

# Интеллектуальная электродуговая печь «iEAF» фирмы Tenova – концепция и технический обзор

«Интеллектуальная электродуговая печь» с торговой маркой iEAF™ – новаторская автоматизированная система, основанная на непрерывном измерении параметров процесса в режиме реального времени и работе в режиме «он-лайн» математических моделей процесса, разработанных для динамического управления и оптимизации работы электропечи.

П. Клеричи, Ф. Делл'Акуа, Дж. Майоло, С. Витторио

ПЕЧЬ iEAF™ – построенная на базе системы EFSOP™ непрерывного химического анализа отходящих газов в режиме реального времени, обеспечила расширение холистического подхода фирмы Tenova к регулированию и оптимизации работы электродуговой печи (ЭДП). Выгоды, которые обеспечивает применение системы анализа отходящих газов в реальном времени, документально подтверждены на многих ЭДП. Исторически, при эксплуатации и управлении ЭДП металлурги полагались на статические способы обработки информации и весьма упрощенные модели. Применение анализа отходящих газов в реальном времени снабдило сталеплавыльщики инструментом, позволяющим понимать динамику процесса и повышать его эффективность.

В базовом варианте печь iEAF реализует модели процесса, позволяющие по составу отходящего газа (важной для сталеплавыльщика информации) оценить ход процесса и глубоко понять работу печи. Это понимание, в свою очередь, необходимо непосред-

ственно для улучшения самого процесса. Управляющие воздействия, основанные на обработанной в реальном времени информации, помогают оператору и обеспечивают снижение производственных затрат, повышение производительности и улучшение экологических характеристик процесса.

Современные ЭДП оснащены различными автоматическими системами управления: стабилизации положения электрода, вводом химической энергии, регулировании отвода газов и т.п. На практике редко можно встретить комплексную систему, которая полностью управляет ЭДП и ее вспомогательными системами. Печь iEAF и разработана для такой цели – объединение процессов регулирования и автоматизации работы печи и вспомогательных средств под одним зонтиком автоматизации.

Рис. 1 схематично показывает комплексный подход в системе iEAF, объединяющей все аспекты управления ЭДП. Управление процессом за счет регулируемых параметров (например, расход кислорода и топлива горелки, продувка кислородом, инъекция углерода, стабилизация положения электрода и т.п.) реализуется по обратной связи от процесса, обеспечиваемой различными датчиками (например, анализа отходящего газа, электрических гармоник, силы тока и величины напряжения). При этом, учитывается как электрическая, так и химическая энергия.

Концепция iEAF была разработана на базе типовой ЭДП, но с учетом существования на рынке множества вариаций печей. Например, по способу завалки шихты: печь с подачей лома сверху или непрерывный процесс подачи шихты в запатентованной фирмой Tenova системе Consteel®. Печи могут также питаться и другими железосодержащими материалами – железом прямого восстановления или жидким чугуном. Использование приспособленных к данному процессу модулей регулирования и свя-

зей, устанавливаемых в соответствии с системами и сетями управления заказчика, позволяет при внедрении учитывать эти различия.

Рис. 2 поясняет модульный принцип построения iEAF в электросталеплавыльном цехе, оснащенном полным набором технологий фирмы Tenova для ЭДП. Этот набор включает: систему анализа отходящего газа и химической энергии EFSOP™ для управления и оптимизации процесса, систему TDRH цифровой стабилизации электрода, систему iMelt® базовой автоматизации и контроля работы, систему iLance® регулирования КТ инжекционных систем. Модульный принцип аппаратных средств гарантирует, что их установка при внедрении не нарушит нормальную работу сталеплавыльного цеха (практически, установка может быть осуществлена без остановки печи в период ее нормальной эксплуатации во время плановых еженедельных остановок для текущего ремонта).

## Структура iEAF и ее компоненты

С точки зрения процесса, все компоненты iEAF могут быть объединены в три основных группы, совместная работа которых в интегрированном пакете и формирует интеллектуальную ЭДП:

- аппаратная и дополнительные приборы системы iEAF;
- математические модели процесса;
- модули управления и оптимизации.

Известно, что сталеплавыльные цеха отличаются по степени доступных инструментов контроля. Прямая информация о процессе от датчиков и аппаратуры наиболее желательна для управления процессом и оптимизации. Печь iEAF должна иметь функцию адаптации, которая обеспечивает ее работу независимо от уровня и наличия установленной на заводе аппаратуры. Проще говоря, если что-то можно измерить, то оно до-

P. Clerici\*, F. Dell'Acqua \*, J. Maiolo\*\*, C. Vittorio\*\* -  
\*Tenova Italy, Италия, \*\*Tenova Goodfellow, Канада

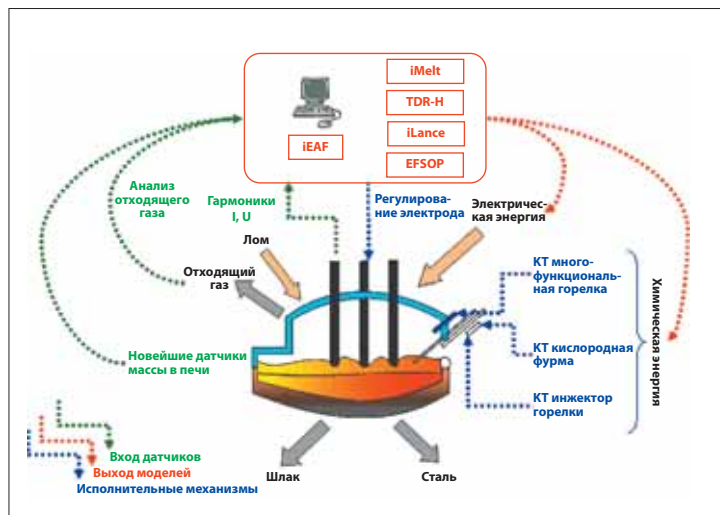


Рис. 1. Комплексный подход в системе iEAF™

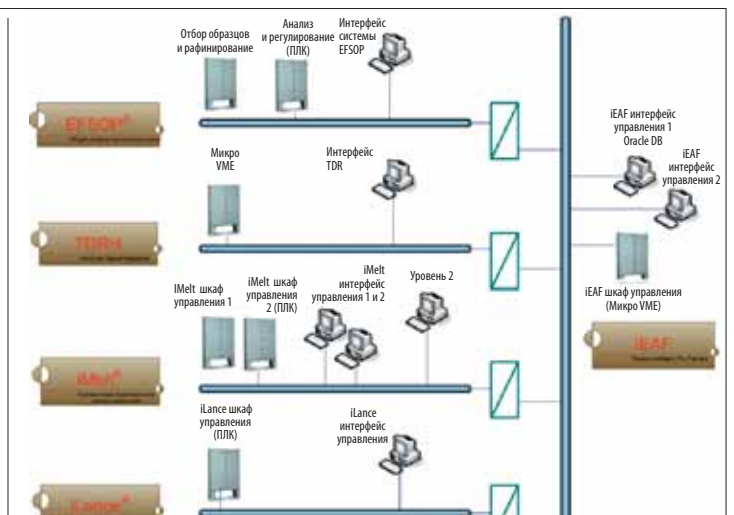


Рис. 2. Модульный принцип построения iEAF™ в сталеплавыльном цехе

Оборудование		Модели		
EFSOP + дополнительные датчики	Оптический датчик ванны	Шахта печи	Плавление	Ванна/шлак
Концентрация CO Концентрация CO <sub>2</sub> Концентрация H <sub>2</sub> Концентрация O <sub>2</sub> Четвертое окно температуры отходящего газа Статическое давление в колене	Непрерывная температура ванны	Расход отходящего газа Подсос воздуха извне Утечки воды Степень обезуглероживания CO Поток окисления O <sub>2</sub> Энергия на загрузку шихты Энергия в шахте печи Потери с отходящим газом Потери через панели	Доля расплава Наступление плоской ванны Температура лома Температура жидкой ванны	Масса жидкой ванны Состав жидкой стали Масса шлака Состав шлака Температура ванны Физические свойства шлака

Таблица 1. Измеренные и расчетные параметры для печи iEAF

жно быть измерено. В противном случае, будет разработана модель процесса или «мягкий датчик» для оценки желательного параметра процесса. Исключением является аппаратура системы EFSOP™ для анализа отходящих газов, поскольку ее внедрение является исходным условием для инсталляции iEAF.

**Инструментарий, датчики и средства**

В дополнение к системе EFSOP™ анализа отходящего газа на iEAF используют дополнительные технологические датчики для получения максимально полной динамической информации о процессе. Эти датчики включают:

- инфракрасную термокамеру для измерения температуры отходящего газа в дымоходе печи;
- датчики массовой скорости газов на выходе из печи (на основе измерения статического давления) и в первичном патрубке печи (чтобы вычислить поток для заданной конфигурации печи по балансу внутренней энергии на основании уравнения Бернулли).

Для определения массового расхода отходящего газа также могут применяться и другие методы. Одно из таких решений включает связь традиционного датчика расхода с вторичным анализатором, расположенным в определенной точке по ходу потока из печи. Вторичный анализ отходящего газа позволяет учесть разбавление потока на базе углеродного баланса между первичной точкой измерения EFSOP и установленным ниже анализатором.

В дополнение к упомянутым инструментам и «традиционным» методам измерения

параметров процесса сегодня существует множество экспериментальных технологических датчиков, развитых фирмой Tenova. Они включают:

- оптическую камеру, устанавливаемую над печью для оценки степени плавления в печи перед завалкой шихты (которая обеспечивает метод для оценки хода плавки на печах с мультизагрузкой);
- систему на основе лазера для определения высоты жидкой пятки и шлака в начале плавки;
- мессдозы, как стандартное оборудование на ЭДП с системой ConSteel для снабжения динамической информацией о массе плавки в печи;
- непрерывное измерение температуры поверхности ванны пирометрическими методами.

**Математические модели процесса**

В основу пакета печи iEAF заложены три динамических модели процесса плавки в ЭДП, каждая из которых отражает одну из трех основных фаз процесса плавки:

- модель шахты печи для газовой фазы;
- модель процесса плавления для твердой фазы;
- модель ванна/шлак для жидкой фазы.

Модель шахты печи iEAF – динамическая модель шахты (газовой фазы) ЭДП, схематично показана на рис. 3. Система EFSOP в реальном времени измеряет состав отходящего газа и его температуру, статическое давление газа в первичном магистральном колене печи. Полученные данные, в свою очередь, используются для закрытия массового и энергетического балансов газовой фазы процесса.

На базе этих данных и полного массового и энергетического баланса можно оценить:

- утечки воды, поступающие в печь;
- утечки воздуха из печи;
- углерод (как CO);
- степень окисления (формирование шлака);
- норму теплового потока на выходе из печи.

Этот подход отличается от традиционного, поскольку он не рассматривает состав отходящего газа как переменную, которая будет предсказана (или использована для настройки сталеплавильной модели), а вместо этого использует его как прямой вход для поддержки моделирования. Кроме того, предсказанные значения преднамеренно считаются универсальными и не приписываются никакому специфическому явлению.

Например, вода в шахту печи может попадать из системы охлаждения электрода, от продуктов сгорания углеводородов или других источников водорода, а углерод может быть связан со сгоранием углеводородов, износом электрода, вдуванием углерода, завалкой углерода и др.

Модель шахты печи, динамически реализуемая в процессе плавки, обеспечивает необходимой информацией оптимальное управление горелками, кислородными фурмами и инжекторами (с немедленным воздействием на снижение расхода и реализацией технологических методов). Кроме того, такая информация используется для оптимальной оценки хода плавки и точного описания состояния жидкой ванны и шлака, что обеспечивает контроль работы печи по всему ходу плавки.

Динамическая модель ванна/шлак печи iEAF (рис. 4) основана на оценках процессов окисления, обезуглероживания, потерь

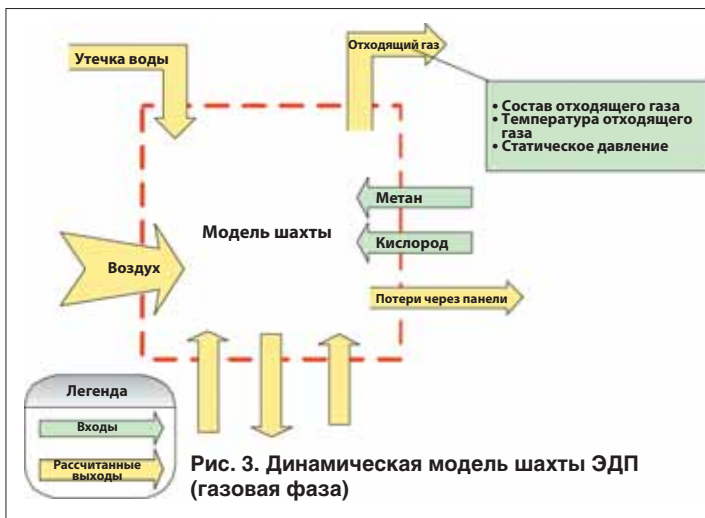


Рис. 3. Динамическая модель шахты ЭДП (газовая фаза)

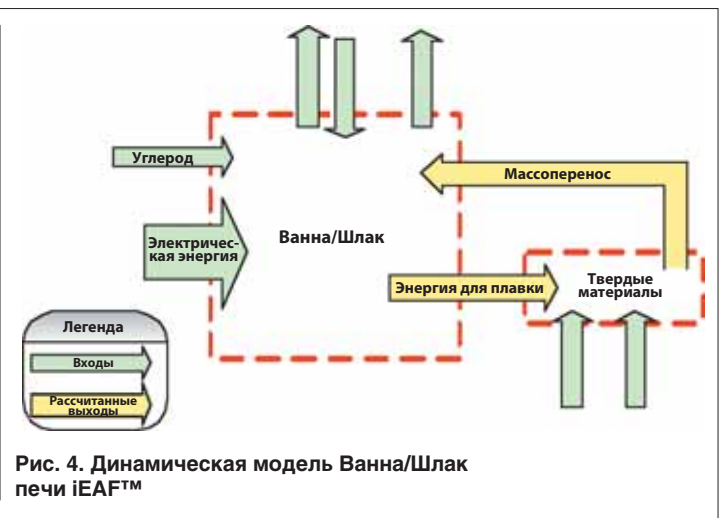


Рис. 4. Динамическая модель Ванна/Шлак печи iEAF™

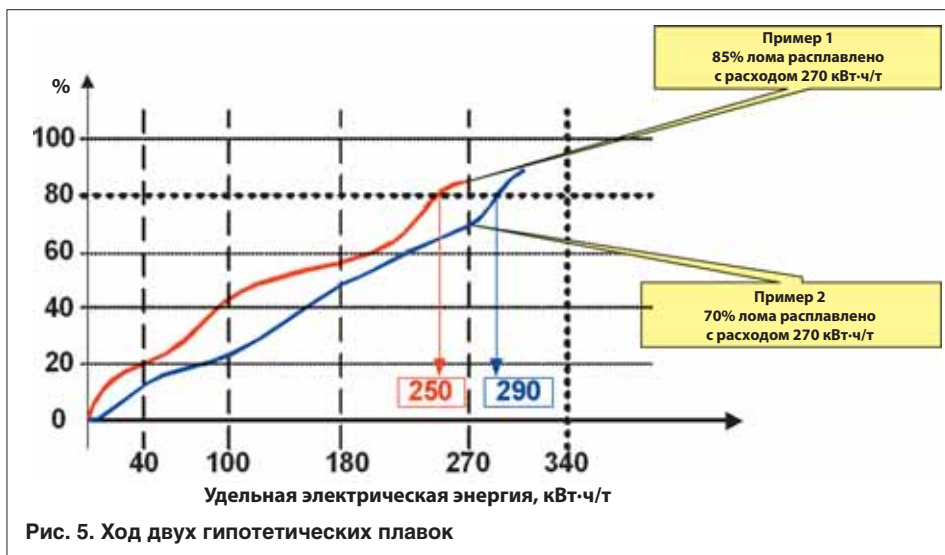


Рис. 5. Ход двух гипотетических плавков

энергии с учетом массового/энергетического баланса в печи, поэтому она обеспечивает более точные данные в сравнении с прежними расчетными оценками состояния шлака и ванны (температуры и состава). Следовательно, можно осуществить реальный контроль вспенивания шлака, обезуглероживания, перегрева при рафинировочной или непрерывной загрузке.

Модель плавления в печи iEAF работает на основе данных, получаемых от моделей шахты печи и ванна/шлак. По значениям нетто энергии (химической и электрической, без потерь) модель плавки реализует вычисление в реальном времени распределения энергии между нагревом (рост температуры лома) и плавлением (от твердого лома до жидкой стали). Таким способом рассчитывается ход процесса плавления лома. Динамические расчеты позволяют по очереди реализовать пошаговую плавку (более подробно — см. ниже) в соответствии со степенью плавления (а не только по электрической энергии, как это обычно делается).

Сам по себе такой подход позволяет использовать модули контроля для оптимизации полного процесса.

Интерактивные датчики и интегрированные математические модели обеспечивают фундаментальное знание процесса и улучшенное регулирование процесса плавки. Информация от модели шахты печи, объединенная с данными моделей плавления и ванна/шлак улучшает понимание процесса плавки.

В табл. 1 представлен обзор измеренных и расчетных параметров, показано расширение новой доступной информации на печи iEAF, что в совокупности и позволяет успешно реализовать развитое управление работой ЭДП. Далее в статье более подробно описаны основные принципы этого процесса.

### Пошаговое управление ЭДП

Как правило, доставка химической энергии в ЭДП основана на фиксированных профилях подачи кислорода и топлива. Для определения рабочей точки в функции удельной электрической энергии, поставляемой в печь (кВт·ч/т), используют стандартные профили горелки. То есть печь работает с фиксированной электрической энергией. Тот же принцип применяется к электрической программе и в большинстве случаев для управления системой удаления отходящих газов.

Недостатком такой стратегии является то, что она не требует соответствия нормы поставляемой электрической энергии темпу хода процесса. Несоответствие между развитием процесса плавления и фиксированной электрической энергией часто приводит к повышению химической энергии в печи. Здравый смысл приводит к одному выводу, что процесс является жесткой функцией нетто общей энергии (электрической и химической), поставляемой в печь, а не только одной электрической энергии.

Например, на рис. 5 показан ход двух гипотетических плавков, представленный как зависимость доли расплавленного лома в функции удельной электрической энергии, поставляемой в печь. В первом случае, 85% лома было расплавлено с подачей 270 кВт·ч/т. Во втором случае, как во втором примере, 70% лома было расплавлено с подачей 270 кВт·ч/т электрической энергии.

Принимаем далее что, с эксплуатационной точки зрения, идеальным моментом для завалки следующей порции шихты является 80% расплавленного лома (точка, когда расплавлено достаточно лома для реализации следующей завалки).

Неэффективность, связанная с подачей фиксированной электрической энергии на основе профиля, становится очевидной. В первом случае, последующая завалка может быть осуществлена раньше при 250 кВт·ч/т. Во второе время как, во втором случае, перед осуществлением последующей завалки оператор должен подождать, пока подвод энергии не достигнет 290 кВт·ч/т перед завалкой шихты. Если оператор примет решение осуществить завалку в печь при 270 кВт·ч/т электрической энергии, то это будет с опозданием для первого случая, и слишком рано для второго.

Те же самые проблемы связаны со многими аспектами работы печи. Например, начало процесса рафинирования, шаговая установка настроек горелки, начало вдувания углерода, начальная точка рафинирования, настройка электрических параметров, демпферное регулирование системы отвода газов и др. Ход плавки является более жесткой функцией доли расплавленной шихты, чем подачи удельной электрической энергии, поэтому и печь должна управляться соответственно. Эта специфическая проблема пошагового регулирования ЭДП признана другими разработчиками, которые также

пытались шагами регулировать плавку в соответствии с подаваемой полной энергией. Их успех, однако, был ограничен тем фактом, что без знания состава отходящего газа, их модели не учитывали текущую химическую энергию, выделяемую в печи и потери энергии с отходящим газом, как это реализуется в печи iEAF. По этим причинам, в печи iEAF используется процент расплава, как индикатор хода плавки в печи и для определения профиля работы печи: горелок, инжекторов, электрической энергии и добавления флюсов.

### Модули регулирования и оптимизации

В дополнение к подходу ведения плавки в ЭДП в соответствии с фиксированной долей расплава шихты, модули управления iEAF оценивают всестороннюю информацию, снабжаемую моделями процесса и решают, как управлять процессом реализуя в реальном масштабе времени соответствующие управляющие воздействия. Разработано множество модулей оптимизации, направленных на устранение общих неэффективных элементов процесса ЭДП:

- оптимизация затрат на дожигание на основе стоимости;
- оптимизатор электрической энергии;
- определение начала процесса рафинирования;
- оптимизатор вспенивания шлака;
- определитель конца плавки.

### Оптимизация дожига на основе стоимости

Идея и выгоды, обеспечиваемые дожигом в ЭДП, широко обсуждались последние десятилетия. Идея была реализована с различной степенью интеграции. Простейшее внедрение начинается с оценки эффективности дожига в процессе плавки и настройки подачи суперстехиометрического кислорода в соответствии с фиксированным профилем работы горелки. Этот метод требует использования статических профилей горелки, которые обычно проектируют по фиксированной электрической энергии кВт·ч/т. Традиционный подход EFSOP, обеспечивающий доступность данных о составе отходящего газа, развивает эту идею с динамическим регулированием подачи кислорода и метана в ответ на состав отходящего газа.

Настройки подачи кислорода и метана регулируются динамически по ходу плавки согласно параметру, указывающему степень дожига.

Концепция печи iEAF основана на таком подходе, но различается по двум основным аспектам.

- Профили горелки больше не рассчитывают во времени в соответствии с фиксированной электрической энергией. Вместо этого реализуется пошаговый ход процесса в соответствии с процентом расплава завалки, приводящий к более согласованной работе печи.
- Вместо того, чтобы регулировать вдувание кислорода и метана только по степени дожига, работа печи iEAF управляется по целевой функции, основанной на экономических показателях доставки энергии в печь. Это становится возможным за счет доступности динамических значений массового и энергетического балансов, снаб-

Регулятор	Химическая программа	Электрическая программа	Программа загрузки материалов	Электрический оптимизатор	Детектора начала рафинирования	Оптимизатор вспенивания шлака	Оптимизатор конца плавки
Регулятор электрода		●		●	●		●
Инжекторы извести	●				●	●	
Инжекторы углерода	●				●	●	●
5-е окно для присадок и флюсов			●			●	
Горелки	●						
КТ фурмы-горелки	●						

Таблица 2. Основные модули регулирования и направления их воздействия.

жаемых моделью шахты печи. В каждом цикле регулирования система определяет эффективность передачи химической энергии к жидкой стали и величину экономической выгоды (\$/МВт) от этой энергии. В то же самое время учитываются затраты на кислород и метан (\$/Нм<sup>3</sup>). Максимизация прибыли за вычетом затрат обеспечивается оптимальными настройками. Успешное внедрение требует учета механических ограничений систем подачи кислорода и метана, учета других эксплуатационных соображений. Они реализуются в виде ограничений на диапазон настроек подачи кислорода и метана.

## Электрический оптимизатор

Конечная задача модуля Электрический оптимизатор состоит в том, чтобы динамически в ходе цикла плавки корректировать/исправлять и адаптировать электрические рабочие точки для гарантированно эффективной передачи электрической энергии в печь. Модуль основан на модели, описывающей электрическое поведение печи. Разработанная модель обеспечивает оценку и предсказание передачи электрической энергии в ванну, улучшает работу регулирующих систем в ответ на изменения процесса.

Специфические задачи этого модуля включают:

- оптимизацию электрической рабочей точки, основанную на динамической круговой диаграмме;
- динамическую стабилизацию электрического тока, как функцию стадии процесса;
- оценку работы регулятора на стадиях плавления и рафинирования.

Электрическая оптимизация дополняется точными управляющими воздействиями. Такими как, автоматическое обнаружение дисбаланса тока и напряжения как функции динамической триангулярной диаграммы и их восстановление; контроль на каждой фазе длины дуги и ее регулирование в функции технологических параметров (температура панелей, уровни гармоник, подача кислорода и инъекция углерода) с окончательной целью оптимизации передачи энергии (электрической и химической).

## Датчик начала рафинирования

Цель этого модуля состоит в получении согласованной точки в ходе плавки для начала операций по рафинированию (продувки кислородными фурмами, вдуванию углерода и извести). Обычно в фазе плавления для нагрева и плавления лома используют горелки и инжекторы кислорода, в то время как, при рафинировании горелки отключаются или переводятся в режим низкого горения, а инжекторы кислорода переключаются

на режим продувки. Без ясного понимания того, когда нужно осуществлять переключение между этими двумя различными режимами работы, операторы полагаются на отклики процесса (визуальный контроль через открытое шлаковое окно, шум работающей печи, стабильность горения дуги, достижение заданной величины удельного потребления электрической энергии).

Проблемы выбора момента перехода от фазы плавления к рафинированию в условиях фиксированной электрической энергии (кВт·ч/т) были обсуждены ранее. С точки зрения процесса, переход должен быть основан на анализе физического процесса в печи, при достижении плоской ванны (расплавлении достаточного количества лома) и стабилизации дуги.

Система iEAF обеспечивает возможность автоматического определения формирования плоской ванны и следовательно, точного определения начала рафинирования.

В то время как «процент расплавления» является ключевым индикатором, другие реплики процесса также принимаются во внимание, например, гармонический анализ от системы стабилизации электрода.

Кроме того, переключение от режима плавки к режиму рафинирования не обязательно осуществлять дискретно и одновременно для всех инжекторов/горелок. Существует также возможность подключения части химического пакета для рафинирования, при сохранении остальной части в режиме плавления.

## Оптимизатор вспенивания шлака

Формирование шлака в электрический печи выполняет ряд функций:

- изолирует стальную ванну, чтобы снизить тепловые потери;
- поглощает продукты окисления из стали (FeO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> и др.);
- покрывает электрическую дугу, чтобы облегчить передачу электрической энергии к ванне и предохранить огнеупорную футеровку или панели на боковых сторонах печи и крышке;
- предохраняет ванну жидкого металла от захвата нежелательных газов типа водорода и азота.

Для оптимизации параметров и реализации режима вспенивания шлака необходимо наведение шлака с надлежащим химическим составом и температурой. Отклонения от идеального состава и температуры могут затруднить наведение требуемого вспененного шлака. Для наведения надлежащего пенного шлака могут применяться инъекция кислорода (формирование окиси желе-

за) и вдувание углерода (восстановление окиси железа). На некоторых заводах в течение стадии рафинирования возможно добавление извести или доломита через фурмы или загрузкой через окна крышки.

Модель ванна/шлак обеспечивает динамическую оценку состава шлака в течение всего периода рафинирования. Это становится возможным за счет динамического расчета кислорода, способствующего шлакообразованию. Восстановление окиси железа вдуванием углерода или реакциями обезуглероживания также можно рассчитать. Это используется для динамического управления режимом наведения вспененного шлака наряду с другими индикаторами (стабильность дуги и электрические гармоники).

## Оптимизатор конца плавки

Наиболее эффективный способ работы ЭДП состоит в одновременном достижении в конце плавки как заданного состава, так и требуемой температуры жидкой стали. Задачей этого модуля является управление периодом рафинирования так, чтобы конечные результаты по содержанию углерода и температуре были достигнуты одновременно. Модель прогноза конца плавки вычисляет ожидаемые траектории изменения состава углерода и температуры. Для их выравнивания применяют управляющие воздействия (например, увеличивая или снижая инъекцию кислорода, регулируя электрическую рабочую точку).

## Координация управляющих модулей

Вообще говоря, все модули разработаны для непрерывного функционирования в течение всей плавки (табл. 2). Поэтому, при принятии отдельных модулями противоречивых решений по управлению могла нарушиться работа печи. Для избежания этого в системе реализованы следующие общие правила.

- Значения настроек, определенные Химической и Электрической программами могут быть изменены/переписаны (в некоторых диапазонах) другими модулями.
- Программа загрузки материалов устанавливает операции завалки и их выполнение в заданное время. Возможные конфликты избегают с помощью Оптимизатора вспененного шлака, учитывающего операции, планируемые программой загрузки шихты перед выполнением этих действий.
- Оптимизатор дожигания функционирует только в фазе плавления и вторично подключается на стадии рафинирования.
- Оптимизаторы вспенивания шлака и конца плавки работают только в течение фазы рафинирования. Поскольку управляющие воздействия от каждого модуля потенциально могут находиться в противоречии, каждому из них присваивается приоритет перед другими согласно выполняемым операциям.

## Экономия и выгоды

Крупный ученый и отец термодинамики, ирландский лорд Кельвин (Уильям Томсон, 1824-1907), писал: «Когда Вы можете измерить то, о чем Вы говорите, и выразить это в числах, Вы уже что-то знаете об этом; но когда Вы не можете измерить это, когда Вы не можете выразить это в числах, уровень

## Управление процессами

Вашего знания весьма скуден и неудовлетворителен...»

Кроме того, нельзя управлять тем, что нельзя измерить. Печь iEAF реализует такой подход, при котором количественно описываются все процессы ЭДП, насколько это возможно.

Точное регулирование фаз плавки посредством пошагового управления печью по общему нетто значению энергии и дожигание на основе затрат, гарантирует:

- сокращение времени включения энергии;
- снижение времени простоев при загрузке печи (время задержек при отключенном питании между завалками);
- оптимизацию расходов потребляемой энергии и материалов (кислород, топливо и электричество);
- эффективное регулирование работы системы отводящего газа, сбалансированной по параметрам работы печи.

Работа продвинутых модулей регулирования на стадии рафинирования (включая начало рафинирования, оптимизатор вспенивания шлака и оптимизатор конца плавки) гарантирует:

- минимизацию переокисления ванны (снижение добавок ферросплавов);
- сбалансированную практику наведения вспененного шлака (уменьшенный износ огнеупоров, повышенный выход при минимизации массы шлака);
- повышенный выход годного;
- снижение колебаний параметров в конце

плавки и логистические преимущества по всему сталеплавильному цеху;

- снижение числа отбора образцов для определения температуры и содержания углерода, требуемых в конце каждой плавки.

В дополнение к этим преимуществам, существует множество других, правда трудно количественно измеряемых, но также обеспечивающих производителям стали существенные выгоды:

- повышение безопасности работы печи за счет обнаружения высоких или аварийных концентраций воды в отходящем газе из печи (свидетельствующих о наличии утечек воды);
- более глубокое понимание процесса и операций на ЭДП;
- возможность оценки работы и разработки стратегии для улучшения операций на ЭДП за счет более глубокого понимания процесса.

Система iEAF является модульной, но ее можно «наращивать» с добавлением различных компонентов с целью точного интегрирования с действующими в цехе автоматическими системами управления процессом.

Фирма TenarisDalmine стала пионером и сослалась стать базовой компанией для внедрения печи iEAF. Этот проект уже успешно реализуется совместными усилиями его участников: TenarisDalmine, Tenova Automation, Tenova Goodfellow. Все модели процесса разработаны до уровня рабочих

программ, отлажены и отработаны, утверждены для промышленного применения на заводе Dalmine. ■

### Список литературы

1. J. Maiolo, E.J. Evenson, O.I. Negru. Goodfellow EFSOP® Successes at TAMSA. Veracruz. AISTech 2004 Conference, Nashville, TN, September 2004.
2. J. Kelleher, M.I. Khan. Yield and Productivity Savings Using Goodfellow EFSOP® at MacSteel Arkansas. AISTech 2006 Conference, Cleveland, OH, May 2006.
3. D. Vensel, M.I. Khan. EAF Performance Improvement at Nucor Steel Auburn using Goodfellow EFSOP®. AISTech 2006 Conference, Cleveland, OH, May 2006.
4. K. Nikkanen, M.I. Khan, J. Gavina. Furnace Water Leak Detection and Reduced Costs Efforts at Aceria Compacta de Bizkaia, Spain using the Goodfellow EFSOP® System. AISTech 2007, Indianapolis, IN, May 7-10, 2007.
5. J.A. Maiolo, M. Boutazakhti, C.W. Li, C. Williams. Developments towards an Intelligent Electric Arc Furnace at CMC Texas using Goodfellow EFSOP® Technology. AISTech 2007, Indianapolis, IN, May 7-10, 2007.
6. M. Pozzi, J. Maiolo, D. Masoero et al. Operating Results of Goodfellow EFSOP® at Riva, Italy. METEC 2007, Dusseldorf, Germany. June 2007.
7. V. Scipolo, M. Khan, S. Patil, G. Holmes. Optimization of the EAF process at CAPE GATE (Davsteel Division) using Goodfellow EFSOP® Technology. European Electric Furnace Conference, Krakow, Poland, 2008.

### Contact:

Tenova SpA, Via Monte Rosa 93, I-20149, Milano, Italy.  
Tel.: +39 02 43841. Fax: +39 02 4384 7695.  
E-mail: [metalmaking.sales@it.tenovagroup.com](mailto:metalmaking.sales@it.tenovagroup.com)  
[www.tenovagroup.com](http://www.tenovagroup.com)