

поэтому суммарные энергозатраты Еу_{сз} увеличиваются, несмотря на снижение удельного расхода кокса.

Список использованных источников

1. Кутнер С.М. Доменное производство Японии. Черная металлургия. Бюлл. ин-та "Черметинформация", 1982, №3.
2. Яковлев Ю.В., Марсуверский Б.А., Бабарыкин Н.Н., Сеничкин Б.К. [и др.]. Исследование доменной плавки при использовании окатышей и комбинированного дутья. Производство чугуна. Межвузовский сборник. Свердловск, изд. УПИ им. С. М. Кирова, 1982.
3. Парсункин Б.Н., Андреев С.М., Сеничкин Б.К., Логунова О.С. Снижение удельного количества кокса при оптимизации управления подачей природного газа в доменную печь. Творческое наследие В.Е. Грум-Гржимайло: история, современное состояние, будущее: сборник докладов международной научно-практической конференции. – Екатеринбург: УрФУ, 2014. – 533 с.
4. Парсункин Б.Н., Сеничкин Б.К., Андреев С.М., Рябчиков М.Ю. Повышение производительности доменной печи при оптимизации автоматического управления подачей природного газа и технического кислорода в дутье. Вестник МГТУ им. Г.И. Носова, 2011. №4. С. 69–73.
5. Рациональное использование топливно – энергетических ресурсов / Егоричев А.П., Лисиенко В.Г., Розин С.Е. [и др.]. – М.: Металлургия, 1990.
6. Васильева Т.М., Сеничкин Б.К. Оценка влияния различных факторов на расход кокса в доменной плавке методом статистического анализа. Материалы 6-й Всерос. науч.-техн. конф «Энергетики и металлургии настоящему и будущему России». Магнитогорск. МГТУ. 2005.
7. Сеничкин Б.К., Ваганов А.И., Матюшенко Г.А. Определение удельных энергетических затрат при выплавке чугуна с использованием дополнительного топлива // Изв. вуз. Черная металлургия. 1999. № 6. С. 5–7.
8. Рамм А. Н. Современный доменный процесс. – М.: Металлургия, 1980. – 304 с.

УДК 669.187.2.036:621.365.22

Ячиков И.М.¹, Портнова И.В.¹, Быстров М.В.²

¹ ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия

² ПАО «Машиностроительный завод имени М.И. Калинина», г. Екатеринбург, Россия

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ ГРАФИТИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРОДОВ ПРИ ИСПАРИТЕЛЬНОМ ОХЛАЖДЕНИИ

Аннотация

Снижение удельного расхода графитированных электродов при выплавке стали в дуговых печах является актуальной задачей, так как статья их расхода составляет весомую часть затрат при определении себестоимости готовой продукции. В работе было проведено компьютерное моделирование угара графитированных электродов для дуговых печей трехфазного и постоянного токов. Кратко рассмотрена математическая модель теплового состояния графитированного электрода и его термического разрушения при его нахождении в печи под током. Проведена проверка адекватности моделирования путем сравнения полученных результатов с известными литературными данными по работе промышленных печей. Выявлена эффективность использования испарительного охлаждения графитированных электродов. В частности, установлено, что для дуговых печей вместимостью 80–200 т, работающих на постоянном и трехфазном переменном токах,

использование водяного охлаждения электродов диаметром 610 мм позволяет снизить расход графита примерно в 2,7 раза.

Ключевые слова: графитированный электрод, дуговая печь, водяное охлаждение.

Abstract

Reducing the specific consumption of graphitized electrodes in the smelting of steel in arc furnaces is an urgent task, since the article of their expenditure makes up a significant part of the cost in determining the cost of finished products. In the work, a computer simulation of graphite electrode burnt was carried out for arc furnaces of three-phase and constant currents. The mathematical model of the thermal state of a graphitized electrode and its thermal destruction when it is in an oven under current is briefly considered. The adequacy of the simulation was checked by comparing the results with known literature data on the operation of industrial furnaces. The efficiency of using evaporative cooling of graphitized electrodes is revealed. In particular, it has been established that for arc furnaces with a capacity of 80–200 tons, operating on constant and three-phase alternating currents, the use of water cooling of 610 mm diameter electrodes allows to reduce graphite consumption by approximately 2,7 times.

Key words: graphite electrode, arc furnace, water cooling.

Графитированные электроды, используемые в дуговых печах, являются расходным материалом. Их стоимость при выплавке металла составляет существенную (до 12,5 %) часть в себестоимости готовой продукции. Для снижения себестоимости необходимо проводить комплекс мероприятий по уменьшению эксплуатационных расходов графитированных электродов (ГЭ): предотвращать окисления боковой и торцевой поверхностей, термомеханическое разрушение, создавать надежных конструкций электрододержателей и ниппелей, снижать ударных и изгибающих нагрузок [1–4]. Большая часть таких мероприятий направлена на понижение температуры рабочей поверхности электродов, поэтому изучение теплового состояния графитированных электродов является актуальной задачей.

Одним из путей снижения температуры электрода и экранирования его от окисления является использование системы испарительного охлаждения, позволяющей осуществлять подачу воды орошением на боковую поверхность цилиндрического электрода и состоящей из кольцевой трубки с отверстиями, которое монтируется вокруг электрода в районе электрододержателя. Управление расходом воды осуществляется с помощью клапанов и редуктора давления.

Целью работы является исследование на компьютерной модели эффективности использования системы испарительного охлаждения для снижения расхода графитированных электродов в электродуговых печах постоянного и трехфазного переменного токов.

Математическая модель теплового состояния электрода диаметра $D=2R$ и высоты H включает в себя уравнение теплопроводности в цилиндрической системе координат (с учетом осевой симметрии и внутренних источников тепла) [5]

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{1}{c\gamma} \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial r} \right) + \frac{\lambda}{r} \frac{\partial t}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial z} \right) \right] + \frac{q_v}{c\gamma}, \quad (1)$$

где $0 < r < R$, $0 < z < H$; c , γ – удельная теплоемкость и плотность материала электрода соответственно; $q_v = 16I_0^2 \rho / (\pi^2 D^4)$ – объемная мощность внутренних источников тепла в электроде при прохождении электрического тока; λ , ρ , c , γ – коэффициент теплопроводности, удельное электрическое сопротивление, удельная теплоемкость и плотность материала электрода соответственно; I_0 – ток дуги (для переменного тока действующее значение).

Краевая задача включала в себя ряд граничных условий. Определялся тепловой поток от дуги, горящей на торце электрода. Из-за того, что электрическая дуга находится чаще на крае торца электрода, поэтому тепловой поток q_0 задавался там большим и определялся по

параболическому закону: $q_o(r) = \eta_o \bar{q} + 3 \cdot (1 - \eta_o) \bar{q} \left(\frac{r}{R} \right)^2$, где $\bar{q} = \frac{4I_o U_a}{\pi \cdot D^2}$ – средняя величина теплового потока от электрической дуги, падающего на торец электрода; U_a – приэлектродное падение напряжения; $\eta_o \approx 0,3$ – доля тепловой мощности дуги, выделяющейся в середине торца электрода.

Задавались также граничные условия 3 рода теплообмена с окружающей печной атмосферой за счет конвекции $q_{\text{конв}}$ и теплообмена с рабочими поверхностями стенок печи за счет излучения $q_{\text{изл}}$ (где отсутствует водяное охлаждение) и граничные условия 3 рода при теплообмене с охлаждающей водой $q_{\text{ж}}$, подаваемой на боковую поверхность электрода.

Тепломассообмен при движении воды по боковой поверхности электрода довольно сложный, поэтому вводится ряд допущений:

- вдали от жидкости газ не насыщен паром, возникает поток вещества, направленный от поверхности испарения;
- поток теплоты направлен от поверхности электрода и от окружающей среды к жидкости;
- пренебрегаем теплотой подогрева жидкости до температуры испарения (принимаем $t_{\text{жс}} = 100^\circ\text{C}$);
- вся теплота, переданная жидкости, затрачивается на испарение последней и уходит вместе с паром (адиабатный процесс испарения);
- вода стекает по паровой пленке с постоянной скоростью W_0 .

Исходя из этих допущений, записывалось уравнение теплового баланса

$$\alpha_{\text{нов}}(t_{\text{жс}} - t_{\text{нов}}) + q_{\text{окр}} = \psi J, \quad (2)$$

где $q_{\text{окр}}$ – тепловой поток излучения и конвекции на поверхность воды со стороны печи; ψ – теплота парообразования воды; J – поток массы испаряющейся воды. За счет испарения толщина водяной пленки δ меняется по длине электрода как

$$\frac{d\delta(y)}{d\tau} = - \frac{J(y)}{\gamma_{\text{жс}}}, \quad (3)$$

где $J(y)$ – поток массы пара по длине электрода; $\gamma_{\text{жс}}$ – плотность воды; τ – время нахождения воды в печи; $y = H - z$. Для получения решения дифференциальное уравнение (3) дополняется граничным условием $\delta|_{y=0} = \delta_0$, где $\delta_0 = Q_{\text{жс}} / \pi D W_0$ – толщина пленки воды в области ее подачи с объемным расходом $Q_{\text{жс}}$.

При известном тепловом состоянии электрода можно определить линейную скорость уноса графита как

$$v(T) = \frac{V(T)}{3600 \cdot \gamma_{\text{т}}}, \text{ м/с}, \quad (4)$$

где $V(T)$ – скорость уноса графита от температуры, $\gamma_{\text{т}}$ – плотность графита.

Для учета термического угара графитированного электрода была использована экспериментальная зависимость скорости уноса графита от его температуры на открытом воздухе $V(T)$ [6]. По эмпирическим данным получено уравнение аппроксимации

$$V(T) = 10^{a \lg(T)^2 + b \lg(T) + c} \text{ кг/(м}^2 \text{ ч)}, \quad (5)$$

где $a = 4,9627$; $b = -23,836$; $c = 27,167$; T – температура, К.

Массовый расход графита с боковой поверхности электрода ($r = R$)

$$Q_{\text{бок}} = \frac{dm}{d\tau} = \int_F V(T) dF = 2\pi R \int_0^H V(T) dz, \text{ кг/ч.}$$

Аналогично, массовый расход графита с нижнего торца электрода ($z = 0$)

$$Q_{\text{мор}} = \frac{dm}{d\tau} = \int_F V(T) dF = 2\pi \int_0^R V(T) r dr, \text{ кг/ч.}$$

Суммарная скорость уноса Q_{Σ} и унос массы Δm за время τ_k с одного графитированного электрода

$$Q_{\Sigma} = Q_{\text{бок}} + Q_{\text{мор}}, \quad \Delta m = \int_0^{\tau_k} V_{\Sigma} d\tau.$$

Мощность, выделяемая в дуге дуговых печей постоянного тока (ДППТ), определяется как $P_0 = I_d U_d$, а мощность на трех дугах трехфазных печей переменного тока (ДСП) – $P_0 = 3 \cdot I_d^* U_d^*$, где $I_d = 16$ кА – номинальный ток дуги ДППТ; I_d^* – активная составляющая номинального тока дуги ДСП. При одинаковой мощности рассматриваемых печей получим примерное соотношение токов, проходящих через графитированные электроды трехфазной печи и печи постоянного тока $I_d^* = 1,2 I_d / 3$.

Для проведения расчетов использовалась компьютерная программа «*Моделирование теплового состояния электрода ДСП*», созданная по данной математической модели. Программа позволяет определять тепловое состояние и унос графита для первоначально цилиндрического ГЭ в зависимости от его изменяющейся геометрии, проходящего через него тока и времени нахождения электрода в печи под током, а также от параметров водяного охлаждения.

Для проведения компьютерного моделирования были приняты следующие параметры:

- геометрические для ГЭ: $D=610$ мм, длина электрода в печи – $H=2100$ мм [7–10];
- теплофизические свойства ГЭ: $c=2,1$ кДж/(кг·К); $\gamma=1700$ кг/м³; степень черноты графита – 0,71; $\rho=5$ мкОм·см; $\lambda=120$ Вт/(м·°C);
- технологические: начальная температура ГЭ – 20°C; приэлектродное падение напряжения на дуге – 8 В; степень черноты футеровки – 0,93; рабочая температура футеровки – 1400°C; температура газов в печи – 1200°C; продолжительность плавки – 1 ч;
- охлаждающей электрод воды: начальная температура – 20°C; $\psi=2,3$ МДж/кг; степень черноты воды – 0,5; $\gamma_{\text{ж}}=1000$ кг/м³; $W_0=0,3$ м/с; время включения испарительного охлаждения после ввода холодных электродов в печь – 60 с.

В промышленности основными факторами, влияющими на расход графитированных электродов, как в ДППТ, так в ДСП являются:

- окисление боковой поверхности и износ торца ГЭ вследствие сублимации графита в области привязки дуги;
- растрескивание рабочих концов электродных свечей и опадания огарков;
- конструкция электрододержателей и ниппелей;
- поломки электродов из-за высоких механических и токовых нагрузок [1].

В компьютерной программе рассчитывался угар ГЭ, проходящий в печи только под действием первого фактора, связанного с воздействием на электрод дуги при подаче заданного номинального тока.

На основе промышленных данных об удельном расходе графита, взятых из литературы [11–15] с целью повышения адекватности проводилась адаптация (или настройка) параметров созданной компьютерной модели. Получена зависимость угара графитированных электродов от емкости печей при наличии и отсутствии испарительного охлаждения для ДСП и ДППТ (рис. 1). При отсутствии испарительного охлаждения видно, что для разных дуговых печей литературные и расчетные данные имеют довольно большой разброс, примерно 20–30 %. Это связано с разнородными источниками информации, в которых порой не совсем понятны принципы определения удельного расхода графитированных электродов, сколько печь находилось под током, какие статьи расхода ГЭ учитывались и т.п. Однако эти результаты

позволяют говорить об адекватности созданной математической и компьютерной модели для оценки расхода графита в дуговых печах.

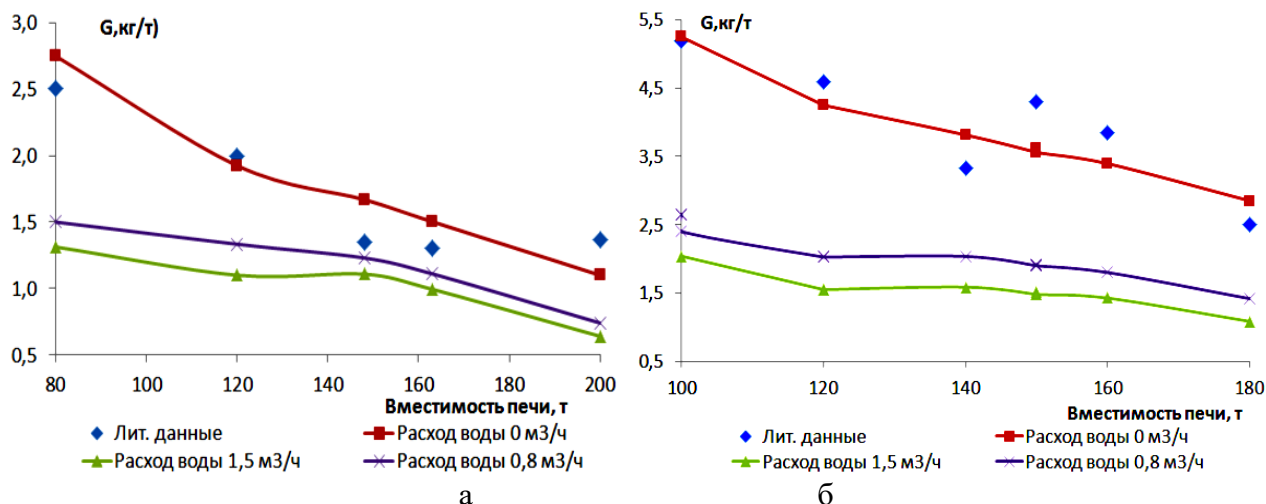


Рис. 1. Удельный расход графита в зависимости от емкости печей при наличии и отсутствии испарительного охлаждения: а – для ДПТ; б – для ДСП

Установлено, что при использовании водяного охлаждения температура в верхней половине электрода существенно снижается. С увеличением вместимости печи и расхода воды на охлаждение расход графитированных электродов снижается. Причем есть некий рациональный расход. Применение принудительного водяного испарительного охлаждения каждого электрода с расходом воды $1,5 \text{ м}^3/\text{ч}$ позволяет снизить угар электродов примерно в 2,7 раза.

Таким образом, предложена математическая компьютерная модель, позволяющая определять тепловое состояние графитированного электрода и унос графита с течением времени при наличии или отсутствии испарительного охлаждения. Установлено, что используемая компьютерная программа с практической точностью адекватно определяет тепловое состояние графитированного электрода. Проведены оценки удельного расхода графита при работе электродов в условиях дуговых печей постоянного и трехфазного токов. Установлено, что при использовании водяного охлаждения электродов для мощных дуговых печей емкостью 80–200 т расход графита за счет термического разрушения может быть снижен примерно в 2,7 раза. Использование испарительного охлаждения графитированных электродов в дуговых печах может быть рекомендовано для снижения их расхода на действующих и проектируемых мощных дуговых печах постоянного и трехфазного переменного токов.

Список использованных источников

1. Колокольцев В.М., Ячиков И.М., Сарычев А.В. Пути снижения расхода графитированных электродов в дуговых печах // Литейные процессы: межрегион. сб. науч. тр. / Под ред. В.М. Колокольцева. Магнитогорск: МГТУ, 2006. С. 51–56.
2. Графитированные электроды и специализированные системы технического обслуживания сталеплавильных цехов во всем мире. SGL Group // Металлургическое производство и технология, № 2. 2014. С. 16–21.
3. Грудницкий О.М., Исхаков Р.А., Коробов В.К. Пути снижения удельного расхода графитированных электродов на электросталеплавильных печах // Литье и металлургия, № 1. 2011. С. 100–101.
4. Дыскина Б.Ш., Кабанова Т.В. Использование техногенных отходов уральского региона для защиты графитированных электродов // Успехи в химии и химической технологии, № 10. Т. 1. 2014. С. 39–41.
5. Mokhov V.A., Yachikov I.M. Simulation of the thermal state of graphitized electrodes in an

- arc furnace with allowance for evaporation cooling / Russian metallurgy (Metally). 2013. Т. 2013. № 6. С. 465–470.
6. Окорочков Н.В. Дуговые сталеплавильные печи: учеб. пособие. М.: Металлургия, 1971. 344 с.
7. Пат. 2159993 РФ МПК H05B 7/12 Электрод и охлаждающий элемент для металлургического сосуда / Фолквин Кестер, опубл. 21.11.2000. Бюл. № 33.
8. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Наука. 1972. 720 с.
9. Никольский Л.Е., Зинуров И.Ю. Оборудование и проектирование электросталеплавильных цехов. М.: Металлургия, 1993. 272 с.
10. ГОСТ МЭК 60239–2014 Графитированные электроды для электродуговых печей. Размеры и обозначения. М. 2014. 24 с.
11. Эксплуатация графитированных электродов на предприятиях металлургического комплекса России. Проблемы и пути их решения / Г.Д. Апалькова, И.И. Просвирина, В.Е. Рошин, В.С. Галян, С.Е. Вдовин // Металлургия. 2002. № 10. С. 146–148.
12. Еланский Г.Н. Неделя высоких технологий // Сталь. 2000. № 2. С. 27–30.
13. Кац Я.Л., Пасечник Н.В. Проектные показатели дуговой сталеплавильной печи производительностью 220 тыс. т жидкой стали в год для мини-завода // Электрометаллургия. 2005. № 1. С. 2–6.
14. Сафонов В.М., Смирнов А.Н. Современная электродуговая печь: основные параметры и концептуальные решения // Электрометаллургия, 2005. № 6. С. 2–13.
15. Сиддики Ф., Коломота В.Н., Пильчук Р.Н. Дуговая сталеплавильная печь с системой «Данарк» и современная технология электроплавки // Сталь. 2003. № 11. С. 43–45.
16. Реконструкция мартеновского цеха ОАО «ММК» с установкой электродуговых сталеплавильных печей и разливкой стали на МНЛЗ / Ю.А. Тверской, А.А. Овчинников, О.П. Клишин и др. // Труды VIII конгресса сталеплавыльщиков М.: Черметинформация. 2005. С. 294–296.