем меньше доля мощности дуги при одинаковой мощности электрода, тем выше эффективность использования электроэнергии [2].

Таким образом, существует прямая связь между уровнем шлака и распределением мощности в приэлектродном пространстве ДСП, опре-

деляемая измеряемыми значениями активной мощности дуги и расплава для каждого электрода, что позволяет эффективно управлять вдуванием шлакообразующих материалов [1].

Оценка высоты вспенивания шлака косвенными методами (измерение относительной интенсивности гармонических колебаний тока электрода (Foaming Slag Xpert – FOX 300 (Vatron) [3], направленный микрофон, технология структурных шумов (FSM Siemens) [4] дают в лучшем случае качественную картину процесса и не могут быть использованы для автоматического управления.

Технико-экономические показатели эксплуатации электродуговых печей в значительной степени определяются точностью выбора и поддержания электрического и шлакового режима плавки.

Методика исследования. Предлагаемый подход заключается в выборе средств и методов управления дуговым и шлаковым режимами ДСП на базе технических возможностей, предоставляемых современными информационными технологиями.

Автоматическая система управления электрическим и шлаковым режимами ДСП (АСУЭШР) построена на основе контроля параметров электрического режима плавки специальным комплексом измерительно-вычислительной аппаратуры, позволяющим максимально объективно оценить особенности электрического и шлакового режимов по традиционным и дополнительно определяемым параметрам, характеризующим процесс горения дуги в ДСП, с целью рационального ведения режима плавки, и призвана устранить недостатки существующих регуляторов электрического режима.

В АСУЭШР используется методика определения электрических параметров характерных зон приэлектродного пространства дуговых электродпечей [2].

По данной методике определяют параметры характерных зон рабочего пространства каждого электрода: сила тока в цепях «дуга», «шунт», «расплав»; падение напряжения на дуговом промежутке и расплаве. Далее вычисляются сопротивления и мощности соответствующих зон каждого электрода (рис. 2). Изменения соотношений этих параметров характеризуют процессы, протекающие в приэлектродном пространстве ДСП, а выход за границы их допустимых значений сигнализирует о нарушении технологического процесса.

Величина сопротивления зоны дуги тесно связана с расстоянием между дуговым промежутком. С ростом уровня шлака растет сопротивле-

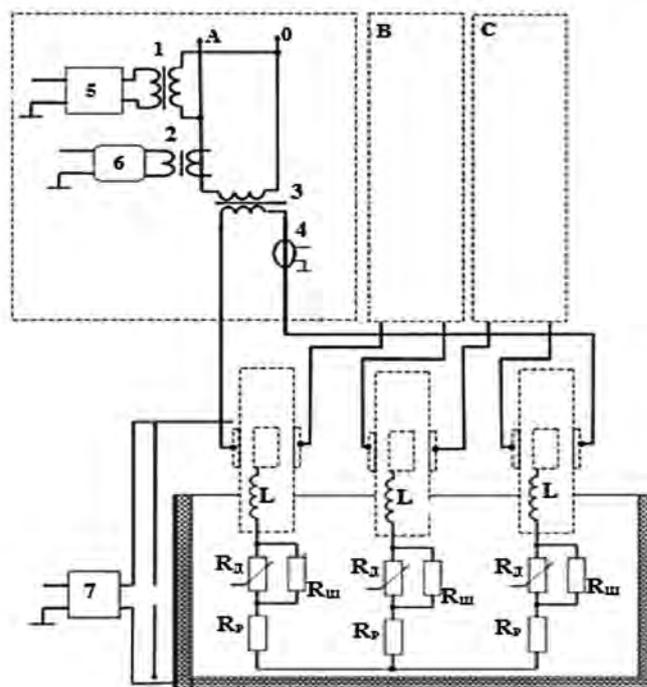


Рис. 2. Схема измерения параметров приэлектродного пространства ДСП:

A, B, C – фазы напряжения высокой стороны; 1 – измерительный трансформатор напряжения; 2 – измерительный трансформатор тока; 3 – печной трансформатор; 4 – пояс Роговского; 5 – датчик напряжения 100В/40 мА; 6 – датчик тока 5А/25 мА; 7 – датчик напряжения 1000В/40 мА; L, R_д, R_р, R_ш – параметры схемы замещения приэлектродного пространства: индуктивность, активные сопротивления дуги, расплава, шунта

ние расплава, уменьшая сопротивление зоны дуги, что позволяет, контролировать уровень шлака в ванне дуговой сталеплавильной печи и управлять его вспениванием путем вдувания шлакообразующих углеродосодержащих материалов.

Методика апробирована на мощных рудотермических печах ПАТ «НЗФ», 100 т ДСП и на 150-тонной шахтной ДСП.

На рис. 3 приведена структурная схема комплекса технических средств АСУЭШР, внедренного на 150-тонной шахтной ДСП.

Изложение основных результатов исследования. На рис. 4 приведены результаты обработки измерений для 2 разных плавков в виде временных диаграмм распределения активной мощности электрода между зоной дуги и расплава (шлак + металл) во время полного цикла плавки ДСП с загрузкой двух корзин металлолома.

На верхнем графике в заключительной фазе плавки четко видно, что дуга практически полностью находится под слоем шлака, и основная доля мощности выделяется в расплаве (красная линия). На нижнем графике во время заключи-

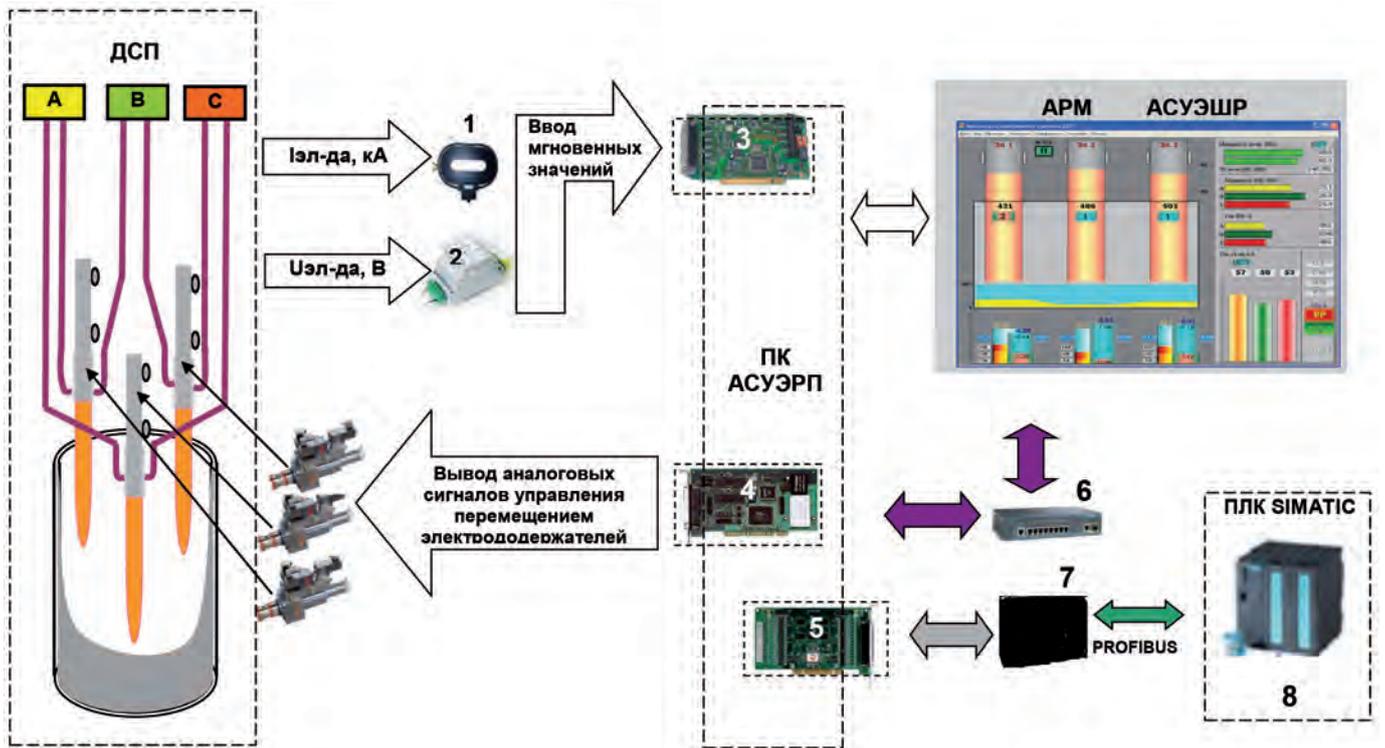


Рис. 3. Структурная схема с комплекса технических средств АСУЭШР 150-тонной шахтной ДСП:
 1 – пояс Роговского; 2 – датчик напряжения 1000В/40 мА; 3 – модуль АЦП; 4 – модуль ЦАП;
 5 – модуль ввода/вывода дискретных сигналов; 6 – коммутатор Ethernet (TCP/АР);
 7 – станция ввода/вывода дискретных сигналов; 8 – печной контролер

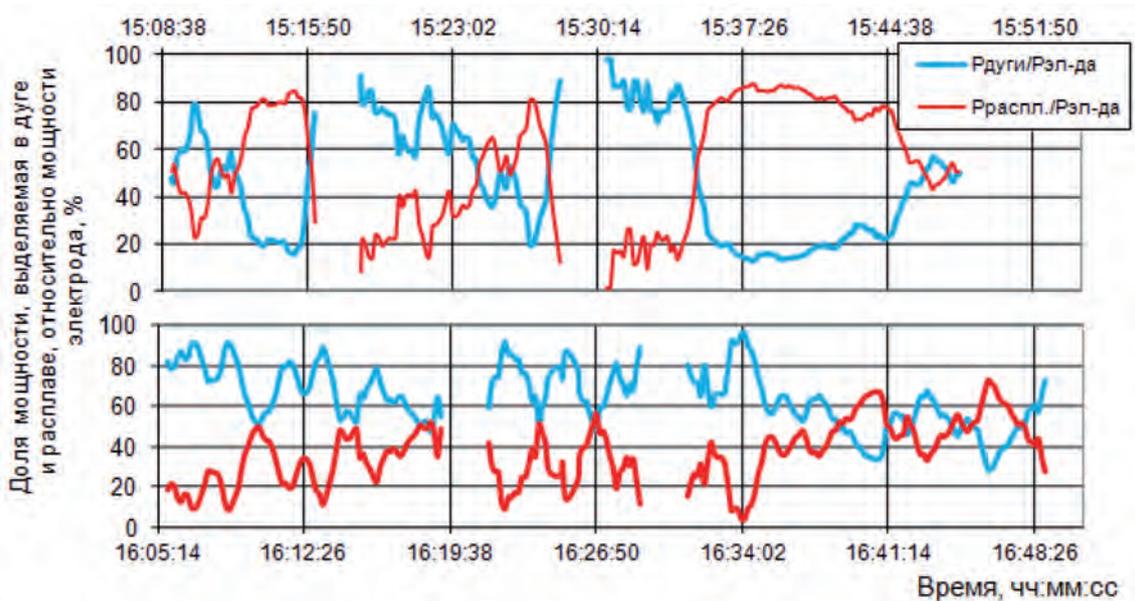


Рис. 4. Зависимость относительной мощности, выделяемой в характерных зонах приэлектродной области ДСП, от времени (стадии плавки) – результаты обработки измерений для 2 разных плавков

тельного этапа плавки дуга покрыта шлаком не полностью и, соответственно, доля мощности, выделяемая в дуге (синяя линия), колеблется около 50 %.

В АСУЭШР, кроме традиционных параметров и функций, дополнительно обеспечивается:

- прямое измерение распределения энергии в приэлектродном пространстве ДСП между зоной дуги и шлака, определение активных сопротивлений этих зон;

- равномерное распределение мощности по электродам печи (исключая явление дикой и мертвой фаз);

- оперативное представление в удобной для восприятия форме, в виде стилизованного разреза печи, текущей информации о процессах, происходящих в приэлектродном пространстве, с возможностью наблюдать реальную картину на объекте с любого компьютера, подключенного к заводской сети (рис. 5).

Критерием оценки достижения целей созданной системы является выплавка заданной марки сплава при оптимальной производительности электропечного агрегата с ограничения-

ми по удельному расходу электроэнергии, т. е. повышение ТЭП работы печи: снижение удельного расхода электроэнергии, уменьшение расхода порошкового углеродистого материала и извести, уменьшение времени плавки и доводки, повышение срока службы водоохлаждаемых панелей.

Перечень основных функций, реализованных в АСУЭШР.

Функция измерения значений:

- токов и напряжений фаз на стороне высокого напряжения печного трансформатора;

- токов и напряжений электродов.

Функция вычисления реализует:

- алгоритм гармонического анализа, в рамках которого определяются начальные фазы и амплитудные значения гармонических составляющих измеряемых мгновенных значений, действующие значения токов и напряжений, полная, активная и реактивная мощности с высокой и низкой стороны по фазам и печи в целом, cos φ, потери активной мощности, величины активных и реактивных сопротивлений приэлектродного пространства печи.

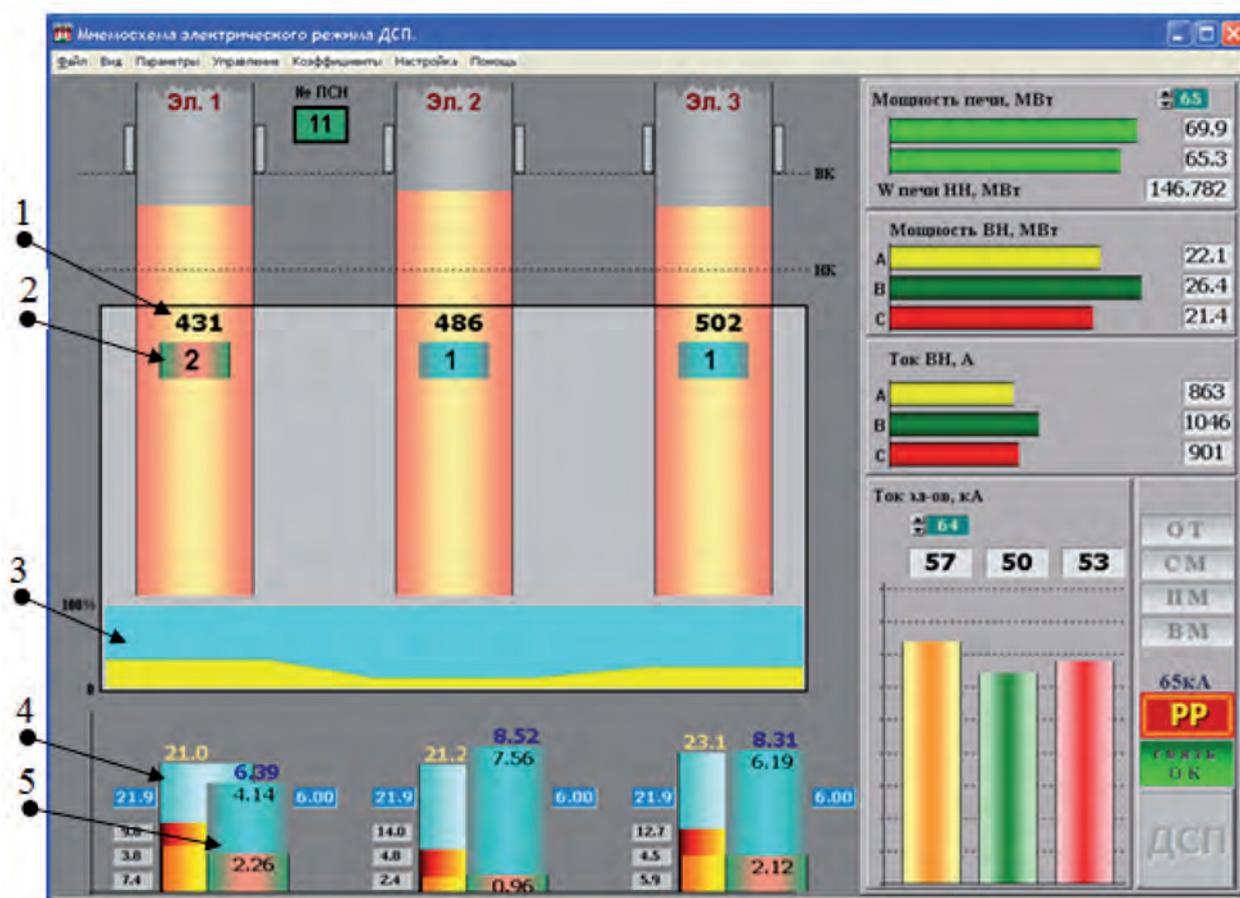


Рис. 5. Мнемосхема предоставления выходной информации на пульте оператора-технолога ДСП:

- 1 – напряжение электрода;
- 2 – состояние приэлектродного пространства (1 – дуга, 2 – шлак);
- 3 – индикатор распределения мощности между дугой и расплавом;
- 4 – активная мощность электрода;
- 5 – активное сопротивление электрода

- алгоритм дифференциального анализа, в рамках которого определяются активные сопротивления и мощности характерных зон приэлектродного пространства (расплава, шунта, дуги).

Функция контроля состояния оборудования.

Функция обработки и отображения информации осуществляет:

- оперативное представление (частота обновления информации 2 раза в секунду) в удобной для восприятия форме, в виде стилизованного разреза печи, текущей информации технологическому персоналу с возможностью наблюдать реальную картину на объекте (рис. 5);

- контроль превышения технологических границ;

- ведение протокола работы оборудования.

Функция управления электрическим режимом позволяет:

- подвести электроды к шихте (металлу) зажать дугу по всем электродам;

- стабилизировать активную мощность печи при заданных токах электрода;

- добиться равномерного распределения мощности по электродам печи (исключив явление дикой и мертвой фаз);

- контролировать распределение активной мощности по характерным зонам приэлектродного пространства;

- свести к минимуму «короткие» замыкания и обрывы дуги;

- обеспечить устойчивое горение дуги с минимальным числом коротких замыканий и обрывов дуги;

- исключить касания металла электродами на стадии доводки за счет обеспечения устойчивого горения дуги;

- обеспечить экранирование шлаком электрической дуги каждого электрода с целью эффективного использования электроэнергии.

- создать условия для формирования и выдачи команд на перемещение электродов для обеспечения оптимального распределения активной мощности по характерным зонам приэлектродного пространства;

- создать условия для формирования и выдачи команды на переключение ступеней трансформатора.

Функция управления шлаковым режимом позволяет:

- обеспечить оптимальное распределение активной мощности по характерным зонам приэлектродного пространства за счет изменения времени и интенсивности вдувания углеродного материала в зону шлака;

- создать условия для формирования и выдачи команд на вдувание углеродного материала;

- определить текущий уровень покрытия «дуги» шлаком.

Выводы. Изменения соотношений параметров, определяемых в рамках АСУЭШР (сопротивления и активные мощности характерных зон печи дуги, шунта и расплава), характеризуют процессы, протекающие в приэлектродном пространстве ДСП, изменения параметров характеризуют изменения в технологическом процессе, а выход за границы их допустимых значений сигнализирует о нарушении технологического процесса.

Вспенивание шлака производится с помощью прямого впрыска углеродного материала в зону шлака через фурмы с водяным охлаждением.

Выделяемый в результате вдувания углеродного материала газ увеличивает объем шлака, и в результате электрическая дуга экранируется шлаком. Это изменяет характеристики дуги, значительно увеличивая мощность, выделяемую в расплаве приэлектродного пространства печи.

Установлено, что если дуга полностью открыта, то используется на нагрев металла 35–40 % мощности, частично закрытая дуга обеспечивает использование до 65 % мощности, с полностью закрытой дугой можно довести коэффициент использования подводимой мощности до 90 %.

Библиографический список / References

1. Проектирование и оборудование электросталеплавильных и ферросплавных цехов / В. А. Гладких, М. И. Гасик, А. Н. Овчарук, Ю. С. Пройдак. – Днепропетровск: Системные технологии, 2009. – 736 с.

Gladkikh V. A., Gasik M. I., Ovcharuk A. N., Proydak Yu. S. *Proektirovanie i oborudovanie elektrostaleplavil'nykh i ferrosplavnykh tsekhov*. Dnepropetrovsk, Sistem-nye tekhnologii, 2009, 736 p.

2. Определение параметров и характеристик элементов схем замещения ванн рудовосстановительных электропечей / С. Н. Кузьменко, А. В. Николенко, В. И. Ольшанский, Е. В. Лапин, В. А. Гладких, В. П. Грунов // Сталь. – 2005. – № 12. – С. 35–38.

Kuz'menko S. N., Nikolenko A. V., Ol'shanskiy V. I., Lapin E. V., Gladkikh V. A., Grunov V. P. *Opredelenie parametrov i kharakteristik elementov skhem zameshcheniya vann rudovosstanovitel'nykh elektropechey*. Stal', 2005, no. 12, pp. 35-38.

3. Инновационный многомерный метод определения уровня вспененного шлака SIMELT^{CIS} / Thomas Matschullat, Detlef Rieger (Siemens AG) // Международные новости ме-

таллургической и горнодобывающей промышленности. – 2006. – № 3.

Thomas Matschullat, Detlef Rieger. *Innovationnyy mnogomernyy metod opredeleniya urovnya vspenennogo shlaka SIMELTCIS. Mezhdunarodnye novosti metallurgicheskoy i gornodobyvayushchey promyshlennosti*. 2006, no. 3.

4. Инструменты для вспенивания шлака в дуговой сталеплавильной печи / Ch. Sedivy, R. Krump (Vatron GmbH, Austria) // Архивы по металлургии и материалам. – 2008. – Т. 53. – Изд. 2.

Sedivy Ch., Krump R. *Instrumenty dlya vspenivaniya shlaka v dugovoy staleplavil'noy pechi. Arkhivy po metallurgii i materialam. Vatron GmbH, Austria*. 2008, vol. 53, ed. 2.

Purpose. Improving the efficiency of electrical steel smelting process in the EAF by developing control technology of electrical and slag melting conditions on the basis of the technical possibilities presented by modern information technology systems.

Methodology. Parameters control of electric melting conditions by special measuring-computing equipment.

Findings. The optimal values of the electrical characteristics of the near-electrode space of the EAF

have been determined, in particular the rational values of active power released in the zones of the arc and melt and management technology of electric power at various stages of steel production in EAF has been developed.

Originality. Additional differential characteristics of the electric resistance of the melt and the arc of the EAF have been revealed and determined, which allowed to continuously manage the process of slag formation and to regulate the process of slag foaming.

Practical value. An automatic control system of the electrical and slag conditions of the EAF which operates on the basis of the control parameters of the electric smelting conditions by special measuring-computing equipment have been developed and implemented, which allows for further determines parameters which characterize the arcing process in the EAF, as objectively as possible to determine a rational conditions of conducting electric smelting.

Key words: electric arc furnace, electric and slag conditions, arc power, melt and arc resistance, technical-and-economic indexes.

**Рекомендована к публикации
д. т. н. М. И. Гасиком**

Поступила 15.02.2017

