

Парсункин Б.Н., Андреев С.М., Усачев М.В., Наливкин А.К., Михальченко Е.С.

ОПТИМИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫМ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ РЕЖИМАМИ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПЕРИОДЫ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ ПЛАВКИ

В современных условиях поточного производства стали на крупных металлургических предприятиях дуговые сталеплавильные печи (ДСП) используются как высокоэффективные технологические агрегаты, предназначенные для расплавления шихты и нагрева полученного расплава до заданной температуры.

Период расплавления шихты составляет более половины продолжительности всей плавки и является практически полностью энергетическим периодом. При этом расходуется от 60 до 80% всей электроэнергии, потребляемой за плавку.

Для расширения сырьевой базы ДСП и увеличения производительности в шихте используется жидкий чугун, доля которого составляет от 20 до 50%, также применяются газокислородные фурмы-горелки, установленные в боковых водоохлаждаемых панелях и обеспечивающие подачу в рабочее пространство до 40% от требуемой для плавки тепловой энергии.

При рассмотрении энергетического режима ДСП как некоторого объекта оптимизации управления оптимизируемой величиной целесообразно использовать электрическую мощность, выделяемую в дуге, P_0 . Управляющими воздействиями

при этом являются степень напряжения печного трансформатора и сила тока дуги, определяемая при принятой степени напряжения длиной дуги или положением электрода фазы относительно металлической шихты или расплава.

Оптимальный энергетический режим при выплавке стали в ДСП обеспечивается определением и поддержанием такого оптимального значения рабочего тока дуги $I_{d\text{ опт}}$, при котором достигается максимально возможная мощность дуги $P_{d\text{ max}}$, что соответствует режиму работы ДСП с максимально возможной часовой производительностью [1, 2].

После периода расплавления шихты следуют технологические периоды (окислительный и частично восстановительный), в течение которых проводят технологические операции окисления углерода, дефосфорации и нагрева расплава.

В технологические периоды электродуговой плавки определяющим является температурный режим рабочего пространства ДСП.

Температурный режим электродуговой плавки характеризуется значительной неустойчивостью.

В результате воздействия открытых электрических дуг, выделения большого количества тепловой энергии от экзотермических реакций окисления примесей расплава и сжигания газа огнеупорная футеровка рабочего пространства интенсивно разогревается. Это приводит к ее разрушению.

Для количественной оценки воздействия тепловой энергии на температурный режим электроплавки В.Д. Смоляренко [3] предложил использовать два эмпири-

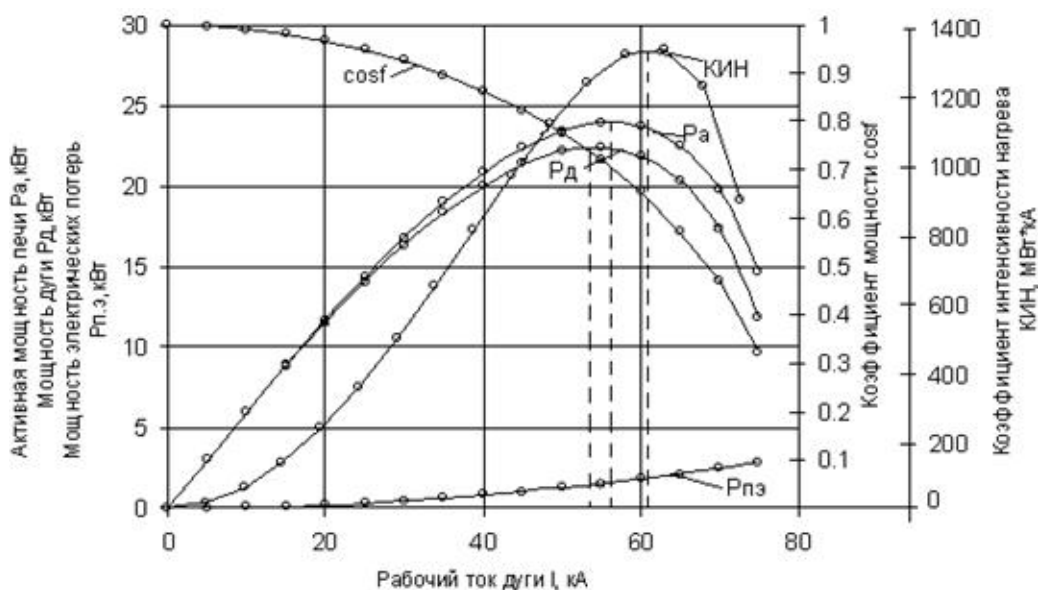


Рис. 1. Расчетные энергетические и электрические статические характеристики режима ДСП-180 ЭСПЦ ОАО «ММК» при $U=1045$ В, $x=3,5$ мОм, $r=0,5$ мОм

ческих показателя:

$KИИ = P_{\partial} \cdot I_{\partial}$ – коэффициент интенсивности нагрева, характеризующий скорость нагрева жидкого расплава;

$KИФ = \frac{P_{\partial} \cdot U_{\partial}}{a^2}$ – коэффициент износа огне-

упорной футеровки, характеризующий степень воздействия теплового излучения электрической дуги на огнеупорную футеровку ДСП.

Здесь P_{∂} – мощность дуги; I_{∂} – ток дуги; U_{∂} – напряжение на дуге; a – расстояние от дуги до футеровки.

Электрические и энергетические статические характеристики режима ДСП-180 ЭСПЦ ОАО «ММК» представлены на **рис. 1**.

Анализ полученных расчетных зависимостей показывает:

- максимальные значения параметров, характеризующих определенные технологические показатели процесса электродуговой плавки не совпадают;
- расплавление основной массы шихты при закрытых дугах целесообразно вести при максимально возможной энергетической мощности, выделяемой в электрических дугах;
- доплавление шихты и нагрев жидкого расплава при обнаженных дугах целесообразно вести в режиме максимума КИИ, если дуги заглублены в специально наведенный пенный шлак, когда их тепловой КПД наибольший [3].

Это означает, что в технологические периоды плавки необходимо корректировать энергетический режим электродуговой плавки по температурным параметрам рабочего пространства ДСП путем ограничения подводимой к ДСП электрической мощности.

Объективными параметрами, однозначно характеризующими температурный режим электродуговой плавки в ДСП, являются температура жидкого металла $t_M(\tau)$ и температура внутренней поверхности огнеупорной кладки печи $t_L(\tau)$.

Расчет корректирующего значения подводимой к ДСП электрической мощности рекомендуется [4] производить в соответствии с выражением:

$$\Delta P = \frac{G \cdot c \cdot (t_M^D - t_M)}{860 \cdot \Delta \tau \cdot \eta}, \quad (1)$$

где G – масса металла в ДСП, кг; c – удельная теплоемкость жидкого металла, Дж/(кг·К); η – постоянный коэффициент усвоения энергии металлом, устанавливаемый по данным [5] или

экспериментально; $\Delta \tau$ – интервал времени, в течение которого текущее значение температуры металла $t_M(\tau)$ должно достичь заданного директивного значения $t_M^D(\tau)$.

Корректирующее значение мощности ΔP можно прибавить, увеличив степень напряжения, или уменьшить, уменьшив степень напряжения, в зависимости от знака отклонения температуры металла t_M от директивного значения t_M^D и интервала времени $\Delta \tau$.

Способ коррекции предусматривает ограничение подводимой электрической мощности при достижении предельно допустимого значения температуры огнеупорной футеровки $t_{\phi}^{maxc}(\tau)$.

В настоящее время используются два метода измерения температуры жидкой стали:

- измерение температуры, когда термопара устанавливается через отверстие в защитном кожухе после расплавления шихты;
- метод периодического измерения температуры путем погружения термопары в жидкий металл технологическим персоналом или с использованием водоохлаждаемых информационных зондов со сменными блоками.

Метод непрерывного измерения температуры металла требует значительных эксплуатационных затрат и квалифицированного обслуживания.

Метод периодического измерения температуры не обеспечивает непрерывности контроля, да и просто опасен для технологического персонала при использовании термопар погружения.

Для непрерывного измерения температуры жидкого металла предлагается использовать косвенный, адаптированный к условиям ДСП и апробированный в реальных производственных условиях метод [5, 6].

Суть предлагаемого метода заключается в следующем. В кладку рабочего пространства ДСП ниже уровня металла в защитном чехле из огнеупорного материала кладки закладывается многозонная термопара. Чертеж термопары представлен на **рис. 2**. Термопары выпущены опытной серией на основе кабельных термопар, выпускаемых отечественной компанией «ТЕСЕЙ» (г. Обнинск, Калужская обл.).

Рабочая часть многозонной термопары представляет собой металлический стакан, выполненный из жаропрочной стали 12Х18Н10Т. Внутри стакана расположены пять кабельных термопар градуировки ТНН (нихросил-нисил), рабочие спаи которых размещаются в строго фиксированных точках на расстоянии 20 мм друг

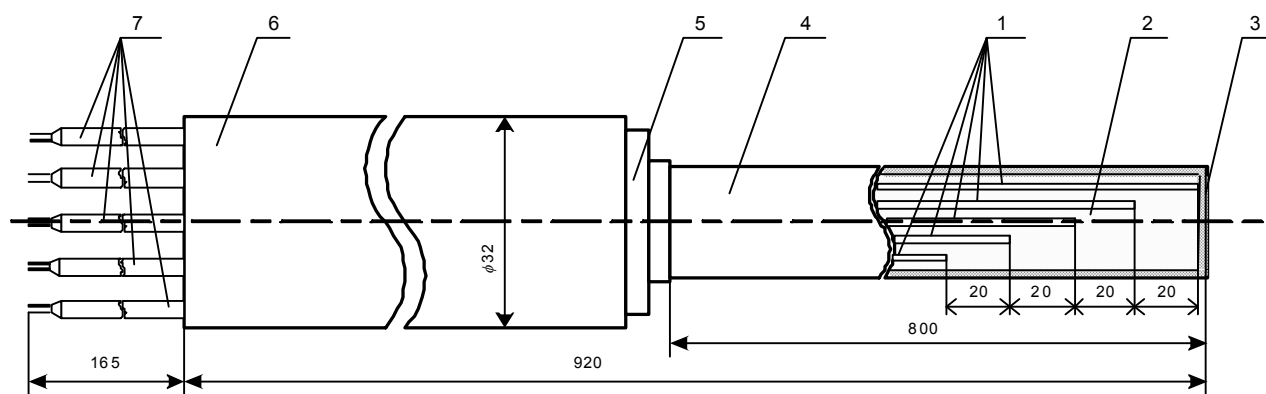


Рис. 2. Рабочий чертеж многозонной термопары:

1 – кабельные термопары градуировки ТХА и НН (нихросил – нисил); 2 – засыпка Al_2O_3 ; 3 – крышка рабочей части; 4 – рабочая часть термопары; 5 – место сварки рабочей части и внешнего гр. чехла; 6 – внешний чехол (сталь 12Х18Н10Т); 7 – компенсационный кабель для термопар гр. НН

от друга по длине термопары. Промежутки между термопарами заполнены порошком Al_2O_3 .

Многозонная термопара предназначена для установки в огнеупорную кладку с внешней стороны в районе рабочего окна ДСП. Это обеспечивает доступ к ней для обслуживания или быстрой замены.

Суть используемого метода заключается в решении обратной задачи теплопроводности вариационным способом путем подбора температуры металла на границе раздела «расплавленный металл – огнеупорная футеровка».

При известной температуре окружающей среды сравниваются расчетное распределение температуры по толщине огнеупорной кладки с действительным распределением при варьировании значения $t_M(\tau)$.

Совпадение текущих траекторий расчетного и текущего температурного распределений по толщине огнеупорной кладки позволяет определить (восстановить) действительное значение $t_M(\tau)$ на границе раздела.

Апробирование предложенного метода на реальной 3-х т. ДСП завода «Металлург Маш.» (г. Магнитогорск) позволило получить следующие результаты:

- стойкость термопары соизмерима со стойкостью огнеупорной футеровки печи (24 сут);
- погрешность измерения температуры не превышает $9^\circ C$ по сравнению с разовой термопарой погружения градуировки ТПР.

После определения корректирующей поправки ΔP и соответствующего переключения ступени напряжения оптимальный энергетический режим устанавливается путем определения и

поддержания оптимального значения рабочего тока дуги (положения электрода), соответствующего достижению максимально возможной мощности, выделяемой в дуге. Это соответствует достижению максимально возможной производительности ДСП на установленной ступени напряжения [1, 2].

Учитывая отличительные особенности изменения электрических параметров: высокочастотные возмущения при измерении текущих значений электрических параметров; наличие монотонных возмущений (обгорание электродов, изменение уровня и электропроводности шлака и т.д.); наличие скачкообразных изменений при переключении ступеней напряжения; незначительные инерционность и запаздывание, наиболее подходящим методом поискового режима динамической оптимизации энергетического режима ДСП в технологический период является использование способа формирования рабочего управляющего воздействия (целенаправленного перемещения электрода каждой фазы) по результату интегральной оценки отклика (реакции) оптимизируемого процесса на пробное тестирующее поисковое входное воздействие (перемещение электрода) определенной траектории.

Суть данного метода заключается в следующем. На вход оптимизируемого энергетического режима ДСП, обладающего унимодального (экстремального) вида статической характеристикой $\bar{P}(\tau) = f[I_p(\tau)]$, подается пробное тестирующее поисковое входное воздействие $I_p(\tau) = I_{po} + \psi_n(\tau) \cdot A \cdot \tau$, где I_{po} , $I_p(\tau)$ – начальное и текущее значения рабочего тока дуги; A – амплитуда тестирующего входного воз-

действия; $\Psi_n(\tau) = \prod_{k=1}^{n+1} \text{Sign Sin} \frac{2^k \pi \tau}{T_{II}}$ – ортогональная сигнум-функция Уолша; n – степень полинома, которым приближенно описывается во времени траектория смещения статической характеристики оптимизируемого процесса; τ – текущее время.

Ортогональная функция $\Psi_n(\tau)$ содержит $m = 2^{n+1}$ равных отрезков времени $\Delta\tau$, определяющих $T_{II} = m \cdot \Delta\tau$, – общую продолжительность поискового входного тестирующего воздействия.

Величина $\Delta\tau \approx 7(T_0 + \tau_3)$, где T_0, τ_3 – постоянные времени, количественно характери-

зующие величины инерционности и запаздывания оптимизируемого процесса.

Функция $\Psi_n(\tau)$ обладает уникальными свойствами, обеспечивающими возможность полной компенсации негативного влияния дрейфа статической характеристики оптимизируемого процесса на величину интегральной оценки процесса на пробное тестирующее входное воздействие.

Через интервал времени τ_3 после начала поискового воздействия производится интегрирование выходного оптимизируемого параметра $P_o(\tau)$ и определение интегральной оценки в соответствии с условием:

$$J = \beta \int_{\tau_3}^{\tau_3 + T_{II}} \Psi_n(\tau) \cdot P_o(\tau) \cdot d\tau, \text{ при } \tau_3 < \tau \leq T_{II}; \Psi_n(\tau) \in (+1, -1), \quad (2)$$

где β – коэффициент пропорциональности; $P_o(\tau)$ – текущее значение расчетного значения мощности, выделяемой в дуге: $P_o(\tau) = P_A(\tau) - I_p^2(\tau) \cdot r$. Здесь $P_A(\tau)$ – текущее значение контролируемой величины активной мощности; r – активное сопротивление короткой (подводящей цепи).

Знак интегральной оценки J определяет положение начального текущего значения I_{p0} и величину установившегося значения оптимизируемого параметра P_{o0} относительно оптимального значения $I_{p_{opt}}$, при котором обеспечивается максимальное значение мощности дуги $P_o(\tau)_{max}$.

Если $J > 0$, то $I_{p0} < I_{p_{opt}}$, и если $J < 0$, то $I_{p0} > I_{p_{opt}}$.

При условии постоянной скорости перемещения электрода фазы ($K_u = \text{const}$) текущее направление целенаправленного перемещения электрода $\sigma(\tau) \in (+1, 0, -1)$ определяется в соответствии с условием:

$$\sigma(\tau) = \begin{cases} +1 & \text{при } 0 < J > J_H \\ 0 & \text{при } -J_H < J < J_H \\ -1 & \text{при } 0 > J < -J_H \end{cases}, \quad (3)$$

где J_H – заданная зона нечувствительности оптимизируемого алгоритма.

Здесь $\sigma(\tau) = +1$ соответствует направлению перемещения электрода фа-

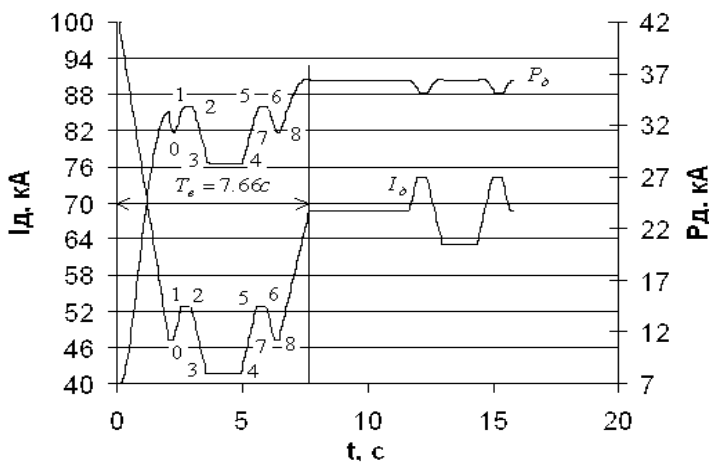


Рис. 3. Расчетные траектории изменения $P_o(\tau)$ и $I_p(\tau)$ во времени в процессе функционирования оптимизирующего алгоритма для $U=1291$ В ДСП-180 ($x=3,5$ МОм; $r=0,5$ МОм)

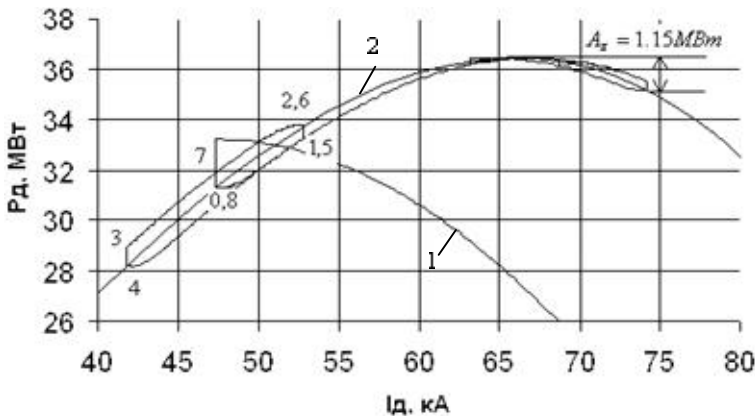


Рис. 4. Траектория поискового режима в процессе функционирования алгоритма оптимизации энергетического режима ДСП-180 в плоскости координат « $I_p - P_o$ »:
1 – траектория изменения текущего значения $P_o(\tau) = Y[I_p(\tau)]$;
2 – траектория статической рабочей характеристики $\bar{P}_d = Y[I_p]$ для $U=1291$ В ДСП-180 ($x=3,5$ МОм; $r=0,5$ МОм)

зы (вниз) для увеличения тока дуги (сокращения длины дуги).

При $\sigma(\tau) = 0$ электрод останавливается в зоне оптимального значения тока на заданное время выдержки $\tau_B = 5 \div 10 T_{II}$ для накопления заметного отклонения текущего режима от оптимального.

При $\sigma(\tau) = -1$ электрод перемещается вверх для уменьшения величины рабочего тока $I_p(\tau)$ (увеличения длины дуги).

Если статическая характеристика энергетического режима ДСП $P_\sigma(\tau) = f[I_p(\tau)]$ при выбранной ступени напряжения питания в окрестности экстремума может быть аппроксимирована параболой (обычно погрешность при этом не превышает 4–5%), то справедливо следующее соотношение:

$$\begin{aligned} J &= K_{II} (I_{опт} - I_{p0}) = \Delta I \cdot K_{II} = \\ &= K_{II} \cdot \sigma(\tau) \cdot K_{II} \cdot \Delta \tau_p, \end{aligned} \quad (4)$$

где K_{II} – коэффициент пропорциональности, определяемый экспериментально или расчетным путем, являющийся динамическим параметром настройки

оптимизирующего алгоритма, программно реализуемого системой автоматической оптимизации (САО) управления энергетическим режимом.

При известном значении J и постоянной скорости перемещения электрода K_{II} можно определить ориентировочно продолжительность рабочего цикла направленного перемещения электрода для достижения оптимального режима $\Delta \tau_p$:

$$\Delta \tau_p = \frac{J}{K_{II} \sigma(\tau) K_{II}}. \quad (5)$$

Расчетные траектории изменения $P_\sigma(\tau)$ и $I_p(\tau)$ в процессе оптимизирующего поискового режима при функционировании рассматриваемого метода представлены на **рис. 3** и **4**.

Рассмотренный алгоритм позволяет обеспечить выход с момента зажигания дуги на оптимальный режим за один рабочий цикл.

В зависимости от используемого критерия управления САО способна увеличить производительность печи на 5÷9% при сокращении расхода электродов на 1,4% и при одновременном снижении расхода электроэнергии на 1% [7].

Библиографический список

1. Марков Н.А. Электрические цепи и режимы дуговых электропечей. М.: Энергия, 1975. 130 с.
2. Ефроймович Ю.Е. Оптимальные электрические режимы дуговых сталеплавильных печей. М.: Metallurgizdat, 1956. 98 с.
3. Энерготехнологические особенности процесса электроплавки стали и инновационный характер его развития / Смоляренко В.Д., Девитайкин А.Г., Попов А.Н., Бесчаснова М.А. // Электрометаллургия. 2003. № 12. С. 12–19.
4. Глинков Г.М., Косырев Д.Н., Шевцов Е.К. Контроль и автоматизация металлургических процессов: Учебник для вузов. М.: Металлургия, 1989. 352 с.
5. Информационные системы в металлургии: Учебник для вузов / Спирин Н.А., Ипатов Ю.В., Лобанов В.Н. и др. Екатеринбург: УПИ, 2001. 617 с.
6. Андреев С.М., Ахметов У.Б., Бушманова М.В. Непрерывное измерение температуры жидкого металла в промышленных агрегатах и установках внепечной обработки стали // Энергосбережение, теплоэнергетика и металлургическая тепло-техника: Межвуз. сб. науч. тр. Магнитогорск: МГТУ, 2003. С. 53–57.
7. Исследование целесообразности использования системы автоматической оптимизации управления энергетическим режимом ДСП / Парсункин Б.Н., Андреев С.М., Ишметьев Е.Н., Писаревский Д.А. // Автоматизация технологических и производственных процессов в металлургии: Межвуз. сб. науч. тр. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2006. С. 87–96.

УДК 669.054.83

Сibaгатуллин С.К., Майорова Т.В., Полинов А.А.

О ВЛИЯНИИ ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СОСТОЯНИЯ ГАЗА НА ВЕЛИЧИНУ ЕГО РАБОТЫ В ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

В июле 2007 г. в доменном цехе ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» осуществлялся переход с офлюсованных окатышей ССППО на неофлюсованные. Это происходило при изменении других условий в работе цеха.

В целом по доменному цеху изменения ос-

новных показателей в связи с переходом от офлюсованных окатышей (ОФ) к неофлюсованным (НФ) были следующими (табл. 1).

С учётом сокращения содержания кислорода в дуге прирост удельной производительности по цеху, обусловленный переходом от ОФ к НФ, со-