

## **ПРОМЫШЛЕННОЕ ОСВОЕНИЕ КОМПЬЮТЕРНОГО УПРАВЛЕНИЯ ВЫПЛАВКОЙ СТАЛИ НА БМЗ И ММЗ НА ОСНОВЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОРАКУЛ**

*А.Г.Пономаренко, М.П.Гуляев, И.В.Деревянченко, С.А.Храпко, Р.Н.Мартынов, Р.В.Синяков, Д.А.Пономаренко, О.Л.Кучеренко, Р.Н.Пильчук.  
Труды 5 конгресса сталеплавателей. — Москва, 1999, с.*

Развитие концепции дуговой печи сверхвысокой удельной мощности в последние десятилетия внесло существенные коррективы в наши представления о перспективах и возможностях сталеплавильного процесса в целом. Возник ряд новых проблем, и одна из них связана с компьютеризацией производства. Все вводимые в строй сталеплавильные заводы и агрегаты по крайней мере на протяжении последних 10-15 лет, оснащаются компьютерными системами управления, накоплен определенный опыт, и сейчас уже можно сделать некоторые выводы, касающиеся управления технологией выплавки стали.

Современный сталеплавильный агрегат представляет собой высокомеханизированный комплекс, включающий, кроме основных реакторов (ДСП, конвертер, ковш), целый ряд вспомогательных устройств (дозировочные и загрузочные устройства, фурмы, горелки, манипуляторы, системы управления движением электродов, характеристиками дуги и т.п.). Все эти устройства снабжены весьма совершенными локальными средствами автоматики, которые в совокупности образуют так называемый первый уровень (или технические средства) управления. Существующие системы первого уровня позволяют с достаточной надежностью реализовать все технологические операции плавки по сигналам, поступающим от оператора или от управляющей системы второго уровня, основная функция которых состоит в выработке решений по управлению технологическим процессом и его оптимизации. До настоящего времени такие системы находятся в стадии становления, и вопросы — когда, что и сколько нужно вводить в печь для поддержания высоких и устойчивых показателей процесса — решаются исключительно на основе знаний, опыта и интуиции технологов.

В одном из докладов, представленных на настоящем Конгрессе работниками ММЗ (А.К.Бабичев, А.В.Гальченко, И.В.Деревянченко. Автоматизация энерготехнологического режима современной электросталеплавильной печи. Труды 5-го конгресса сталеплавателей), приводится анализ причин брака в работе, где показано, что если 10 лет назад из 100 таких случаев лишь 20 приходилось на ошибки персонала, остальное — на отказ оборудования, то сейчас положение сменилось на обратное. Можно привести ряд других указаний на то, что в настоящее время процесс дальнейшего развития технологии плавки в сверхмощной печи лимитируется качеством управления и выбором режимов, учитывающих специфику форсированного процесса. Решение именно этих задач относится к компетенции второго уровня.

Компьютерные системы управления разрабатываются специалистами из области вычислительной техники, кибернетики, оптимального управления, имеющих свое "видение" проблемы автоматизации, решающих вполне определенный круг задач и использующих свой арсенал средств и возможностей. Кибернетика решает вопросы управления путем обработки информации, т.е. предметных знаний об управляемом объекте, вводимых в форме его математической модели. Сама кибернетика этих знаний не производит, она должна их получить в готовом виде из смежных предметных областей, специализирующихся в этом вопросе, в данном случае из области теории, технологии и практики сталеварения.

В результате специальных исследований, была разработана строгая физико-химическая модель плавки, создан пакет прикладных программ ОРАКУЛ [1, 2] и в содружестве с технологами и специалистами АСУ ММЗ и БМЗ ведется работа по их внедрению в практику. В этом сообщении кратко представлен общий принцип работы системы ОРАКУЛ в качестве управляющей системы, обсуждаются предварительные результаты внедрения и перспективы.

Управление, как известно, основывается на предвидении, эту функцию выполняет модуль прогноза, опирающийся на систему уравнений — математическую модель процесса. Это модуль предсказывает состав продуктов плавки на основе данных о загруженных в печь материалах. Качество работы этого модуля определяет показатели и возможности системы управления в целом. При выработке оптимальных решений по управлению процессом та же система уравнений решается в обратном направлении: состав металла задан, а находятся оптимальные значения входных (управляющих) параметров при минимальном (или максимальном) значении выходного параметра, выбранного в качестве целевой функции, например, при минимуме суммарных затрат на материалы и энергоносители.

Обычно модель получают путем статистической обработки массива экспериментальных данных, полученных на уже действующем конкретном объекте, т.е. когда агрегат уже создан и технологическая схема уже разработана. Поэтому область поиска оптимальных решений ограничена жесткими рамками существующей технологической схемы и областью варьирования переменных в исходном массиве.

В отличие от этого, ОРАКУЛ опирается на чисто теоретическую модель, позволяющую даже без статистической "привязки" решать широкий круг практических задач. В случае теоретической (детерминированной) модели поиск возможных решений может происходить во всей, практически не ограниченной области действия физико-химических законов и констант, при

этом, по крайней мере в принципе, система может предлагать, или, как говорят, генерировать, новые технологические решения. Поиск в области принципиально возможных, но еще не реализованных на практике решений относится к элементам творческого процесса, именно по этой причине системы управления, обладающие такой способностью, иногда называют интеллектуальными.

Интеллектуальные системы позволяют, в частности, реализовать принцип ситуационного управления, который схематически состоит в следующем. Управление процессами выплавки и внепечной обработки начинается с проектирования очередной плавки. В качестве входной информации используются марка (или состав) стали, перечень материалов, имеющих на складе, характеристики оборудования и дополнительные ограничения, диктуемые условиями производства (состояние оборудования, условия смежных переделов, директивные ограничения и др.). После получения задания на плавку ОРАКУЛ выдает расчетный график будущей плавки с детальной проработкой режимов работы всех управляющих органов, оптимальных масс вводимых материалов, полную калькуляцию затрат по переделу, и выдает сообщения технологам, обеспечивающим службам и другим по заранее согласованному списку. При поступлении замечаний эта процедура повторяется до полного согласования. После получения согласия (или по умолчанию), ОРАКУЛ в назначенный момент приступает к реализации плана, непрерывно отслеживая текущие промежуточные результаты в сопоставлении с расчетными (фактические показания датчиков, замеры температуры, поступающие химические анализы и др.). При возникновении существенных отклонений от расчетного графика ОРАКУЛ сигнализирует об этом, повторяет расчет с учетом изменившихся условий, проводит согласование и продолжает плавку по измененному графику. В любой момент времени оператор может взять управление на себя или вернуться в автоматический режим. Во время перехода на ручное управление ОРАКУЛ продолжает работу в том же режиме, дополнительно учитывая действия сталевара, выводя свои рекомендации на экран, т.е. в режиме советчика, оставаясь при этом готовым снова принять управление "на себя".

Ряд параметров объекта, необходимых для управления, мы не можем ввести заранее, поскольку они индивидуальны для каждого агрегата и, главное, изменяются во времени (кинетические коэффициенты, тепловой КПД, эффективность дутьевых устройств и т.д.). Их значения могут быть найдены лишь статистически путем обработки данных массива прошлых плавков, относящихся к данному агрегату. Накопление таких коэффициентов и их использование в качестве "констант" или "характерных величин" может приводить к существенным ошибкам в управлении из-за непостоянства во времени (разгар футеровки, износ или замена отдельных узлов оборудования, неоднородность поступающего сырья, сезонные изменения и т.п.). В системе ОРАКУЛ все необходимые для работы коэффициенты определяются по ограниченному массиву последних плавков и обновляются по окончании каждой плавки. Это позволяет при планировании очередной плавки использовать не только наиболее достоверные значения, констант, но и учитывать при необходимости их тенденции, дисперсию и другие статистические характеристики. Эту функцию выполняет система динамической адаптации.

На ДСП-1 БМЗ запущены в реальном времени модули непрерывного прогноза текущего состава металла и шлака и температуры ванны. На ноябрь этого года намечено включение модуля расчета оптимального набора материалов для раскисления и легирования на сливе и интегрированного блока проектирования плавки, являющегося основой системы ситуационного управления и структурной оптимизации технологии. Полный ввод системы ведения плавки в ДСП-1 БМЗ в автоматическом режиме предусматривается формируемым сейчас планом работ на 1999 г.

Ключевым элементом всей системы является модуль прогноза текущего химического состава продуктов плавки в реальном времени. При получении первого анализа система просчитывает дальнейшие изменения состава по всем элементам и температуру ванны, учитывая расход энергии, кислорода и все добавки по ходу плавки. Кинетическое запаздывание учитывается единственным статистическим параметром, общим для всех элементов, характеризующим интенсивность перемешивания ванны. Учет других кинетических особенностей оказался излишним, Прогноз состава продуктов плавки выдается по 14 элементам (C, Si, Mn, P, S, Cr, Ni, Cu, Ca, Mg, Al, Fe, O, F). Для расширения числа рассчитываемых элементов не требуется изменения программы. Погрешность расчета по C, Mn, P и S во время сдаточных испытаний системы не превышала 20 % (отн.) и снижалась к концу плавки.

На ММЗ внедрены адаптированные к условиям завода программы для прогнозирования, ведения плавки в режиме советчика и моделирования сталеплавильного процесса в диалоговом режиме, с помощью которого можно "проигрывать" различные технологические варианты. Завершена также отладка и включен в работу блок прогноза состава металла на установке ковш-печь.

Основной задачей настоящей работы является проверка возможностей отдельных элементов системы ОРАКУЛ в условиях существующей на заводах информационной среды и технологии, а также выполнение подготовительных работ по запуску системы в автоматическом режиме (в случае получения положительных результатов). Оценка работоспособности вводи-

мых модулей и их использование для управления осуществлялась в режиме "Советчик сталевара".

В процессе развертывания системы — вплоть до запуска в автоматическом режиме — не предусматривалось никакого вмешательства в сложившуюся структуру технологических процессов, оптимизация пока охватывает лишь массы и виды расходуемых материалов. Однако уже в процессе "привязки" отдельных модулей системы и особенно после их включения в реальном времени с автоматическим вводом всей необходимой информации был получен ряд интересных и даже неожиданных результатов.

В области так называемой "критической концентрации" углерода, т.е. на завершающей стадии плавки, когда прогноз должен быть особенно точным, известный своеобразный ход кривой окисления углерода получается "автоматически", непосредственно из термодинамического расчета и материального баланса, без каких-либо предположений относительно лимитирующих звеньев и других кинетических факторов. Резкое замедление скорости окисления углерода происходит просто потому, что после некоторой ("критической") концентрации львиная доля каждой порции кислорода  $dm_O$ , поступающей в жидкий металл, расходуется не на окисление углерода ( $\frac{16}{12}dm_{[C]}$ ), а на растворение в металле ( $dm_{[O]}$ ). Материальный баланс по кислороду выглядит так:

$$dm_O = dm_{[O]} + 16/12 dm_{[C]}. \quad (1)$$

Если учесть при этом, что в любой момент времени в жидком металле выполняется соотношение

$$[C] \cdot [O] = m' \quad (m' \approx 0.0025), \quad (2)$$

то совместным решением (1) и (2) можно получить зависимость

$$V_C = V_O \cdot (m'/[C]^2 + 16/12)^{-1}, \quad (3)$$

точно воспроизводящую вид кривой "с изломом", послужившим основой для предположений о смене лимитирующих звеньев. Если, кроме этого, учесть, что в области низкого углерода он частично окисляется до  $CO_2$ , а в присутствии шлака кислород расходуется на окисление железа и других (кроме углерода) примесей в металле, мы получим кривую окисления углерода, количественно воспроизводящую как производственные данные, так и изящные лабораторные кривые.

Скрупулезный материальный и энергетический балансы, а также термодинамический и экономический расчеты, используемые блоком проектирования плавки на каждом шаге, позволили в новом свете увидеть некоторые, казалось бы, очевидные вещи. Так, цель плавки в сверхмощной печи, работающей без ковша-печи, грубо состоит в том, чтобы в возможно более короткий промежуток времени получить из среднестатистического лома расплав с температурой 1700 °С, кондиционный по углероду и фосфору. Однако уже первые попытки автоматического проектирования технологии в условиях ДСП-1 БМЗ показали невозможность полного использования мощности печного трансформатора из-за неоптимальной организации технологического процесса, проявляющейся в нехватке кислорода на завершающей стадии плавки.

Исходя из энергетических соображений, можно завершить "жидкий" период через 10-15 мин после расплавления. Однако на отдельных плавках приходится "ждать" еще до 20 мин, пока ванна получит кислород, необходимый для окисления всех примесей и неизбежного при этом частичного окисления железа. Этот недостаток характерен для большинства действующих печей сверхвысокой удельной мощности, он известен технологам, однако использование блока планирования позволяет более полно анализировать ситуацию и с помощью машинных экспериментов в режиме "что, если" находить решения по оптимизации процесса.

Таким образом, опробование элементов системы ОРАКУЛ в реальном времени на ДСП-1 БМЗ в режиме непрерывного прогноза химического состава и температуры продуктов плавки, а также испытания в условиях ММЗ с ручным вводом информации подтвердили их достаточную точность для использования в качестве основы системы управления плавкой. Получен ряд интересных результатов, касающихся кинетики процессов и режимов ведения плавки. При использовании в качестве "советчика" система позволяет существенно снизить затраты на легирование, уменьшить число проб и замеров температуры, оптимизировать структуру технологического процесса. Более полно возможности системы могут быть реализованы в автоматическом режиме.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пономаренко А.Г. Термодинамическая модель плавки и проблема модели сталеплавильного процесса // *Сталь*. 1991. № 1. С. 19-23.
2. Пономаренко А.Г., Окоукони П.И., Храпко С.А., Иноземцева Е.Н. Управление сталеплавильными процессами на основе современных физико-химических представлений. Труды 4-го конгресса сталеплавильщиков. — Москва, 1997, с. 35-40.