

## ОПТИМИЗАЦИЯ ОКИСЛИТЕЛЬНОГО ПЕРИОДА В ВЫСОКОМОЩНОЙ ДСП

Синяков Р.В., Храпко С.А.

Донецкий государственный технический университет, г. Донецк

*Разработан метод оптимизации окислительного периода в высокомошной дуговой сталеплавильной печи (ДСП), позволяющий согласовать нагрев металла до заданной температуры и получение требуемого химического состава полу-продукта. Разработанные модель и алгоритмы предназначены для систем автоматического управления технологическим процессом плавки в высокомошной ДСП, а также для систем автоматизированного проектирования технологии плавки.*

В июле 1999 года впервые в мировой практике запущена система ситуаци-онного управления плавкой в автоматическом режиме. В настоящей статье при-водятся решения, представляющие собой дальнейшее развитие системы ОРАКУЛ [1], позволяющие более четко организовать работу печи со смежными переделами и дополнительно оптимизировать технологический процесс в окислительный пе-риод.

С целью повышения производительности современные дуговые сталепла-вильные печи помимо мощных трансформаторов оснащаются большим количест-вом приспособлений и механизмов для ввода окислителей и альтернативных ис-точников тепла (кислород, твердое топливо, газ), что приводит к резкой интенсификации сталеплавильных процессов. В настоящее время высокомошные ДСП по продолжительности плавки приблизились к кислородному конвертеру, в связи с этим возрастают требования к скорости и качеству принимаемых технологиче-ских решений по управлению плавкой. Цена ошибок и организационных задержек быстро растет, особенно сильно отражаясь на энергоемкости продукции, в связи с заменой футеровки мощной системой водяного охлаждения. В работе [2] приво-дится анализ причин технологических сбоев, где показано, что 10 лет назад из ста таких случаев лишь двадцать приходились на ошибки персонала, остальное – на отказы оборудования, то сейчас в связи с форсированием процесса ситуация из-менилась на обратную – на ошибки персонала приходится 80% отказов.

Стремление к снижению длительности плавки зачастую приводит к возрастанию себестоимости металла из-за неудачно выбранных режимов работы меха-низмов печи. Плавку в высокомошной ДСП можно условно разбить на два основ-ных периода: расплавление металлошихты и доводка. Назначение последней, в отличие от первого периода, заключается не только в нагреве, но и в получении металла на выпуске заданного химического состава. Главной особенностью этого периода является необходимость синхронизации процессов нагрева и рафиниро-

вания металла, т.к. несогласованность приводит к повышению материальных и энергетических затрат, расхода раскислителей и легирующих [3].

Изменяя расход альтернативных источников тепла, ступени напряжения трансформатора, массы и типы шлакообразующих и вспенивающих добавок, можно добиться согласованности в скоростях окисления примесей и нагрева металла. Например, недостаток окислителя можно компенсировать заменой извести известняком или добавкой руды; перегрев металла можно предупредить, перейдя на более низкую ступень напряжения трансформатора; дополнительное тепло можно внести твердым энергоносителем (например, коксом) и т.д. Как видно, качественная оценка возможных действий не представляет особой сложности, однако при этом следует учитывать влияние вносимых изменений на другие параметры плавки, в частности, добавка известняка вместо извести требует больших энергетических затрат, присадки кокса требуют дополнительного расхода окислителя, необходимо учитывать время растворения вводимого материала и т.д. Для количественной оценки необходимо охватить все многообразие изменяемых параметров плавки и различных вариантов. Очевидно, что последних может быть большое количество и выбор оптимального варианта простым перебором является трудоемкой и алгоритмически сложной задачей.

В данной работе предпринята попытка создания алгоритма, способного автоматически управлять работой агрегатов и механизмов печи на завершающей стадии выплавки, для чего необходимо рассчитать оптимальные количества шихтовых материалов и энергоносителей, введение которых в систему дает состав металла и температуру, удовлетворяющие заданным требованиям (ограничениям).

Поставленная задача является задачей условной оптимизации, т.е. поиска таких значений оптимизируемых переменных, при которых достигается минимум целевой функции при условии выполнения заданных ограничений на оптимизируемые переменные. В качестве целевой функции могут использоваться:

- суммарная стоимость материалов и энергоносителей

$$S = \sum_j Q_j \cdot X_j + \sum_i Q_i \cdot E_i \rightarrow \min, \quad (1)$$

где  $Q_j$  и  $Q_i$  – цены имеющихся шихтовых материалов и энергоносителей;  $X_j$  – масса  $j$ -ого материала, кг;  $E_i$  – количество введенного газообразного энергоносителя;

- длительность расчетного периода  $\tau$

$$S = \tau \rightarrow \min. \quad (2)$$

Ограничениями на оптимизируемые переменные являются требования к расчетной температуре и химическому составу металла, которые должны удовлетворять следующим пределам:

$$T^h \leq T \leq T^g, \quad (3)$$

$$P_i^H \leq P_i \leq P_i^6, \quad (4)$$

где  $T^H$  и  $T^6$  – верхний и нижний пределы температуры металла на выпуске;  $P_i^H$  и  $P_i^6$  – верхний и нижний пределы содержания элементов в металле в конце рассчитываемого периода.

Для решения поставленной задачи необходимо знать функциональную зависимость изменения температуры металла от количества вводимых энергоносителей и материалов, а также зависимость химического состава металла и шлака от введенного кислорода.

Изменение температуры металла по ходу плавки определяется количеством тепла, поглощенного ванной, и в первом приближении может быть записано в следующем виде:

$$\Delta T = \frac{k_{эл} \cdot b_{эл} \cdot E_{эл} + \sum_i k_i \cdot b_i \cdot E_i + \sum_j k_j \cdot X_j}{C} - k_{ох} \cdot \tau, \quad (5)$$

где  $\Delta T$  – изменение температуры металла за время  $\tau$ , °C;  $E_{эл}$  – количество введенной электроэнергии, кВт·ч;  $k_{эл}$  – коэффициент использования электроэнергии;  $b_{эл}$  – коэффициент перевода кВт в МДж;  $k_i$  – коэффициент использования тепла от сгорания  $i$ -го источника тепла;  $b_i$  – тепловой эффект от сгорания  $i$ -го источника тепла, МДж/м<sup>3</sup>;  $k_j$  – приход тепла (теплота растворения, энтальпия плюс физическое тепло) от ввода  $j$ -ой добавки, МДж/кг;  $C$  – суммарная теплоемкость металла и шлака в печи, МДж/°C;  $k_{ох}$  – коэффициент охлаждения системы, °C/мин.

Функциональная зависимость химического состава металла от ввода различных материалов (окислители, шлакообразующие и вспенивающие добавки и т.д.) носит нелинейный характер, что существенно осложняет решение поставленной задачи в полном объеме. Однако если исходить из концепции высоко-мощных ДСП, то основными операциями, выполняемыми в печи помимо нагрева, являются обезуглероживание и дефосфорация [4]. В этом случае условие (4) можно заменить линейным относительно рассматриваемых переменных неравенством:

$$E^H \leq E_O \leq E^6, \quad (6)$$

где  $E^H$ ,  $E^6$  – нижний и верхний пределы количества вводимого в металл кислорода, обеспечивающие выход на заданные пределы по содержанию углерода и фосфора в металле.

Баланс окислителя с учетом вводимых добавок по ходу плавки выглядит следующим образом:

$$E_O = E + \sum_j d_j \cdot X_j, \quad (7)$$

где  $E_O$  – общее количество кислорода, поступившего в металл для проведения задач рафинировки, кг;  $E$  – количество газообразного кислорода, введенного различными приспособлениями (манипулятор, фурма и т.п.), кг;  $d_j$  – коэффициент, учитывающий долю поступающего вместе с материалом кислорода либо затрачиваемого на его окисление, например, введение кокса требует дополнительного расхода окислителя  $d_{\text{кокс}} \approx -1.3$ , известняк вносит кислород ( $d_{\text{известняк}} \approx 0.1$ , известь не изменяет количество кислорода ( $d_{\text{известь}} \approx 0$ )).

Определение необходимого количества кислорода на окисление примесей  $E^H$  и  $E^6$  может быть выполнено, например, с помощью модуля прогноза химического состава металла и шлака, реализованного в пакете прикладных программ ОРАКУЛ, основу которого составляет термодинамическая оптимизационная модель системы металл-шлак-газ.

В первом приближении будем считать, что количество необходимого кислорода не зависит от количеств шлакообразующих и вспенивающих добавок. Линейность неравенств и целевой функции относительно переменных позволяет использовать для решения поставленной задачи симплекс-метод.

Подставляя (7) в (6), получаем следующую систему неравенств:

$$E^H \leq E + \sum_j d_j \cdot X_j \leq E^6. \quad (8)$$

Учитывая, что  $\Delta T$  есть разность между температурой металла  $T$ , которую необходимо достичь, и текущим значением температуры металла в печи  $T^0$ , из уравнения (5) получим:

$$T^H - T^0 \leq \frac{k_{\text{эл}} \cdot b_{\text{эл}} \cdot E_{\text{эл}} + \sum_i k_i \cdot b_i \cdot E_i + \sum_j k_j \cdot X_j}{C} - k_{\text{ох}} \cdot \tau \leq T^6 - T^0. \quad (9)$$

К системам (8) и (9) могут быть добавлены любые другие возможные технологические или организационные ограничения, такие как:

- требования к диапазону рабочих ступеней напряжения трансформатора для данного периода:

$$q_{\text{эл}}^H \leq \frac{E_{\text{эл}}}{\tau} \leq q_{\text{эл}}^6, \quad (10)$$

где  $q_{\text{эл}}^H, q_{\text{эл}}^6$  – диапазон рабочих ступеней напряжения трансформатора, кВт·ч/мин;

- требования к интенсивности ввода кислорода и газообразных источников тепла:

$$q_i^H \leq \frac{E_i}{\tau} \leq q_i^6, \quad (11)$$

где  $q_i^H, q_i^6$  – диапазон интенсивностей ввода  $i$ -го источника, кг/мин;

- требования к интенсивности подачи и массе вводимых шихтовых материалов, например, шлакообразующих и вспенивающих добавок из условий рафинирования металла от вредных примесей (сера, фосфор), экранирования дуги и времени растворения:

$$q_j^H \leq \frac{X_j}{\tau} \leq q_j^6, \quad (12)$$

$$M_j^H \leq X_j \leq M_j^6, \quad (13)$$

где  $q_j^H, q_j^6$  – диапазон интенсивностей ввода  $j$ -го материала, кг/мин;  $M_j^H, M_j^6$  – ограничения по массе вводимого  $j$ -го материала, кг. В (13) легко может быть учтена эквивалентность замены одних материалов другими. Например, возможность замены извести известняком выражается неравенствами:

$$M_{CaO}^H \leq X_{CaO} + 0.56 \cdot X_{CaCO_3} \leq M_{CaO}^6; \quad (14)$$

- требования по времени окончания расчетного периода:

$$\tau^H \leq \tau \leq \tau^6, \quad (15)$$

где  $\tau^H, \tau^6$  – ограничения по длительности расчетного периода, мин.

Решение сформированной системы неравенств (8)-(14) дает набор видов и масс шлакообразующих и вспенивающих добавок  $X_j$  и количеств энергоносителей  $E_i, E_{эл}$ . При необходимости точность результата может быть повышена, если учесть некоторую зависимость необходимого количества кислорода от количества шлакообразующих добавок, повторив расчет  $E^H, E^6$  и решение симплекс-задачи.

Как указывалось ранее, оптимизация может выполняться по двум критериям: по стоимости или по времени. Если ограничения (15) отсутствуют, расчет производится из условия проведения окислительного периода за минимальное время. В случае наличия ограничений по времени, оптимизация выполняется по минимальной стоимости шихтовых материалов и энергоносителей.

Для иллюстрации алгоритма проведена оптимизация окислительного периода в ДСП-100 (75 МВА) для различных исходных параметров (необходимое

количество окислителя и необходимый температурный диапазон нагрева металла приведены в таблице 1) и ограничениях на используемые материалы и режимы работы механизмов печи (табл.2). Результаты расчета приведены в таблице 3.

Таблица 1 – Исходные параметры

Вариант	Кислород, кг.		Температура, °С	
	$E^H$	$E^6$	$\Delta T^H$	$\Delta T^6$
1	50	65	170	185
2	150	165	170	185
3	150	165	50	65

Таблица 2 – Ограничения на используемые материалы и режимы работы механизмов печи

Предел	Материалы, кг.			Механизмы	
	Кокс	«СаО»	Руда	Трансформатор, ступень	Кислород, кг/мин.
Нижний	100	200	0	14	10
Верхний	200	1000	150	22	40

Таблица 3 – Результаты оптимизации окислительного периода плавки

Вариант	Материалы, кг.				Энергоносители				Время, мин
	Известь	Кокс	Известняк	Руда	Электроэнергия		Кислород		
					кВт·ч	ст	кг.	кг/мин	
Оптимизация по минимальной длительности периода									
1	200	200	0	0	7973	22	331	36	9
2	131	200	137	150	7951	22	361	40	9
3	0	100	506	150	1840	16	169	40	4,2
Оптимизация по минимальной стоимости при наличии ограничения по времени $14 \leq \tau \leq 15$									
1	200	200	0	0	8572	16	331	23	14
2	200	200	0	0	7191	14	431	31	14
3	200	114	0	0	0	0	302	22	14

Из полученных результатов (табл.3) видно, что системой были приняты следующие решения:

- при оптимизации по минимальной длительности рассчитываемого периода в варианте 2 известь частично заменена известняком, а в 3 – полностью с добавлением руды. Это свидетельствует о недостаточной мощности кислородного копия для согласования окисления примесей с нагревом металла;
- при оптимизации суммарной стоимости материалов и энергоносителей при заданном времени выпуска в варианте 2 рекомендован переход на более низкую ступень напряжения и увеличение расхода кислорода в копье для ускорения окисления примесей. В варианте 3 потребность в энергии значительно меньше, поэто-

му рекомендуется отключить дуговой нагрев металла и сократить расход кокса. Во всех случаях готовый металл будет получен через 14 минут.

Возможен случай, когда решение указывает на невозможность в заданных условиях провести окислительный период за указанное время, или с ограниченными массами шихтовых материалов и т.д. В таких случаях имеется возможность заблаговременно выдать соответствующие сообщения и провести корректировку задания и ограничений (изменить диапазон рабочих ступеней напряжения, максимальную интенсивность подачи окислителя, ограничения по массе и видам используемых материалов и т.д.).

Таким образом, разработанный алгоритм позволяет оптимизировать окислительный период плавки в сверхмощной ДСП и может быть использован для оперативного управления плавкой в автоматическом режиме, а также для перспективного проектирования и оценки новых технологических решений и конструктивных нововведений.

#### *Список литературы*

1. Пономаренко А.Г., Окоукони П.И., Храпко С.А., Иноземцева Е.Н. Управление сталеплавильными процессами на основе физико-химических представлений. // Труды четвертого конгресса сталеплавильщиков. – Москва. – 1997. – с.35-40.

2. Белитченко А.К., Кутаков А.В., Лозин Г.А., Сапрыгин А.Н., Черновол В.Н. Совершенствование технологии плавки в сверхмощной дуговой печи с использованием системы Данарк. // Труды пятого конгресса сталеплавильщиков. – Москва. – 1999. – с.128-132.

3. Бигеев А.М., Носов С.К., Трахтенгерц Е.Л., Васильева И.В. Синхронизация процессов обезуглероживания и нагрева металла на завершающей стадии конвертерной плавки. // Труды второго конгресса сталеплавильщиков, – Москва. – 1994. – с.116-117.

4. Морозов А.Н. Современное производство стали в дуговых печах. – 2-е изд., перераб. и дополн. – Ч.: Металлургия, 1987г. – 175с.