

**КВАЗИСТАЦИОНАРНЫЕ ТЕПЛОВЫЕ ПОЛЯ
САМОСПЕКАЮЩИХСЯ ЭЛЕКТРОДОВ
РУДОВОССТАНОВИТЕЛЬНОЙ
ЭЛЕКТРОПЕЧИ**

ВЛАДИМИР ХАЦЕВСКИЙ, Д.Т.Н.,
ГОНЕНКО ТАТЬЯНА, К.Т.Н.,
КОНСТАНТИН ХАЦЕВСКИЙ, К.Т.Н.

Павлодарский Государственный
Университет им. С.Торайгырова,
Казахстан

Title: QUASISTATIONARY THERMAL FIELDS OF SELF-SINTERING ELECTRODES IN ORE-SMELTING FURNACE

UDC: 621.365.22

Key words: Ore-smelting furnace, self-sintering electrodes, aggregate zone, quasistationary thermal fields

Annotation: The paper studies conditions to increase performance efficiency for the ore-smelting electrothermal furnaces. Theoretical and experimental researches provide recommendations on technical requirements to the electrodes' exploitation regime to achieve optimal performance of ore-smelting furnace.

Существенным ограничивающим фактором длительной эксплуатации рудовосстановительной электропечи (РВП) на пониженных мощностях являются эксплуатационные характеристики самоспекающихся электродов. Координатно-пространственное распределение температуры и расположение агрегатных зон в электроде (зоны коксования электродной массы) определяют качество рабочего торца электрода, его механическую прочность, условия эксплуатации контактных щек и возможность возникновения аварий при обрыве электрода и выходе электродной массы в рабочее пространство электропечи.

В основе безаварийной эксплуатации электродов лежат два взаимосвязанных комплексных процесса, интегральные характеристики которых выражаются в квазистационарных тепловых полях электродов (положение изотермы коксования электродной массы относительно щек) и перемещении электродов по осевой координате при их перепусках, характеризующих расход электродов во времени. В номинальных режимах обеспечивается равенство скоростей коксования электродов и расхода электродов, а перепуск электродов осуществляется на длину электрода, равную перемещению координат зоны коксования за периоды времени между перепусками электродов. Изменение вводимой мощности в электропечь переводит электрод в нестационарные тепловые режимы, т. к. изменяет энергетические составляющие теплового баланса электрода (тепловой поток по оси электрода в зону коксования от рабочего торца - реакционной области: контактный узел - кожух электрода - скоковывающийся электрод - газоплазменная и реакционная области).

Суммарное действие обеих факторов не позволяет их разделить и изучить нестационарные режимы при экспериментальных исследованиях тепловых полей электродов в процессе перехода от номинальной мощности к пониженной. Для

изучения этой проблемы использовалась разработанная ВНИИЭТО математическая модель, позволяющая рассчитывать нестационарные температурные поля самоспекающихся электродов РВП. Для повышения точности и достоверности при проведении расчетов (предаварийных режимов) кожух электрода и связанные с ним ребра выделялись в отдельный расчетный токонесущий слой с изменяющимися свойствами (область конечной магнитной проницаемости до точки Кюри, $T = 736^\circ\text{C}$; температура завершения окисления и снижения механических свойств стали кожуха, $T = 900^\circ\text{C}$; выгорания ребер, $T = 1150^\circ\text{C}$).

Нестационарное уравнение теплопроводности рассматривалось как стационарное с введением скорости (V) перемещения изотермы $T = 450^\circ\text{C}$ (начало коксования электродной массы) относительно контактных щек:

$$\Delta Q_{i,k+1} + \Delta Q_{i,k-1} + \Delta Q_{i+1,k} + \Delta Q_{i-1,k} + \Delta Q_{дж} + V \cdot c \gamma F (T_{i,k+1} - T_{i,k}) = 0, \quad (1)$$

где $\Delta Q_{i\pm 1, k\pm 1}$ - количество тепла, поступившего в расчетный элемент в направлениях $i \pm 1, k \pm 1$; $\Delta Q_{дж}$ - джоулево тепло в i, k - том элементе; V - скорость перемещения изотермы относительно щек; γc - плотность и теплоемкость; F - площадь сечения элемента, T - температура.

Температуры определялись по выражению

$$T_{i,k}^{n+1} = \left[\Sigma q^n + \Delta Q_{дж}^n + (V \cdot c \gamma F)^n T_{i,k+1}^n \right] / \left[\Sigma \rho^n + (V \cdot c \gamma F)^n \right], \quad (2)$$

где n - номер итерации;

$$\Sigma q^n = T_{i+1,k}^n \cdot \rho_{i+1,k}^n + T_{i,k+1}^n \cdot \rho_{i,k+1}^n + T_{i-1,k}^n \cdot \rho_{i-1,k}^n + T_{i,k-1}^n \cdot \rho_{i,k-1}^n;$$

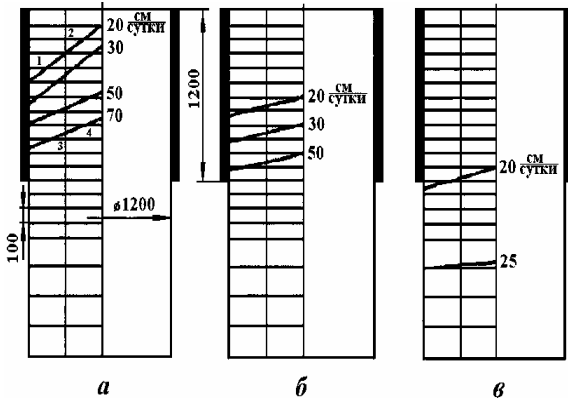
$$\Sigma \rho^n = \rho_{i+1,k}^n + \rho_{i-1,k}^n + \rho_{i,k+1}^n + \rho_{i,k-1}^n.$$

Зависимость тепловых проводимостей ρ от температуры учитывалась путем введения коэффициента релаксации (сходности) – ψ :

$$T_{i,k}^{n+1} = T_{i,k}^n + \psi \left(\frac{\Sigma q^n + \Delta Q_{дж} + (V \cdot c \cdot F)^n T_{i,k+1}^n - T_{i,k}^n}{\Sigma \rho^n + (V \cdot c \cdot F)^n} \right) \quad (3)$$

На Рисунке 1 показано расположение изотерм $T = 450^\circ\text{C}$ при различных значениях тока и линейной скорости перемещения электрода одновременно с зоной коксования, а на Рисунке 2 приведена обобщенная относительная характеристика линейной скорости перемещения изотермы начала коксования ($\Delta z/\Delta t$) относительно скорости расхода электрода (z/dt) - средняя

РИСУНОК 1 РАСПОЛОЖЕНИЕ ЗОНЫ КОКСОВАНИЯ (450°C) ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ЗНАЧЕНИЯХ ЛИНЕЙНОГО РАСХОДА И ПЛОТНОСТИ ТОКА В САМОСПЕКАЮЩЕМСЯ ЭЛЕКТРОДЕ:
а – при $j = 6 \text{ A/cm}^2$ ($I = 68000 \text{ A}$);
б – при $j = 4 \text{ A/cm}^2$ ($I = 45000 \text{ A}$);
в – при $j = 2,65 \text{ A/cm}^2$ ($I = 30000 \text{ A}$)



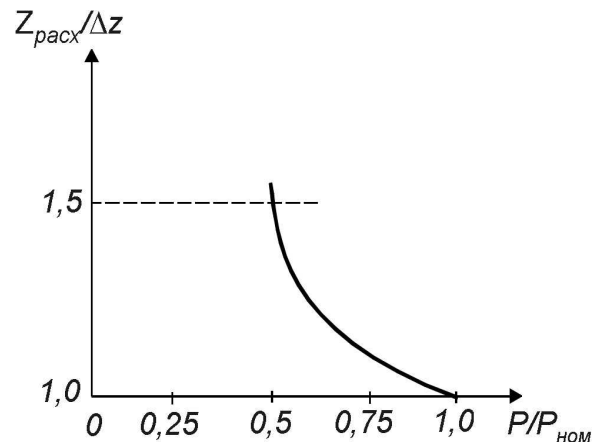
скорость перепуска электрода от $P/P_{ном}$ – вводимой мощности. Установлено, что при снижении рабочего тока на 35 % линейная скорость расхода электрода в 1.2 раза превышает линейную скорость перемещения изотермы начала коксования электрода.

Проведенные исследования позволили сформировать следующие ориентировочные технические требования к режимам эксплуатации электродов: ограничить снижение мощности до значений $P/P_{ном} = 0.5 \dots 0.75$, время эксплуатации при пониженной мощности ограничить тремя часами ($P/P_{ном} = 0.5$); рекомендовать перевод на пониженную мощность сразу после очередного перепуска электродов, уменьшить линейную величину перепуска электрода с увеличением количества перепусков в рассматриваемый период

эксплуатации электродов. При этом приведенные рекомендации необходимо уточнять при разработке технологических инструкций на конкретную электродную печь с учетом среднестатистического значения расхода электродов, качества шихтовых материалов, рабочего тока, проводимой технологии и т.д. с проведением оценочных расчетов по разработанной методике.

Для оценки соответствия результатов расчетов по модели реальным процессам, происходящим в электроде, проведены экспериментальные исследования тепловых полей самоспекающихся электродов диаметром 1200 мм (выплавка FeSi) с использованием трех перемещающихся совместно с электродом термопар: средний рабочий ток 94.5 кА; коэффициент неравномерности токораспределения по щекам $K_c = I_{наруж}/I_{внутр} = 0.95$. Установлено, что в зоне контактных щек ток протекает по обечайке кожуха с последующим переходом в ребра. У нижнего края щек происходит усадка электрода ($\approx 1.5\%$), появляется зазор между кожухом и

РИСУНОК 2. ОТНОСИТЕЛЬНАЯ СКОРОСТЬ РАСХОДА ЭЛЕКТРОДА И КОКСОВАНИЯ ОТ ВВОДИМОЙ МОЩНОСТИ В ЭЛЕКТРОПЕЧЬ



скоксованным блоком, ток протекает по ребрам и электроду. В работе приводятся результаты теоретических и экспериментальных исследований температурных полей самоспекающихся электродов, описан метод расчета симметрирования изотерм с выравниванием температур области электрода, обращенной к центру печи, и наружной области электрода путем перераспределения тока по щекам. Показано, что при недостаточном заглублении электродов увеличиваются тепловые потери и улет реагентов из печи, зарастает колошник и уменьшается проходное сечение газотока, снижается производительность и КПД печи. При заглублении электродов увеличивается реактивное

сопротивление ванны, перегревается металл и подина печи. Проведены оценки изменения температурного поля по глубине ванны при снижении вводимой мощности в электропечь. Полученные результаты позволили ввести в разработанные инструктивные материалы ограничивающие факторы, обеспечивающие безаварийную эксплуатацию электропечей в оптимальных режимах с различными значениями мощностей.

Литература

- Хацевский, В., 2001. Нестационарные режимы работы рудовосстановительных электропечей, Павлодар, НПФ "ЭКО".
- Хацевский, В., Чердниченко, В., 2002. «Проблемы ресурсосбережения при эксплуатации рудовосстановительных электропечей», Сборник научных трудов НГТУ "Экологически перспективные системы и технологии. Ресурсосбережение", Выпуск 5, с. 74-86.