

С. Н. Тимошенко, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., докторант, e-mail: stimoshenko155@gmail.com

А. А. Филиппи*, гл. инженер

С. П. Онищенко**, директор

П. И. Тищенко**, канд. техн. наук, гл. специалист

Донецкий национальный технический университет, Покровск

*ООО «Днепропресс Сталь», Днепр

**ЧП «Фирма РОУД», Киев

Энергоэффективные решения при модернизации дуговых сталеплавильных печей постоянного тока литейного класса

Выполнено численное моделирование тепловой работы футеровки и распределения плотности тока в ванне 12-тонной дуговой сталеплавильной печи постоянного тока литейного класса. Установлено, что при простоях печи более 15 часов, установка водоохлаждаемых элементов (ВЭ) с пространственной структурой взамен части футеровки снижает потери энергии печи за счет сокращения затрат на аккумуляцию тепла, несмотря на дополнительные потери с водой. ВЭ с пространственной структурой снижают потери тепла с водой на 25–35 % в сравнении с традиционными ВЭ с плотной укладкой труб. Установка подовых электродов (ПЭ) стержневого типа взамен ПЭ пластинчатого типа позволяет сократить энергопотребление печью на 3–9 % за счет интенсификации электровихревых течений в сталеплавильной ванне.

Ключевые слова: дуговая печь постоянного тока, аккумуляция тепла, водоохлаждаемые элементы, подовый электрод, энергоэффективность.

Введение. Дуговые сталеплавильные печи постоянного тока (ДСППТ) характеризуются устойчивым горением дуги, что способствует снижению угара шихты, уровня шума и фликер-эффекта в сравнении с трехфазными аналогами [1–3]. Преимущества ДСППТ наиболее полно реализуются в «малой» металлургии (литейные цехи) при классической технологии с относительно длительным периодом доводки жидкой стали. В дуговых печах литейного класса, в отличие от агрегатов «большой» металлургии, производительность не является приоритетной задачей, вводимая удельная электрическая мощность не превышает 0,5 МВт/т, применение средств интенсификации плавки и водоохлаждаемых элементов (ВЭ) весьма ограничено [3, 4].

Анализ последних исследований и публикаций. Постановка проблемы. ДСППТ и дуговые печи в целом имеют относительно низкую энергоэффективность вследствие потерь тепла, главным образом с пылегазовой средой и с водой, достигающих даже в ритмично работающих печах 30 % вводимой энергии и более [2]. В «малой» металлургии проблема усугубляется длительными простоями печей и связанной с ними потерей энергии на аккумуляцию тепла футеровкой. На 6-тонной дуговой печи литейного класса экспериментально установлено наличие динамического слоя футеровки толщиной 115–120 мм с переменными по ходу плавки температурным полем и энтальпией, и внешнего квазистационарного слоя с практически однородным температурным полем. Суточный простой печи ведет к снижению средней температуры футеровки до 150–200 °С, и для компенсации потери ее энтальпии требуется ввод энергии, соизмеримый

с теоретическим удельным расходом электроэнергии на плавку [5].

Представляет интерес сопоставить потери, в частности на аккумуляцию тепла в дуговой печи литейного класса с кирпичной футеровкой и при наличии ВЭ; найти решение по модернизации печи, основанное на компромиссном балансе экономии энергоресурсов и огнеупоров в конкретных условиях производства.

Важным и критичным узлом ДСППТ является подовый электрод (ПЭ), обеспечивающий прохождение и растекание тока в ванне, при взаимодействии которого с магнитным полем возникают электровихревые течения (ЭВТ) [6]. Наибольшее распространение получили ПЭ стержневого и пластинчатого (или игольчатого) типа [1, 5, 7]. ЭВТ является важным фактором интенсификации процессов тепло- и массопереноса в ванне и, соответственно, энергоэффективности печи. Путем численного моделирования ЭВТ установлено положительное влияние глубины ванны, силы тока, расхода инертного газа при донной продувке ванны и негативное воздействие длинной дуги и слоя шлака на продолжительность нагрева и усреднения стали по температуре [8]. В работе [9] исследовали ЭВТ на небольшой физической модели ДСППТ с использованием легкоплавких металлов и пришли к выводу, что при установке двух ПЭ и их смещении относительно верхнего электрода, наблюдается увеличение средней скорости ЭВТ в 1,3–1,4 раза. Согласно [10], переход от цилиндрической ванны к конической ведет к росту скорости ЭВТ, а перемещение торца ПЭ выше и ниже уровня подины снижает и увеличивает скорость ЭВТ соответственно.

Актуальной остается задача сопоставительной оценки используемых в промышленности типов ПЭ

и их расположения в ванне для достижения максимальной металлургической эффективности ЭВТ.

Цель и задачи исследований. Целью работы является повышение энергоэффективности ДСППТ. Задачи исследований состоят в численном моделировании аккумуляции тепла в печи с кирпичной футеровкой и ВЭ и распределении плотности тока в жидком расплаве для обоснования решений по ВЭ, ПЭ, снижению потерь тепла, повышению интенсивности ЭВТ, сокращению расхода огнеупоров.

Материал исследований. Исследования выполнены применительно к 12-тонной ДСППТ, работающей в режиме: 2 плавки продолжительностью по $\tau_{пл} = 4$ часа с последующим простоем длительностью $\tau_{пр} = 16$ часов. Основные параметры печи: масса плавки – 12 т; мощность трансформатора – 6 МВА; рабочий ток – до 20 кА; ПЭ – пластинчатого типа.

Моделирование тепловой работы футеровки и ВЭ. Оценка энергозатрат на компенсацию потерь тепла, связанных с аккумуляцией тепла футеровкой, выполнена для вариантов без ВЭ (базовый) и с ВЭ (альтернативный) при следующих условиях и допущениях. В период простоя скрап в печь не загружают; отдача тепла происходит на наружной поверхности F кожуха и свода свободной конвекцией и излучением в окружающую среду с температурой t_0 ; теплофизические параметры не зависят от температуры; исходная перед простоем энтальпия футеровки определяется средневзвешенной рабочей температурой t_p (1580 °С для стен и 1610 °С для свода) и наружной $t_{пов}$ (200 °С для стен и 270 °С для свода) поверхностей. Динамика снижения энтальпии футеровкой $dQ_{ф}/dt$ в период простоя печи описывается уравнением:

$$\frac{dQ_{ф}}{d\tau} = \left[\alpha_{пов} \cdot (t_{пов} - t_0) + \sigma \cdot \varepsilon_{пов} \times \right. \\ \left. \times \left[(t_{пов} + 273)^4 - (t_0 + 273)^4 \right] \right] \cdot F, \quad (1)$$

где $\alpha_{пов}$ – коэффициент теплоотдачи поверхности футеровки в окружающую среду, σ – константа Стефана-Больцмана; $\varepsilon_{пов}$ – степень черноты поверхности.

Параметр $\alpha_{пов}$ определяется уравнением, в котором выражение под знаком логарифма представляет собой эмпирическую зависимость $t_{пов}$ от $\tau_{пр}$, полученную путем обработки опытных данных [5]:

$$\alpha_{пов} = 31,46 \cdot \ln(200 - 3,85 \cdot \tau_{пр}) - 120,80. \quad (2)$$

Оценка изменения средней температуры футеровки (входит в выражение для энтальпии Q) от $\tau_{пр}$, на основании решения (1) с учетом (2), выполненного численно с шагом 1 час в пакете MathcadV14, приведена на рис. 1. Теплофизические параметры футеровки: масса стен и свода 11,9 и 9,8 т соответственно, теплоемкость 0,36 кВт·ч/(т·К), $\varepsilon_{пов} = 0,7$.

Согласно расчетам, за 16 часов простоя печи футеровка в базовом варианте охлаждается до

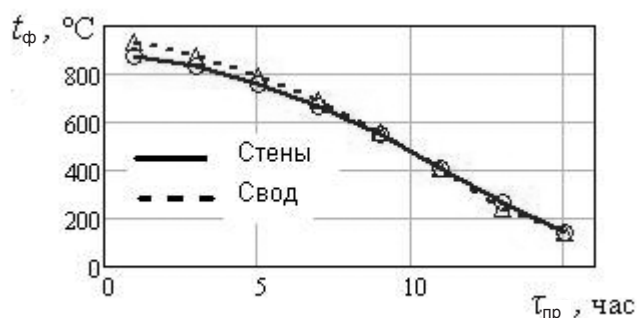


Рис. 1. Зависимость средней температуры футеровки $t_{ф}$ от продолжительности простоя печи $\tau_{пр}$

145–160 °С, что приводит к затратам энергии на аккумуляцию тепла в последующей серии плавов, оценка которых для данных условий составляет 252 кВт·ч/т.

В альтернативном варианте с ВЭ статья аккумуляции тепла включает, помимо энтальпии остаточной футеровки (ВЭ заменяют 70 % футеровки стен и 90 % футеровки свода), энтальпию гарнисажа, образующегося на ВЭ, металлоконструкций панелей и сток теплоты с водой. Оценка энергозатрат выполнена для следующих условий и допущений, основанных на практике применения ВЭ в дуговых печах литейного класса: скорость воды – 1,8 м/с; диаметр трубы панели внутренний – 60 мм, общее (свод и стены) число контуров охлаждения – 8; нагрев воды в контуре – 15 °С; средняя толщина гарнисажа – 10 мм; продолжительность активной фазы тепловой работы ВЭ – 40 % от $\tau_{пл}$. Оценка разности потерь энергии для базового и альтернативного вариантов, при условии неизменности потерь тепла из печи с пылегазовой средой, представлена на рис. 2.

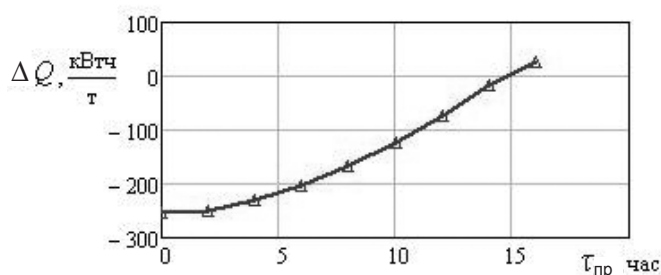


Рис. 2. Расхождение потерь энергии между базовым и альтернативными вариантами ΔQ от продолжительности простоя печи $\tau_{пр}$

При увеличении продолжительности простоев 12-тонной ДСППТ более 15 часов, появляется возможность эффективно использовать ВЭ в качестве элементов ограждения взамен части футеровки. Помимо экономии энергии это обеспечивает сокращение потребления огнеупоров и весьма существенный дополнительный экономический эффект.

Традиционные ВЭ дуговых печей «большой» металлургии выполнены с плотной укладкой труб (рис. 3, а), при которой затруднено образование

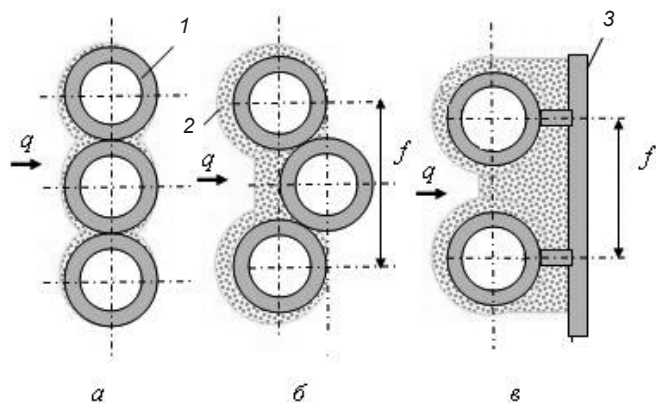


Рис. 3. ВЭ, применяемые в дуговой печи: 1 – труба; 2 – гарнисаж; 3 – кожух печи; f – расчетный параметр панели; q – направление падающего теплового потока

устойчивого теплоизолирующего и теплоаккумулирующего шлакового гарнисажа – важного фактора снижения потерь тепла с водой, особенно для печей литейного класса [11].

Новые решения ВЭ (рис. 3, б, в) характеризуются пространственной структурой, способствующей образованию возобновляемого равновесного слоя гарнисажа [12]. Вариант (б) рационально применить в качестве элемента самонесущей конструкции свода, а вариант (в) – для стен печи с использованием существующего кожуха.

Задача стационарного теплообмена в системе источники излучения – трубчатая панель ВЭ, покрытая слоем гарнисажа, описывается уравнением [12]:

$$q - (1 - \varepsilon) \cdot \sigma \cdot T_b^4 - \frac{(T_b - T_{\text{охл}})}{(h_1/\lambda_1 + h_2/\lambda_2 + 1/\alpha)} = 0, \quad (3)$$

где σ – постоянная Стефана-Больцмана; q – падающий тепловой поток; ε – степень черноты ВЭ; α – коэффициент теплоотдачи от внутренней поверхности трубы к воде; $h_1, \lambda_1, h_2, \lambda_2$ – толщины и теплопроводности гарнисажа и трубы соответственно; $T_b, T_{\text{охл}}$ – температура поверхности излучения и воды соответственно.

Решение (3) выполнено в пакете ELCUT 6.2 [14] для граничных условий и параметров, приведенных в табл. 1. Температурные поля в ВЭ, выполненные по вариантам а, б, в (см. рис. 3), приведены на рис. 4, а относительные потери тепла с водой – на рис. 5.

Согласно расчетам, существует оптимальное значение межтрубного расстояния f , которое для варианта б составляет 1,5–1,8 наружного диаметра трубы

d , а для варианта в $(2,0-2,2) \cdot d$ и ограничено ростом температуры кожуха между трубами (точка К) до величины, нормируемой техникой безопасности (не более 200°C). При оптимальном значении f/d следует ожидать снижение потерь тепла с водой на 25–28 % для варианта б и на 30–35 % для варианта в по сравнению с традиционными ВЭ (вариант а).

Моделирование электродинамики ванны ДСППТ. Параметром, характеризующим металлургическую эффективность ЭВТ в ванне ДСППТ, является удельная на единицу массы металла M мощность перемешивания при ЭВТ $N_{\text{эвт}}$, которая определяется произведением объемной электромагнитной силы (ОЭМС) $F_{\text{эм}}$ активного объема ванны V_a и характерной скорости ЭВТ расплава u_0 :

$$N_{\text{ЭМП}} = (F_{\text{эм}} \cdot V_a \cdot u_0) / M. \quad (4)$$

Понятие «активный объем» применяется к части ванны, через которую преимущественно проходят силовые линии электрического тока между верхним и подовым электродами и, таким образом, возникает ОЭМС. Принято, что в пределах активного объема плотность электрического тока уменьшается не более чем в e (основание натурального логарифма) раз относительно максимального значения. ОЭМС является векторным произведением средней плотности электрического тока $j_{\text{ср}}$ в сечении активного объема ванны радиусом R_a и индукции магнитного поля $B = \mu_0 \cdot H$, где μ_0 – магнитная постоянная, $H = j_{\text{ср}} \cdot \pi \cdot R_a^2 / 2\pi \cdot R_a$ – напряженность магнитного поля по периметру сечения активного объема. Уравнение для абсолютной величины ОЭМС с учетом геометрических параметров ванны ДСППТ в скалярной форме приобретает вид:

$$F_{\text{эм}} = (\mu_0 / 2) \cdot j_{\text{ср}}^2 \cdot R_a. \quad (5)$$

Характерная скорость ЭВТ в активном объеме ванны определяется зависимостью, полученной в предположении равномерного движения жидкости на основе баланса сил инерции и ОЭМС [6]:

$$u_0 = j_{\text{ср}} \cdot h \cdot \sqrt{\mu_0 / \rho}, \quad (6)$$

где ρ – плотность жидкой стали; h – характерный размер, равный для данного случая глубине ванны H_b .

Таблица 1

Исходные данные и граничные условия численного моделирования

Блок (Б) / грань (Г) и порядковый номер на рис. 4.	Теплопроводность (λ) для блока. Температура (T) коэффициент теплоотдачи (σ, α), степень черноты (ε) для грани	Размеры, мм
Труба, ребра, кожух (Б1)	$\lambda = 45 \text{ Вт/(м·К)}$ Сталь 20	$d = 76$; $b = 10$.
Гарнисаж (Б2)	$\lambda = 2,5 \text{ Вт/(м·К)}$ [13]	
Рабочая поверхность (Г1)	$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/(м}^2\text{·К}^4)$; $T = 1900 \text{ К}$; $\varepsilon = 0,7$.	
Внешняя поверхность (Г2)	$\alpha = 20 \text{ Вт/(м}^2\text{·К)}$; $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/(м}^2\text{·К}^4)$; $T = 470 \text{ К}$; $\varepsilon = 0,8$	
Поверхность охлаждения (Г3)	$\alpha = 6000 \text{ Вт/(м}^2\text{·К)}$; $T = 320 \text{ К}$.	

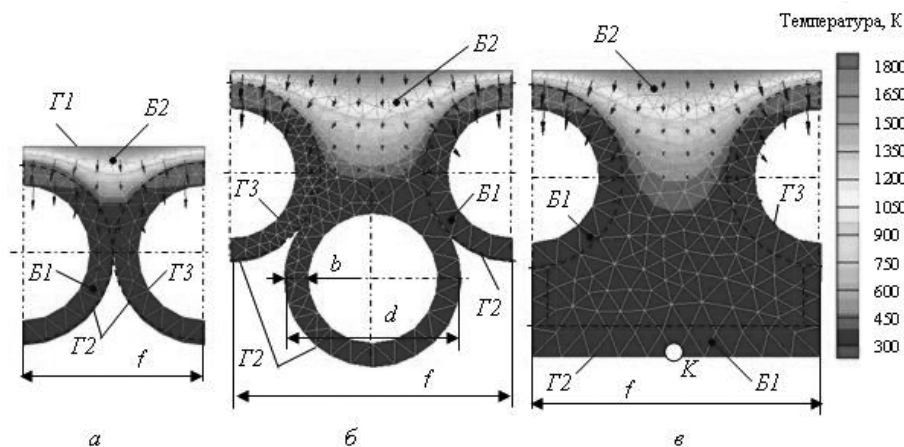


Рис. 4. Температурное поле в традиционном ВЭ (а) и ВЭ с пространственной структурой (б, в). Стрелки указывают распределение теплового потока. Обозначения приведены в тексте и на рис. 3.

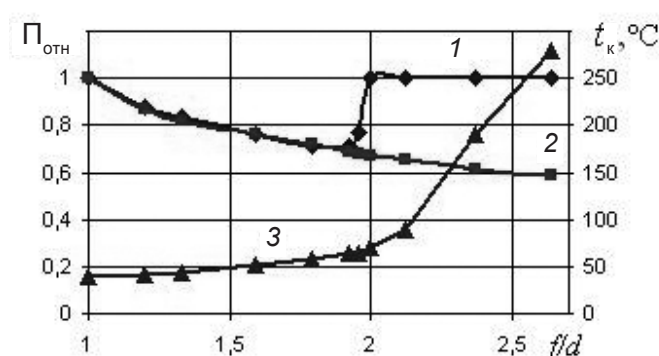


Рис. 5. Потери тепла на 1 м² ВЭ ($P_{отн}$) в зависимости от параметра f/d для вариантов б (1) и в (2) относительно варианта а. Температура кожуха (t_k) в точке К (рис. 4) для ВЭ по варианту в (3).

С учетом (4–6), мощность перемешивания при ЭВТ определяется из выражения:

$$N_{ЭВТ} = j_{cp}^3 \cdot R_a^3 \cdot h^2 \cdot \pi \cdot \mu_0^{1,5} / (2 \cdot \rho^{0,5} \cdot M). \quad (7)$$

Как следует из (4), существенное влияние на мощность перемешивания оказывают плотность тока, радиус активного объема и глубина сталеплавильной ванны. Для расчета мощности перемешивания при ЭВТ разработана методика, которая заключается в численном моделировании двумерной стационарной задачи электропроводности в пакете прикладных

программ ELCUT 6.2 и обработке результатов в виде полей плотности электрического тока в ванне для оценки интегральных показателей ЭВТ: ОЭМС, активного объема, характерной скорости, мощности перемешивания.

Моделировали растекание тока в ванне промышленной ДСППТ вместимостью 12 т в реальном линейном масштабе. Решение задачи выполняется методом конечных элементов. Электромагнитные явления в жидкой ванне при протекании электрического тока описываются уравнениями Максвелла (8, 9), обобщенным законом Ома для движущейся среды (10) и законом сохранения электрического заряда (11):

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{j}, \nabla \cdot \vec{B} = 0; \quad (8)$$

$$\nabla \times \vec{E} = 0, \nabla \cdot \vec{E} = \rho_e / \epsilon_0; \quad (9)$$

$$\vec{j} = \sigma(\vec{E} + \vec{u} \times \vec{B}); \quad (10)$$

$$\nabla \cdot \vec{j} = 0, \quad (11)$$

где $\vec{j}$ – плотность тока, ρ_e – плотность заряда; $\vec{B}$ – индукция магнитного поля; $\vec{E}$ – напряженность электрического поля, σ – удельная электропроводность, μ_0 – магнитная постоянная, ϵ_0 – электрическая постоянная, $\vec{u}$ – скорость жидкости.

Форма сталеплавильной ванны принята цилиндросферическая с отношением элементов по высоте 1 к 1. В модели варьировали тип ПЭ (стержневой, пластинчатый), количество стержневых ПЭ (один или два), шаг между двумя ПЭ или смещение продольной оси ПЭ относительно оси симметрии печи. Верхний электрод расположен осесимметрично, что является условием энергоэффективности при плавлении шихты электрической дугой. Все размеры приведены в табл. 2.

Модель включает расчетные блоки и грани, указанные на рис. 6, а, характеристики которых даны в табл. 2. Для оставшихся граней в модели граничным условием является электрическая изоляция.

В полученное поле плотности тока на среднем по глубине горизонте ванны вводили контур (рис. 6, а), на котором анализировали распределение параметра по радиальной координате. Определяли радиус активного объема и среднюю величину плотности то-

Таблица 2

Исходные данные и граничные условия численного моделирования

Блок (Б) / грань (Г) и порядковый номер на рис. 6.	Электропроводность для блока. Потенциал для грани.	Размеры, м (см. рис. 6) $D_B = 2,30$; $H_B = 0,60$; $L = (0 - 0,75) D_B$; $B = L/2$
Электрод верхний (Б1) / Катод (Г1)	105000 См/м [15] (–) 150 В	$d_r = 0,4$
Электрическая дуга (Б2)	5600 См/м [16]	Диаметр – 0,08; длина – 0,15 [8]
Жидкий шлак (Б3)	$7,3 \cdot 10^5$ См/м [18]	Толщина слоя – 0,10 м
Жидкая сталь (Б4)	110 См/м [17]	В соответствии с размерами ванны
Стальная часть ПЭ (Б5) / Анод (Г2)	$1,2 \cdot 10^6$ См/м (+) 150 В [19]	$d_{nc} = 0,20$ для ПЭ стержневого типа. $d_{nn} = (0,5 - 0,75) D_B$ для ПЭ пластинчатого типа

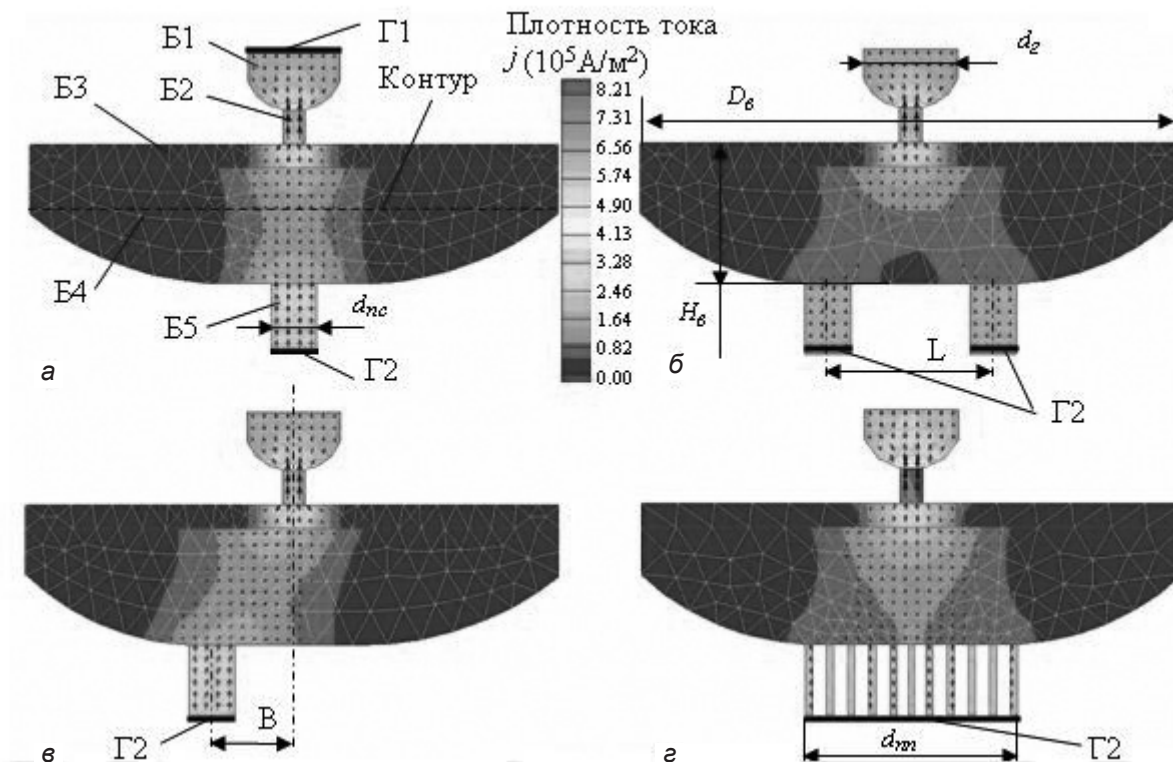


Рис. 6. Поле плотности тока в 12-т ДСППТ. Обозначения – в тексте и табл. 2.

ка j_{cp} , как полусумму максимального j_{max} и условного j_{max}/e значений, входящих в выражение для искомой мощности перемешивания при ЭВТ (7). Электродинамическое давление дуги на поверхность расплава не учитывали ввиду сопоставительного характера анализа.

Результаты моделирования в виде полей плотности тока приведены на рис. 6 для вариантов: а – осесимметрично расположенный ПЭ стержневого типа; б – два симметрично установленных ПЭ стержневого типа; в – смещенный от оси симметрии ПЭ стержневого типа; г – ПЭ пластинчатого типа (базовый вариант). Интегральные показатели, характеризующие ЭВТ для рассмотренных вариантов, приведены в табл. 3.

Согласно приведенным данным, максимальная плотность тока наблюдается в дуге, катодном пятне и ПЭ (рис. 6). Расчетные значения характерной скорости ЭВТ от 0,27 до 0,86 м/с (табл. 3) согласуются с данными численного и физического моделирования [8–10]. Мощность перемешивания при ЭВТ, оцененная для рассмотренных вариантов геометрии системы ванна – ПЭ, находится в пределах от 11 до 84 Вт/т (табл. 3) и по порядку величины соответствует мощности пневматического перемешивания при продувке сталеплавильной ванны инертным газом через донную пористую пробку [20].

При смещении ПЭ стержневого типа от оси симметрии печи (рис. 6, в) растет роль межэлектродного расстояния как фактора, определяющего основные характеристики ЭВТ.

ПЭ стержневого типа могут обеспечить более высокую мощность перемешивания при ЭВТ, чем ПЭ пластинчатого типа (табл. 3).

Таблица 3

Расчетные средние показатели ЭВТ в ванне 12-т ДСППТ

Показатель, размерность	Значение для вариантов ПЭ (рис. 6)			
	а	б	в	г
Плотность тока в ванне, кА/м ²	79	52	121	67
Относительный активный объем ванны, %	10,2	84,1	29,7	28,6
Объемная электромагнитная сила, Н	208	1472	1592	643
Характерная скорость ЭВТ в ванне, м/с	0,63	0,27	0,64	0,48
Мощность перемешивания, Вт/т	11	35	84	22

Характер влияния установки второго ПЭ и смещения ПЭ стержневого типа соответствуют данным [9]. При установке двух ПЭ стержневого типа (рис. 6, б) возрастают активный объем и мощность перемешивания, несмотря на некоторое снижение плотности тока в ванне и характерной скорости ЭВТ (табл. 3). Смещение ПЭ также позволяет увеличить мощность перемешивания в сравнении с базовым вариантом (табл. 3) за счет высокой плотности тока в ванне и увеличения расстояния между ПЭ и катодом. Однако при этом следует ожидать усиления негативного воздействия ЭВТ на футеровку вследствие приближения ПЭ к стенам ванны и повышения вероятности возникновения проблем, связанных с электрическим контактом между ПЭ и шихтой.

Продолжительность усреднения (τ_{mix} , с) жидкой стали по температуре и химическому составу (с точностью 5 % от теоретического значения, принятой

в промышленности) связана с мощностью перемешивания (N , Вт/т) эмпирической зависимостью вида [21]:

$$\tau_{\text{mix}} = k \cdot N^{-0,4}, \quad (12)$$

где k – эмпирический коэффициент, равный 800 для условий внепечной обработки стали.

Основываясь на данных численного моделирования, в ДСППТ с ПЭ стержневого типа, мощность перемешивания ЭВТ увеличивается в 1,6–3,7 раза в сравнении с базовым вариантом. При этом, согласно (12), следует ожидать сокращения периода доводки стали, которая лимитируется процессами усреднения ванны по температуре и химическому составу в 1,2–1,7 раза. Учитывая долю энергозатрат периода доводки в общем балансе плавки 20–25 %, ожидаемое сокращение расхода электроэнергии составит 3–9 %.

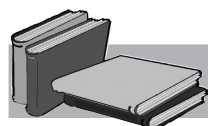
Выводы

Выполнено численное моделирование энергоэффективных решений водоохлаждаемых элементов футеровки и подового электрода 12-тонной ДСППТ.

Оценка потерь энергии, связанных с аккумуляцией тепла футеровкой при простоях печи длительностью 16 часов, составляет 252 кВтч/т. Эти потери можно компенсировать применением менее энергоемкого ограждения рабочего пространства печи с использованием энергосберегающих ВЭ с пространственной структурой при существенном сокращении удельного расхода огнеупоров.

ВЭ с пространственной структурой позволяют снизить потери тепла с водой на 25–35 % в сравнении с традиционными ВЭ с плотной укладкой труб за счет эффективного использования теплоизолирующих и теплоаккумулирующих свойств гарнисажа.

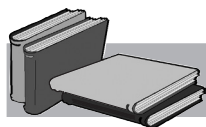
В ДСППТ малой вместимости, работающей по классической технологии без оставления «болота», ПЭ стержневого типа представляется более энергоэффективным и обеспечивающим надежный контакт с шихтой, чем ПЭ пластинчатого типа. Применение ПЭ стержневого типа позволяет увеличить мощность перемешивания ЭВТ и сократить длительность доводки стали и, соответственно, расход электроэнергии на плавку на 3–9 %.



ЛИТЕРАТУРА

1. Lupi S. Fundamentals of Electroheat: Electrical Technologies for Process Heating // Springer International Publishing Switzerland, 2017. – 620 p.
2. Toulouevski Yu. N., Zinurov I. Y. Innovation in Electric Arc Furnaces. Scientific Basis for Selection. – Berlin: Springer-Verlag, 2010. – 258 p.
3. Малиновский В. С., Власова И. Б., Малиновский В. Д. Технично-економические результаты промышленного освоения дуговых печей постоянного тока нового поколения // Черная металлургия: Бюллетень ЦНТИ (РФ). – 2010. – № 2. – С. 26–40.
4. Тищенко П. И., Тищенко А. П., Тимошенко С. Н., Фридман М. А. Подовый электрод дуговой печи постоянного тока // Металлургическая и горнорудная промышленность. – Украина. – 2012. – № 7. – С. 282–284.
5. Петров В. Г. Исследование закономерностей тепловых режимов дуговых сталеплавильных печей литейного класса: автореф. дис. к. т. н. – Чебоксары (РФ), 2005. – 24 с.
6. Бояревич В. В., Фрейберг Я. Ж., Шилова Е. И., Щербинин Э. В. Электровихревые течения. – Рига: Зинатне, 1985. – 315 с.
7. SIMETAL EAF – solutions for electric arc furnaces. URL: <http://www.congnghesx.com/upload/files/SIMETAL-EAF-en.pdf> (accessed 11.10.2017).
8. Ramirez M. Modeling of a DC Electric Arc Furnace Mixing in the Bath // ISIJ International. – 2001. – vol. 41. – № 10. – pp. 1146–1155.
9. Ячиков И. М., Портнова И. В. Характер электровихревого течения металла в ванне дуговой печи постоянного тока // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований (РФ). – 2015. – № 6. – pp. 422–426.
10. Kazak O. Modeling of vortex flows in direct current electric arc furnace with different bottom electrode Positions // Metallurgical and Materials Transactions B. – 2013. – vol. 44. – № 5. – pp. 1243–1250.
11. Тищенко П. И., Нихамин С. М., Тимошенко С. Н., Дунь Н. Б. Водоохлаждаемый свод и стеновые панели дуговых сталеплавильных печей малой металлургии // XIII Международная конф. «Современные проблемы электрометаллургии стали». – Челябинск, изд-во ЮУрГУ. – 2007. – Часть 2. – С. 159–161.
12. Timoshenko S. N. Analysis of energy efficient solutions of a small capacity electric arc furnace and their synthesis in a new generation 15-ton unit // Сучасні проблеми металургії. Наукові вісті. № 20. – Дніпро: НМетАУ – IBK Системні технології, 2017. – С. 78–87.
13. Kruger K., Ehrbar A., Timm K. Schlackenabdeckungen und thermische Verluste eines Drehstrofens // Stahl und Eisen. – 1998. – № 9 (118). – P. 63–67.
14. ООО «Тор», СПб. ELCUT®. Моделирование электромагнитных, тепловых и упругих полей методом конечных элементов. Версия 6.3. Руководство пользователя. URL: <https://elcut.ru/demo/manual.pdf> (accessed 01.09.2017).
15. Properties and characteristics of graphite. © Poco Graphite Inc., 2015. 42 p. URL: <https://www.entegris.com/content/dam/web/resources/manuals-and-guides/manual-properties-and-characteristics-of-graphite-109441.pdf> (accessed 01.08.2017).
16. Panoiu M., Panoiu C., Sora I. Modeling of three phase electric arc furnace // Acta Electrotehnica (Romania). – 2007. – vol. 48. – № 2. – P. 124–132.

17. Sorek A., Popielska-Ostrowska P., Niesler M. Research of electrical conductivity of synthetic powders // Archives of Materials Science and Engineering (Poland). – 2012. – vol. 57. – Iss. 2, P. 53–56.
18. Van Zytveld J. Electrical resistivity of liquid transition metals // Journal de physique (USA). – 1980. – vol. 41. – № 8. – P. 503–506.
19. Шишков М. М. Марочник сталей и сплавов. Справочник. – Донецк: Юго-Восток, 2002. – 456 с.
20. Ghosh A. Secondary Steelmaking. Principles and Applications. – Boca Raton – London – New York – Washington DC: CRC Press, 2000. – 344 p.
21. Nakanishi K., Fujii T., Szekely J. Possible relationship between energy dissipation and agitation in steel processing operations // Ironmaking & Steelmaking. – 1975. – № 3. – P. 193–194.



REFERENCES

1. Lupi S. (2017). [Fundamentals of Electroheat: Electrical Technologies for Process Heating]. Springer International Publishing Switzerland, 620 p. [in English].
2. Toulouevski Yu. N., Zinurov I. Y. (2010). [Innovation in Electric Arc Furnaces. Scientific Basis for Selection]. Berlin: Springer-Verlag, 258 p. [in English].
3. Malinovskiy V. S., Vlasova I. B., Malinovskiy V. D. (2010). Tekhniko-ekonomicheskiye rezul'taty promyshlennogo osvoeniia dugovykh pechei postoiannogo toka novogo pokolenia [Technical and economic results of industrial development of DC new generation arc furnaces]. Chernaya metallurgiya: Biulleten' TSNTI (Russia), no. 2, pp. 26–40 [in Russian].
4. Tishchenko P. I., Tishchenko A. P., Timoshenko S. N., Fridman M. A. (2012). Podovyi elektrod dugovoi pechi postoiannogo toka [The bottom electrode of a DC arc furnace]. Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost' (Ukraine), no. 7, pp. 282–284 [in Russian].
5. Petrov V. G. (2005). Issledovanie zakonornostei teplovykh rezhimov dugovykh staleplavilnykh pechei liteinogo klassa [Study of patterns of heat regimes of the foundry class EAF]. Extended abstract of candidate's thesis, Cheboksary (Russia), 24 p. [in Russian].
6. Boiarevich V. V., Freiberg Ya. Z., Shilova E. I., Shcherbinin E. V. (1985). Elektrovikhrevye techeniya [Electro-vortex flows]. Riga: Zinatne, 315 p. [in Russian].
7. SIMETAL EAF – solutions for electric arc furnaces. URL: <http://www.congnghesx.com/upload/files/SIMETAL-EAF-en.pdf> (accessed 11.10.2017) [in English].
8. Ramirez M. (2001). [Modeling of a DC Electric Arc Furnace Mixing in the Bath]. ISIJ International, vol. 41, no. 10, pp. 1146–1155 [in English].
9. Yachikov I. M., Portnova I. V. (2015). Kharakter elektrovikhrevogo techeniya metalla v vanne dugovoi pechi postoiannogo toka [The nature of the vortex flow of metal in the bath of a DC arc furnace]. Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy (Russia), no. 6, pp. 422–426 [in Russian].
10. Kazak O. (2013). [Modeling of vortex flows in direct current electric arc furnace with different bottom electrode positions]. Metallurgical and Materials Transactions B, vol. 44, no. 5, pp. 1243–1250 [in English].
11. Tishchenko P. I., Nikhamin S. M., Timoshenko S. N., Dun' N. B. (2007). Vodookhlazhdaemyi svod i stenovye paneli dugovykh staleplavil'nykh pechei maloi metalurgii [Water-cooled roof and wall panels of arc steel-smelting furnaces of small metallurgy]. Mezhdunarodnaya konf. «Sovremennyye problemy elektrometallurgii stali», Cheliabinsk (Russia), Vol. 2. pp. 159–161 [in Russian].
12. Timoshenko S. N. (2017). [Analysis of energy efficient solutions of a small capacity electric arc furnace and their synthesis in a new generation 15-ton unit]. Suchasni problemi metalurgii. Naukovi visti, no. 20, Dnipro: NMetAU– IBK Systemni tekhnologii, pp. 78–87 [in English].
13. Kruger K., Ehrbar A., Timm K. (1998). [Schlackenanbackungen und thermische Verluste eines Drehstrofens]. Stahl und Eisen, no. 9 (118), pp. 63–67 [in German].
14. ООО «Тор», St. Petersburg. ELCUT®. Modelirovaniye elektromagnitnykh, teplovykh i uprugikh polei metodom konechnykh elementov. Versiya 6.3. Rukovodstvo pol'zovatelya. [Modeling of electromagnetic, thermal and elastic fields by the finite element method. Version 6.3. User guide]. URL: <https://elcut.ru/demo/manual.pdf>. (accessed 01.09.2017) [in Russian].
15. Properties and characteristics of graphite. © Poco Graphite Inc. (2015), 42 p. URL: <https://www.entegris.com/content/dam/web/resources/manuals-and-guides/manual-properties-and-characteristics-of-graphite-109441.pdf>. (accessed 01.08.2017) [in English].
16. Panoiu M., Panoiu C., Sora I. (2007). [Modeling of three phase electric arc furnace]. Acta Electrotehnica (Romania), vol. 48, no. 2, pp. 124–132 [in English].
17. Sorek A., Popielska-Ostrowska P., Niesler M. (2012). [Research of electrical conductivity of synthetic powders]. Archives of Materials Science and Engineering (Poland), vol. 57, Iss. 2, pp. 53–56 [in English].
18. Van Zytveld J. (1980). [Electrical resistivity of liquid transition metals]. Journal de physique (USA), vol. 41, no. 8, pp. 503–506 [in English].
19. Shishkov M. M. (2002). Marochnik stalei i splavov. Spravochnik [Steels and alloys. Reference book]. Donetsk: Yugo-Vostok, 456 p. [in Russian].
20. Ghosh A. (2000). [Secondary Steelmaking. Principles and Applications]. Boca Raton – London – New York – Washington DC: CRC Press, 344 p. [in English].
21. Nakanishi K., Fujii T., Szekely J. (1975). [Possible relationship between energy dissipation and agitation in steel processing operations]. Ironmaking & Steelmaking, no. 3, pp. 193–194 [in English].

Анотація

Тимошенко С. М., Філіппі О. О., Онищенко С. П., Тищенко П. І.

Енергоефективні рішення при модернізації дугових сталеплавильних печей постійного струму ливарного класу

Виконано чисельне моделювання теплової роботи футеровки і розподілу щільності струму у ванні 12-тонної дугової сталеплавильної печі постійного струму ливарного класу. Встановлено, що при простоях печі більше 15 годин, установка водоохолоджуваних елементів (ВЕ) з просторовою структурою замість частини футеровки знижує втрати енергії печі за рахунок скорочення витрат на акумуляцію тепла, незважаючи на додаткові втрати з водою. ВЕ з просторовою структурою знижують втрати тепла з водою на 25–35 % в порівнянні з традиційними ВЕ з щільним укладанням труб. Установка подових електродів (ПЕ) стрижневого типу замість ПЕ пластинчастого типу дозволяє скоротити енергоспоживання піччю на 3–9 % за рахунок інтенсифікації електровихрових течій у сталеплавильній ванні.

Ключові слова

Дугова піч постійного струму, акумуляція тепла, водоохолоджувані елементи, подовий електрод, енергоефективність.

Summary

Timoshenko S., Filippi A., Onishchenko S., Tishchenko P.

Energy-efficient solutions for the modernization of DC steelmaking arc furnaces of the foundry class

A numerical simulation of the thermal work of the refractory lining and electrical current density distribution in the bath of a 12-ton DC steelmaking arc furnace of the foundry class is performed. It has been established that in the case of furnace downtime over 15 hours, the installation of water-cooled elements (WCE) with a spatial structure rather than a part of the lining reduces the energy loss of the furnace due to reducing the costs of heat accumulation, in spite of additional loss with water. WCE with a spatial structure reduce heat loss with water by 25–35 % compared to traditional WE with dense pipe laying. The installation of billet-type bottom electrodes (BE) instead of pin-type ones allows to reduce the energy consumption of the furnace by 3–9 % due to the intensification of electro-vortex currents in a steel-smelting bath.

Keywords

DC steelmaking arc furnace, heat accumulation, water cooled elements, bottom electrode, energy efficiency.

Поступила 13.11.17