

УДК 621.365.32

Д.С. Ярымбаш, канд. техн. наук, доц.

Запорожский национальный технический университет,
г. Запорожье, Украина, e-mail: yarymbash@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ И ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПЕЧАХ ГРАФИТАЦИИ ПЕРЕМЕННОГО И ПОСТОЯННОГО ТОКА

D.S. Yarymbash, Cand. Sci. (Tech.),
Associate ProfessorZaporizhzhya National Technical University, Zaporizhzhya,
Ukraine, e-mail: yarymbash@gmail.com

THE RESEARCH OF ELECTROMAGNETIC AND THERMOELECTRIC PROCESSES IN THE AC AND DC GRAPHITIZATION FURNACES

Цель. Исследование режимов, 3D моделирование и расчеты методом конечных элементов сопряженных электромагнитных, электротепловых и тепломассообменных процессов графитации, распределения плотностей токов и удельных мощностей нагрева при графитации переменным и постоянным током, которые учитывают особенности конструкции печей графитации, керна и шинных пакетов, температурные зависимости электрофизических, теплофизических и массообменных свойств.

Методика. Численное моделирование сопряженных пространственных электромагнитных и температурных полей при графитации заготовок электродов в печах Ачесона методами конечных элементов (МКЭ), теории электромагнитных полей, тепломассопереноса.

Результаты. Представлены теоретические исследования и моделирование электромагнитных и термоэлектрических процессов на основе численной реализации методом конечных элементов обобщенной 3D модели графитации постоянным и переменным током, отображающей особенности электромагнитных, электротепловых и тепломассообменных процессов в печи графитации, ее керна и боковых шинных пакетах печной петли. Исследованиями установлено, что при графитации переменным током из-за поверхностных эффектов в кернах и внешних поверхностных эффектов от боковых шинных пакетов достигается рост удельной мощности тепловыделения в торцевых областях заготовок. Это позволяет выравнивать распределение температур в заготовках электродов, снизить перепады температур, обеспечить более высокий уровень качества готовой продукции по сравнению с графитацией постоянным током.

Научная новизна. Определены характер и закономерности распределения плотностей токов и удельных электрических потерь в кернах и заготовках электродов, графитируемых постоянным и переменным током, а также их количественные отличия в основной зоне и в торцевых зонах керна.

Практическая значимость. Обоснован трехэтапный режим ввода мощности графитации по критерию средней температуры керна: первый этап – разогрев постоянным током до средней температуры керна 1000 °С, второй этап – разогрев переменным током от температуры 1000 до 3000°С, третий этап – завершающая фаза графитации постоянным током. Это позволит уменьшить расход электроэнергии на компенсацию реактивной мощности во время кампании графитации на 70–75% и расход электроэнергии на тонну готовой продукции на 4,2–4,5%. Разработанные технологические подходы и режимы могут применяться на предприятиях горно-металлургического комплекса и смежных отраслей.

Ключевые слова: 3D моделирование, процесс графитации, электромагнитные и температурные поля, метод конечных элементов, расход электроэнергии, качество электродной продукции

Постановка проблемы. До настоящего времени в отечественной электродной промышленности для производства продукции качества Ultra High Power (UHP) используются печи графитации (ПГ) Ачесона. ПГ Ачесона относятся к группе электрических печей сопротивления прямого нагрева. Они состоят из: корытообразного основания; двух торцевых стенок с проемами для укладки токоподводящих электродов, к которым через короткую сеть (КС) подводится ток от мощного источника питания (трансформатора или выпрямителя); подовой набивки, состоящей из смеси песка и порошкообразных углеродистых материалов; боковых стенок; рабочего пространства (керна), образованного уложенными в горизонтальные ряды графитируемыми заго-

товками электродов с токопроводящей пересыпкой и специальными слоями шунтирующей засыпки и теплоизоляционной шихты по периметру его поперечного сечения; графитовых плит, расположенных между торцевыми стенками и кернами ПГ и обеспечивающих его электрический контакт с токоподводящими графитовыми электродами. Для отвода газов, которые образуются в процессе графитации, на печь устанавливается стальной кожух, который подключается к вытяжной магистрали. Вдоль ПГ расположены проводники боковых шинных пакетов (БШП).

Для ПГ, работающих по технологии Ачесона, характерны высокие расходы электрической энергии и перепады температур в объеме керна печи и в заготовках электродов. Последний фактор обуславливает трещинообразование и снижение качества конечной продук-

ции, для обеспечения которого требуются ограничения на темп ввода мощности графитации и разогрева зерна. Это приводит к росту продолжительности технологического процесса и затрат электроэнергии для компенсации тепловых потерь в окружающую среду.

Большая энергоемкость процесса графитации, составляющая 7–8 МВт·часов на тонну электродной продукции [1, 2], значительные мощности установленного оборудования обуславливают проблему рационального распределения удельной тепловой мощности в объеме зерна для ее концентрации возле менее прогретых торцов электродов. Это может обеспечить выравнивание температурного поля заготовок, увеличение темпа ввода мощности графитации, снижение энергозатрат на кампанию графитации и повышение качества готовой продукции.

Анализ исследований и публикаций. Характер распределения активной мощности в объеме зерна печи графитации, особенности его нагрева и формирования температурного поля, оказывающие существенное влияние на энергоэффективность технологического процесса, изучены все еще недостаточно. При исследовании электротепловых процессов, протекающих в объеме зерна ПГ в процессе графитации заготовок электродов, используются экспериментальные, аналитические, численные методы моделирования и их комбинации.

Экспериментальные исследования на действующем технологическом оборудовании ограничены возможностями контрольно-измерительных приборов, температурными режимами графитации, агрессивными средами, а также значительными финансовыми затратами при варьировании технологических режимов и конструктивных параметров оборудования [1, 2].

Аналитические методы применяются, как правило, при исследовании линейных или линеаризованных моделей простой геометрической формы [3, 4].

При численном моделировании могут учитываться особенности конструкции печей графитации и шинных пакетов печной петли (ПП), пространственное размещение заготовок электродов в пересыпке зерна, температурные зависимости электромагнитных и теплофизических свойств материалов зерна ПГ и шинных пакетов, а также технологические режимы графитации. При этом математические модели и методы их численной реализации должны удовлетворять требованиям точности и вычислительной эффективности.

При исследовании термоэлектрических режимов работы печей графитации широко применяются схемные модели, для определения параметров которых используются эмпирические соотношения и методы теории электрических цепей. В основе данного подхода лежит целый ряд допущений и упрощений, которые существенно искажают реальную картину электротепловых и электромагнитных процессов переменного тока в сложных пространственных многокомпонентных гетерогенных системах зерна и шинных пакетов, не учитывая влияние поверхностного эффекта от поля собственных токов и внешние поверхностные эффекты. Это приводит к значительному увеличению погрешности при расчетах мощности графитации, токовых нагрузок,

объемного распределения плотности тока, удельной электрической мощности в графитируемых заготовках электродов и температурного поля зерна, не позволяя достоверно оценить преимущества и недостатки процессов графитации постоянным и переменным током.

В известных 3D моделях термоэлектрических процессов графитации постоянным током используются сопряженные системы дифференциальных уравнений стационарной электропроводности и нестационарной теплопроводности для расчетного объемного элемента, который отображает зерно ПГ. Этот элемент отсекается от зерна вертикальными плоскостями, одна из которых проходит через оси заготовок вертикального ряда, а другая – посередине ближайшей междурядной пересыпки [5].

С целью упрощения численной реализации математической модели печи графитации авторы [5] рассматривают узкий расчетный элемент ПГ, который не отображает в достаточной мере особенности конструктивного исполнения в продольных сечениях ПГ, поскольку его длина не превышает 3–4% от длины зерна. Кроме того в работе [5] сделано допущение о постоянстве электрических потенциалов на граничных вертикальных плоскостях объемного элемента зерна, что не соответствует реальной картине электрического поля.

Термоэлектрическая модель [5] не позволяет исследовать электромагнитные и электротепловые процессы графитации заготовок электродов переменным током. Она не учитывает особенности электромагнитных и температурных полей в торцевых и внутренних зонах зерна, влияние токов в шинных пакетах ПП, экранирующие эффекты от стального кожуха и не обеспечивает требуемую точность и достоверность расчетов объемного распределения плотности переменного тока и удельной электрической мощности в зерне и графитируемых заготовках электродов.

При численном моделировании процессов графитации широкие возможности раскрывают методы конечных элементов (МКЭ), позволяющие реализовывать сопряженные модели, описывающие электромагнитные процессы с учетом температурных зависимостей электрических, магнитных и теплофизических свойств материалов в сложных пространственных многокомпонентных системах [6].

Необходимость разработки технических решений, соответствующих современным требованиям энергоэффективности технологического процесса графитации и УНР уровню качества продукции, обуславливает актуальность создания достоверных корректно сформулированных сопряженных электромагнитных, электротепловых и тепломассообменных 3D моделей и расширение области приложения МКЭ для полевых расчетов процессов графитации постоянным и переменным током.

Цель работы. Исследование режимов, 3D моделирование и расчеты методом конечных элементов сопряженных электромагнитных, электротепловых и тепломассообменных процессов графитации, распределения плотностей токов и удельных мощностей нагрева при графитации переменным и постоянным током, которые учитывают особенности конструкции печей гра-

фитации, керна и шинных пакетов, температурные зависимости электрофизических, теплофизических и массообменных свойств.

Материал и результаты исследований. При формировании обобщенной 3D модели графитации выделяется расчетная область с БШП 7 и ПГ с шамотной футеровкой 5, стальным кожухом 6 и керном, которой включает заготовки электродов 1, пересыпку 2, электропроводящую засыпку 3 и теплоизоляционную шихту 4 (рис.1, а). Эта расчетная область обладает свойствами симметрии относительно вертикальной плоскости симметрии, которая проходит через продольную ось керна ПГ.

По данным [6] электромагнитное поле в окрестностях графитовых плит и торцов керна ПГ приближается к плоскопараллельному полю, а падения напряжения в графитовых плитах существенно меньше падений напряжения на других участках ПП. Поэтому моделирование электромагнитных процессов в области керна ПГ и БШП можно осуществлять инвариантно к областям торцевых шинных пакетов и токоподводов.

В соответствии с [1, 2] принимаются допущения об изотропности свойств материалов, неизменности магнитных свойств неферромагнитных материалов, отсутствии токов смещения и свободных зарядов. Принимая во внимание подобие электрических полей в электроизоляционных средах и в электропроводящих средах с достаточно малой удельной электрической проводимостью, можно заменить электроизоляционные среды, окружающие области керна, БШП и кожуха ПГ, электропроводящими средами с достаточно малой удельной электропроводностью.

Допущение о симметричном распределении токовых и тепловых нагрузок в токоподводах, керне, других элементах ПГ, ПП и геометрическая симметрия ПГ, ПП (рис.1, а) обуславливают симметрию электромагнитных и температурных полей относительно вертикальной плоскости, проходящей через продольную ось ПГ. Поэтому, для моделирования и расчетов можно рассматривать только одну из двух симметричных под областей (рис.1, б).

Электромагнитное поле в электропроводящих средах описывается сопряженной системой уравнений Максвелла относительно векторного магнитного и скалярного электрического потенциалов [6]

$$\begin{cases} \nabla \times [(\mu_0 \mu_{y_j})^{-1} \nabla \times \mathbf{A}_j] = \mathbf{Q}_A \\ \nabla \cdot [\sigma_j(\theta_j) \cdot \nabla \cdot V_j] = Q_V \end{cases}, \quad (1)$$

где \mathbf{A}_j, V_j – векторный магнитный и электрический потенциалы; $\sigma_j(\theta)$ – температурная зависимость удельной электрической проводимости; θ_j – локальная температура; μ_0 – магнитная проницаемость вакуума; μ_j – эквивалентная относительная магнитная проницаемость.

Для ПГ постоянного тока уравнения системы (1) будут однородными, так как

$$\begin{cases} Q_A = 0 \\ Q_V = 0 \end{cases}, \quad (2)$$

а для ПГ переменного тока должны рассматриваться выражения для правых частей в дифференциальных уравнениях системы (1)

$$\begin{cases} Q_A = -j\omega\sigma_j(\theta_j)(\mathbf{A}_j + \nabla V_j) \\ Q_V = -j\omega \cdot \nabla \cdot (\sigma_j(\theta_j) \cdot \mathbf{A}_j) \end{cases}, \quad (3)$$

где ω – угловая частота; индексы $j = 1...7$ определяют электропроводящие под области в расчетной области (рис.1, а).

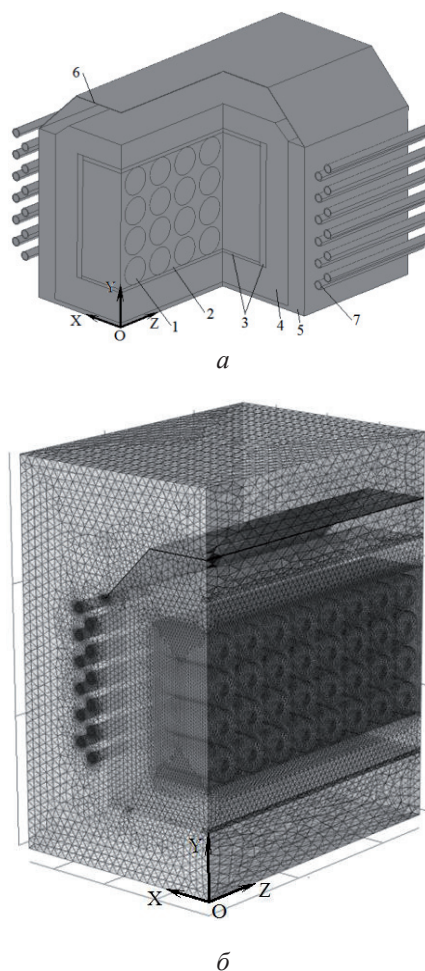


Рис.1. Конструкция печи графитации и БШП (а), расчетная область 3D модели графитации (б): 1 – заготовки электродов; 2 – пересыпка; 3 – шунт; 4 – теплоизоляционная шихта; 5 – шамотная футеровка; 6 – кожух; 7 – БШП

Температурные зависимости для удельных электрических проводимостей активных и конструкционных материалов ($\sigma_j(\theta)$), $j = 1,2,3,6,7$) принимаются по данным [1, 2], а эквивалентная относительная магнитная проницаемость μ_j для стального кожуха 6 ПГ (рис. 1, а) определяется как функция модулей амплитудных значений индукции в этом кожухе.

Система уравнений (1) дополняется условиями калибровки Кулона [6]

$$\text{div}(\mathbf{A}) = 0. \quad (4)$$

Электротепловая модель отображается сопряженной системой уравнений нестационарной теплопроводности

$$\begin{cases} c_{\text{экв}j}(\theta_j) \cdot \rho_j(\theta_j) \cdot \partial\theta_j / \partial\tau + \text{div}(\lambda_j(\theta_j) \cdot \mathbf{grad}(\theta_j)) = \\ = k_I \sigma_j(\theta_j)^{-1} |J_j(\theta_j)|^2 + \\ + \rho(\theta_j) \cdot \sum_{k=1}^n r_k(\theta_j) \cdot \partial u_{k,j} / \partial\tau, j=1,2,3, \\ c_j(\theta_j) \cdot \rho_j(\theta_j) \cdot \partial\theta_j / \partial\tau + \\ + \text{div}(\lambda_j(\theta_j) \cdot \mathbf{grad}(\theta_j)) = 0, j=4,5, \\ c_j(\theta_j) \cdot \rho_j(\theta_j) \cdot \partial\theta_j / \partial\tau + \text{div}(\lambda_j(\theta_j) \cdot \mathbf{grad}(\theta_j)) = \\ = k_I \sigma_j(\theta_j)^{-1} |J_j(\theta_j)|^2, j=6,7, \end{cases} \quad (5)$$

где $c_{\text{экв}j}(\theta_j) = c_j(\theta_j) + \sum_{k=1}^n (r_k(\theta_j) \cdot \partial u_{k,j} / \partial\tau)$ – эффективные удельные теплоемкости компонентов керна; $c_j(\theta_j), \rho_j(\theta_j), \lambda_j(\theta_j)$ – удельные теплоемкости, плотности и коэффициенты теплопроводности; $r_k(\theta_j)$ – удельная теплота фазового перехода влаги, химических реакций для графитируемых компонентов заготовок электродов, пересыпки и шихты керна; $u_{k,j}$ – влагосодержание или концентрации.

Плотности токов определяются соотношениями

$$J_j(\theta_j) = -\sigma_j(\theta_j) \cdot \mathbf{grad}(V_j), k_I = 1, j=1,2,3,6,7$$

– при графитации постоянным током;

$$J_j(\theta_j) = -\sigma_j(\theta_j) \cdot (\mathbf{grad}(V_j) + j\omega A_j), \\ k_I = 0,5, j=1,2,3,6,7$$

– при графитации переменным током.

Механизмы теплообмена при свободной конвекции охлаждающего воздуха и линейной температурной зависимости его плотности описываются системой уравнений [6]

$$\begin{cases} (W_j \cdot \nabla) W_j = -\rho(\theta_j)^{-1} \nabla p_j + \\ + \nu(\theta_j) \Delta W_j - \beta_j(\theta_j - \theta_0) \mathbf{g}, \\ \rho(\theta_j) C_p(\theta_j) (v_{i,j} \cdot \nabla \theta_j) - \nabla \cdot (\lambda(\theta_j) \cdot \nabla \theta_j) = 0_j, \\ \text{div} w_j = 0, j=8, \end{cases} \quad (6)$$

где w_j – скорость охлаждающего воздуха; $\rho(\theta), C_p(\theta), \nu(\theta), \beta$ – плотность, удельная теплоемкость, кинематическая вязкость и коэффициент объемного расширения воздуха; \mathbf{g} – ускорение свободного падения.

Внутри расчетной области (рис.1, б) условия сопряжения магнитных, электрических и температурных полей на границах раздела сред с различными электрофизическими и теплофизическими свойствами формулируются в виде

$$\begin{cases} \mathbf{n}_{i,k} \times (\mathbf{H}_i - \mathbf{H}_k) = 0 |_{\forall i,k \in (1,4), i \neq k} \\ \mathbf{n}_{i,k} \cdot (\mathbf{J}_i - \mathbf{J}_k) = 0 |_{\forall i,k \in (1,4), i \neq k} \\ \mathbf{n}_{i,k} \cdot (\lambda(\theta_i) \cdot \nabla \theta_i - \lambda(\theta_k) \cdot \nabla \theta_k) = 0 \\ \theta_i - \theta_k = 0 |_{\forall i,k \in (1,3), i \neq k} \end{cases} \quad (7)$$

где $\mathbf{H} = (\mu_0 \mu)^{-1} \nabla \times \mathbf{A}$ – напряженность магнитного поля.

Задаются однородные граничные условия на внешних боковых поверхностях расчетной области

$$\begin{cases} \mathbf{A}_j = 0 |_{\forall j \in (1,4)} \\ \mathbf{n}_j \cdot \mathbf{J}_j = 0 |_{j=4} \\ \Delta \theta = \theta_j - \theta_0 = 0 |_{j=1,4} \end{cases} \quad (8)$$

формулируются граничные условия на торцах керна ПГ

$$\begin{cases} A_j = \bar{k} \cdot A_y(x, z) |_{j=4} \\ V_j = \varphi_j |_{\forall j \in (1,3)} \\ \theta_j = \theta_{\text{ш}} |_{j=1,4} \end{cases} \quad (9)$$

и на плоскости симметрии

$$\begin{cases} \mathbf{n}_i \times \mathbf{H}_i = 0 |_{i=1,4} \\ \mathbf{n}_i \cdot \mathbf{J}_i = 0 |_{i=1,4} \\ \mathbf{n}_i \cdot (\lambda(\theta_i) \cdot \nabla \theta_i) = 0, \theta_{i+} - \theta_{i-} = 0 |_{i=1,4} \end{cases} \quad (10)$$

При описании процессов теплообмена в шинах БШП с окружающей средой, с учетом свободной конвекции и радиационной теплоотдачи, может применяться эмпирическое соотношение [3], которое преобразуется в граничное условие

$$\begin{aligned} \mathbf{n}_j \cdot (\lambda(\theta_j) \cdot \nabla \theta_j) = 1,8 \cdot 10^{-4} \cdot \alpha_j \cdot (\theta_j - \theta_{oc}) + \\ + 5,7 \cdot \varepsilon \cdot (1 - \varphi) \cdot \left(\left(\frac{\theta_j}{1000} \right)^4 - \left(\frac{\theta_{oc}}{1000} \right)^4 \right), j=1,2, \end{aligned} \quad (11)$$

где α_k – коэффициент, зависящий от высоты (длины) шин; φ – коэффициент лучистого экранирования шин.

Условие (11) позволяет реализовывать решение систем уравнений электромагнитного поля (1–4) инвариантно по отношению к системам уравнений теплопроводности (5) и тепломассообмена (6). При расчетах температурных полей учитываются требования ПУЭ по допустимым уровням нагрева вторичных токопроводов.

Трехмерная модель (1–3) с условием калибровки Кулона (4), условиями сопряжения (7) и граничными условиями (8–11) реализуется методом конечных элементов в структуре средств Comsol Multiphysics.

Плотность и размеры конечных элементов в расчетной области (рис.1, б) варьируют для сокращения затрат времени и вычислительных ресурсов без снижения требуемого уровня точности расчетов. В шинах БШП плотность конечных элементов увеличивается, а по мере приближения к внешним границам расчетной области – снижается.

По данным моделирования определяются токи, протекающие через выделенную площадку $S(S_{yz}, S_{xz}, S_{xy})_j$, удельные потери в керне ПГ и в шинах БШП, мощность графитации

$$\begin{cases} I_{S|j} = \sqrt{|I_x|^2 + |I_y|^2 + |I_z|^2} \\ I_x|_j = \iint_{S_{yz}} J_x dydz, I_y|_j = \iint_{S_{xz}} J_y dx dz \\ I_z|_j = \iint_{S_{xy}} J_z dx dy \\ p|_j = \sigma_j^{-1} |J_j|^2, P|_j = \iiint_{V_j} p|_j dx dy dz \end{cases} \quad (12)$$

Итерационный вычислительный процесс отвечает принятым критериям точности для результирующих токов в шинах БШП и керне ПГ. Причем для графитации постоянным током сравниваются силы токов графитации и суммарных токов в БШП, а для переменного тока такое сравнение выполняется как по модулю амплитуд $\varepsilon_{I_{\text{тшп}}} \leq [\varepsilon_{\text{тшп}}]$, так и фазовому углу $\varepsilon_{\varphi_{\text{тшп}}} \leq [\varepsilon_{\varphi_{\text{тшп}}}]$ этих токов. Для суммарного тока БШП и тока графитации относительная невязка не превышает для модулей амплитуд 0,24%, для фаз этих токов – 0,07%.

Средняя температура керна ПГ рассчитывается с помощью интегрального соотношения

$$\theta_{\text{кern}} = \frac{1}{V_j} \iiint_{V_j} \theta|_j dx dy dz \quad (13)$$

Исследования проводятся путем реализации математической модели (1–11) в структуре средств ComsolMultiphysics с использованием интегральных соотношений (12) для интервала изменения средней температуры керна (13) от $\theta_{\text{кern}} = 20$ до $\theta_{\text{кern}} = 3000^\circ\text{C}$ во время кампании графитации.

Точность результатов численного моделирования оценивается путем сравнения расчетных значений мощности графитации, токов и падений напряжения в керне и БШП с экспериментальными данными регистрации электрических режимов для различных кампаний графитации переменным током (класс точности регистратора – 0,2). Относительные погрешности расчетов падений напряжений и мощности графитации не превышают 0,9 и 1,03%, относительная токовая погрешность составляет 1,12%.

По данным расчетов исследуется распределение относительных значений плотности тока (модуля плотности тока) при переменном (АС) и постоянном токе графитации (DC)

$$\begin{aligned} \tilde{J}_{\text{AC}} &= \frac{|J_{\text{AC}}(x, y, z, \theta_{\text{кern}}(\tau))|}{\max [J_{\text{DC}}(x, y, z, \theta_{\text{кern}}(\tau))]_{\forall(x, y, z) \in S_0}}; \\ \tilde{J}_{\text{DC}} &= \frac{J_{\text{DC}}(x, y, z, \theta_{\text{кern}}(\tau))}{\max [J_{\text{DC}}(x, y, z, \theta_{\text{кern}}(\tau))]_{\forall(x, y, z) \in S_0}}. \end{aligned} \quad (14)$$

Для визуализации расчетов рассматриваются распределения относительных плотностей токов в вертикальных плоскостях поперечного сечения, проходящего через оси заготовок основной зоны керна, при средних температурах графитации, равных $\theta_{\text{кern}} = 500$ и $\theta_{\text{кern}} = 2500^\circ\text{C}$ (рис. 2). Светлые поверхности относительных плотностей тока и серые линии их равного уровня соответствуют переменному току, более темные поверхности относительных плотностей тока и черные линии равного уровня – постоянному току (рис.2).

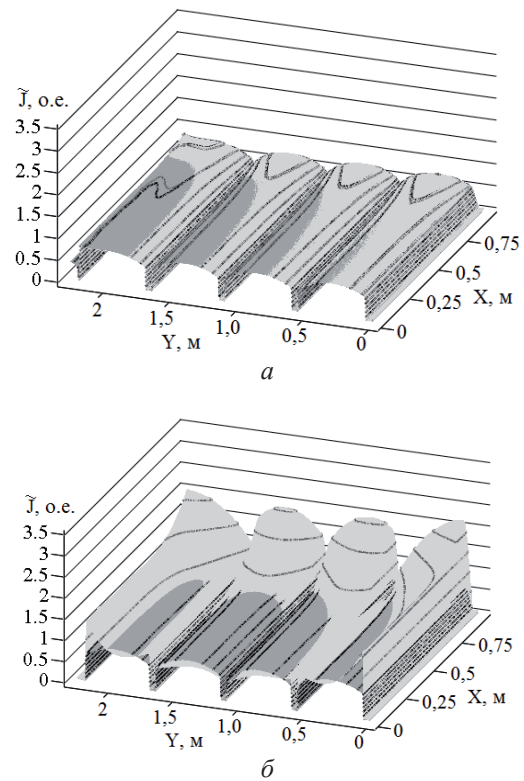


Рис. 2. Распределение относительной плотности тока в поперечном сечении керна при температурах $\theta_{\text{кern}} = 500^\circ\text{C}$ (а) и $\theta_{\text{кern}} = 2500^\circ\text{C}$ (б)

При средней температуре керна, равной $\theta_{\text{кern}} = 500^\circ\text{C}$ (рис. 2, а), эти поверхности достаточно близки друг к другу. В пересыпке между горизонтальными рядами заготовок относительные плотности токов существенно ниже, чем в самих заготовках электродов из-за шунтирующего эффекта этих заготовок. Максимальное значение плотности переменного тока (14) превышает аналогичное значение для постоянного тока только на 1,29%. Отношение среднего значения плотности тока к ее максимальному значению составляет 60,7% для постоянного тока и 60,3% – для переменного тока. Это обусловлено сравнительно высокими удельными сопротивлениями заготовок электродов, материалов пересыпки и шунтирующих слоев керна, что ограничивает влияние поверхностного эффекта от переменного тока керна и внешнего поверхностного эффекта от токов в БШП.

С ростом средней температуры керна до $\theta_{\text{кern}} = 2500^\circ\text{C}$, из-за снижения удельных сопротивлений его

материалов и, прежде всего, заготовок электродов, влияние поверхностного и внешнего поверхностного эффектов существенно усиливается (рис. 2, б). Поэтому поверхность относительной плотности переменного тока имеет явно выраженные вершины возле торцов электродов с максимумами значений возле границ шунтирующей шихты керна. Распределение относительной плотности постоянного тока вдоль заготовок электродов будет более равномерным.

При температуре $\theta_{\text{кern}} = 3000^\circ\text{C}$ отношение среднего значения плотности тока к ее максимальному значению остается примерно на том же уровне и составляет 66% для постоянного тока, а для переменного тока снижается до 28,2%.

Максимальное значение плотности переменного тока в заготовках становится больше соответствующего значения плотности постоянного тока на 160% при температуре $\theta_{\text{кern}} = 2500^\circ\text{C}$ и на 246% при температуре 3000°C .

Исследуется изменение кратности плотности тока, которая рассчитывается как отношение максимального значения плотности тока к ее среднему значению (рис. 3).



Рис. 3. Кратность плотности тока в поперечном сечении керна

При изменении средней температуры керна от $\theta_{\text{кern}} = 20$ до $\theta_{\text{кern}} = 1000^\circ\text{C}$ кривые кратности плотности тока для постоянного и переменного тока достаточно близки друг к другу. Причем на этом интервале температур для постоянного тока кратность его плотности монотонно возрастает и при средней температуре $\theta_{\text{кern}} = 1000^\circ\text{C}$ достигает максимума равного 1,745, а затем монотонно убывает до значения 1,508 при средней температуре керна $\theta_{\text{кern}} = 2500^\circ\text{C}$, оставаясь практически постоянной при температурах $2500^\circ\text{C} < \theta_{\text{кern}} < 3000^\circ\text{C}$.

Кратность плотности переменного тока в поперечном сечении керна монотонно увеличивается с 1,54 при температуре $\theta_{\text{кern}} = 20^\circ\text{C}$ до 3,55 при температуре $\theta_{\text{кern}} = 3000^\circ\text{C}$. Отмечается область стабилизации значений этого параметра, которая соответствует диапазону температур $1000^\circ\text{C} < \theta_{\text{кern}} < 2500^\circ\text{C}$.

По данным полевых расчетов с помощью соотношений

$$q_{AC} = \frac{|p_{AC}(x, y, z, \theta_{\text{кern}}(\tau))|}{\max [p_{DC}(x, y, z, \theta_{\text{кern}}(\tau))]_{V(x, y, z) \in S_s}}; \quad (15)$$

$$q_{DC} = \frac{p_{DC}(x, y, z, \theta_{\text{кern}}(\tau))}{\max [p_{DC}(x, y, z, \theta_{\text{кern}}(\tau))]_{V(x, y, z) \in S_s}}$$

выполняется нормирование удельных потерь в кerne относительно их максимального значения в указанных выше сечениях керна для графитации постоянным током.

Для визуализации расчетов рассматриваются распределения нормированных удельных потерь в вертикальных плоскостях поперечного сечения, проходящего через оси заготовок основной зоны керна, при средних температурах графитации, равных $\theta_{\text{кern}} = 500$ и $\theta_{\text{кern}} = 2500^\circ\text{C}$ (рис. 4). Светлые поверхности нормированных удельных потерь и серые линии их равного уровня соответствуют переменному току, более темные поверхности относительных плотностей тока и черные линии равного уровня — постоянному току (рис. 4).

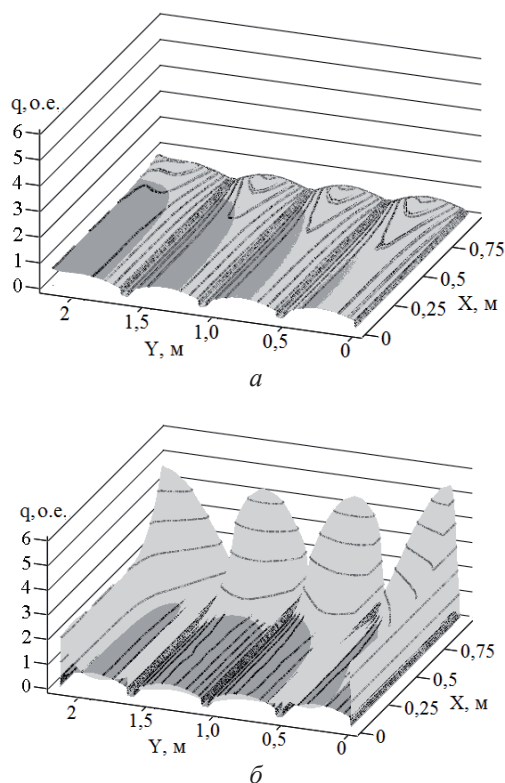


Рис. 4. Распределение нормированных значений удельных потерь в поперечном сечении керна при температурах $\theta_{\text{кern}} = 500^\circ\text{C}$ (а) и $\theta_{\text{кern}} = 2500^\circ\text{C}$ (б)

При средней температуре керна, равной $\theta_{\text{кern}} = 500^\circ\text{C}$, эти поверхности практически совпадают и контуры линии равного уровня для постоянного и переменного токов повторяют друг друга (рис.4, а). Поверхностный эффект и внешний поверхностный эффект при графитации переменным током при температурах керна $\theta_{\text{кern}} \leq 1000^\circ\text{C}$ практически не оказывают влияния на удельные потери. Поэтому добавочные потери в рассматриваемом сечении керна не превышают 1,4%.

По мере роста средней температуры керна наблюдается существенный рост добавочных потерь, прежде всего, на участках, имеющих протяженность до 25% длины заготовок электродов и прилегающих к их торцам (рис.4,б). При средней температуре керна $\theta_{\text{кern}} = 2500^\circ\text{C}$ максимальные значения нормированных удель-

ных потерь (15) составляют 4,1–4,24 для торцов внутренних заготовок и 4,98–5,25 – для торцов наружных заготовок внутренней зоны керна. Для торцевых зон керна эти значения увеличиваются на 6,2–7,3% относительно его внутренней зоны. При средней температуре керна $\theta_{\text{керна}} = 3000^\circ\text{C}$ добавочные потери достигают 144% в сечениях по осям электродов и не превышают 1,5% в пересыпке.

При графитации переменным током для средних температур керна выше 2000°C отмечается рост локальной удельной мощности тепловыделения в торцевых областях заготовок до 2,5 раз и увеличения тепловой мощности в боковых шунтирующих слоях керна до 42%.

На протяжении кампании графитации в торцевых зонах керна плотности тока в заготовках электродов на 1,2–3,4% выше, чем во внутренней зоне керна, а удельные потери больше на 1,5–7,8%.

Температурные поля в заготовках электродов при графитации переменным и постоянным током при изменении средних температур керна от 20 до 1000°C практически идентичны. Наибольшие различия в температурных полях заготовок отмечаются в интервале средних температур керна от 2000 до 3000°C . Добавочные потери, обусловленные поверхностными эффектами от токов в шинах БШП, способствуют выравниванию температур в объеме заготовок электродов и снижению перепадов температур на 7–11% по сравнению с графитацией постоянным током. В интервале средних температур керна от 1000 до 2000°C эти факторы также имеют место, но они менее выражены.

Существенное снижение перепадов температур в заготовках электродов достигается при повторно-кратковременном режиме ввода мощности, особенно при графитации переменным током. Таким образом, графитация переменным током позволяет повысить темп ввода мощности во время кампании по сравнению с графитацией постоянным током, но требует дополнительных затрат электроэнергии на компенсацию реактивной мощности (установленная мощность трансформаторов устройства поперечной компенсации достигает 18–20 МВ·А).

Поэтому, целесообразно применять специальный способ ввода мощности графитации: на первом этапе разогрева при температурах керна до 1000°C – на постоянном токе, на втором этапе разогрева в интервале средних температур керна от 2000 до 3000°C – на переменном токе, на завершающей фазе кампании – на постоянном токе. Это позволит на 70–75% уменьшить расход электроэнергии на компенсацию реактивной мощности во время кампании графитации и на 4,2–4,5% снизить расход электроэнергии на тонну готовой продукции.

Выводы. Предложены сопряженные пространственные модели, отображающие особенности электромагнитных, электротепловых и тепломассообменных процессов в печной петле и печи графитации, учитывающие особенности конструкции печи графитации, ее керна, боковых шинных пакетов печной петли и температурные зависимости электрофизических и теплофи-

зических свойств материалов печи, керна, заготовок электродов, шинных пакетов и охлаждающей среды.

Разработана методика численной реализации 3D модели сопряженных электромагнитных, электротепловых и тепломассообменных процессов в структуре средств ComsolMultiphysics с использованием варьирования плотности распределения конечных элементов в пространстве расчетной области, которое обеспечивает вычислительную эффективность и требуемую точность моделирования. Для суммарного тока БШП и тока графитации относительная невязка составляет для модулей их амплитуд 0,24%, для фаз этих токов – 0,07%. Относительные погрешности расчетов падений напряжений на БШП и мощности графитации не превышают 0,9 и 1,03% при сравнении с данными регистрации электрических режимов во время различных кампаний графитации переменного тока.

Установлено, что на этапе разогрева переменным током локальная удельная мощность тепловыделения в торцевых областях заготовок при средних температурах керна от 2000 до 3000°C увеличивается до 2,5 раз по сравнению с постоянным током, обуславливая снижение перепадов температур на 7–11% и повышение качества готовой продукции.

Предложен способ трехэтапного ввода мощности, с чередованием питания от источников постоянного и переменного тока, который сохраняет преимущества нагрева на переменном токе и позволяет снизить затраты электроэнергии на компенсацию реактивной мощности на 70–75% и на 4,2–4,5% уменьшить расход электроэнергии на тонну готовой продукции.

Список литературы / References

1. Кузнецов Д.М. Процесс графитации углеродных материалов. Современные методы исследования / Кузнецов Д.М., Фокин В.П. – Новочеркасск: ЮРГТУ, 2001. – 132 с.
2. Kuznetsov, D.M. and Fokin, V.P. (2001), *Protsess grafitatsyi uglerodnykh materialov. Sovremennye metody issledovaniya* [The Process of Graphitization of Carbon Materials. Modern Methods of Investigation], JuRGTU, Novocherkassk.
3. Кузнецов Д.М. Графитация крупногабаритных электродов. Процесс Ачесона / Кузнецов Д.М. – Ростов на Дону: РГАСХМ ГОУ, 2003. – 168 с.
4. Kuznetsov, D.M. (2003), *Grafitatsiya krupnogabaritnykh elektrodov. Protsess Achenzona* [Graphitization of the Large Electrodes. Acheson Process], RGASHM GOU, Rostov na Donu, Russia.
5. Лыков А.В. Тепломассообмен / Лыков А.В. – М.: Энергия, 1998. – 480 с.
6. Lykov, A.V. (1998), *Teplomassoobmen* [Heat and Mass Transfer], Energiya, Moscow, Russia.
7. Дрешпак Н.С. Результаты анализа режимов индукционного нагрева разъемных деталей машин / Н.С. Дрешпак // Научный вестник НГУ – 2012. – №4. – С.108–113.
8. Dreshpak, N.S. (2012), “Results of analysis of induction of heating modes of machine parts with detachable connection”, *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, no.4, pp. 108–113.

5. Коржик М.В. Дослідження бічного шунта печі графітації / М.В. Коржик, Г.І. Гурчик // *Восточно-европейский журнал передовых технологий* – 2012. – №3/5 (57). – С. 39–43.

Korzhyk, M.V. and Gurchyk, A.I. (2012), “Investigation of side shunt of graphitization kiln”, *Vostochno-Evropeyskiy Zhurnal Peredovykh Tekhnologiy*, no.3/5 (57), pp. 39–43.

6. Ярымбаш Д.С. Идентификация электрических параметров печной петли мощных печей графитации / Д.С. Ярымбаш // „Электротехника и электромеханика“. – 2012. – №1. – С. 49–54.

Yarymbash, D.S. (2012), “The identification of the circuit furnace electrical parameters of the power graphitization furnaces”, *Elektrotehnika i Elektromekhanika*, Kharkov, no.1, pp. 49–54.

Мета. Дослідження режимів, 3D моделювання та розрахунки методом скінчених елементів спряжених електромагнітних, електротеплових і тепломасообмінних процесів графітації, розподілу щільності струмів і питомих потужностей нагріву при графітації змінним і постійним струмом, що враховують особливості конструкції печей графітації, керна й шинних пакетів, температурні залежності електрофізичних, теплофізичних і масообмінних властивостей.

Методика. Чисельне моделювання спряжених просторових електромагнітних і температурних полів при графітації заготовок електродів у печах Ачесона методами скінчених елементів (МСЕ), теорії електромагнітних полів, тепломасопереносу.

Результати. Представлені теоретичні дослідження та моделювання електромагнітних і термоелектричних процесів на основі чисельної реалізації методом скінчених елементів узагальної 3D моделі графітації постійним і змінним струмом, що відображає особливості електромагнітних, електротеплових і тепломасообмінних процесів у печі графітації, її керна та бічних шинних пакетах пічної петлі. Дослідженнями встановлено, що при графітації змінним струмом через поверхневі ефекти в керна й зовнішні поверхневі ефекти від бічних шинних пакетів досягається зростання питомої потужності в торцевих областях заготовок. Це дозволяє вирівнювати розподіл температур у заготовках електродів, знизити перепади температур, забезпечити більш високий рівень якості готової продукції в порівнянні з графітацією постійним струмом.

Наукова новизна. Визначені характер і закономірності розподілу щільності струмів і питомих електричних втрат у керна та заготовках електродів, що графітуються на постійному та змінному струмі, а також їх кількісні відмінності в основній зоні та в торцевих зонах керна.

Практична значимість. Обґрунтований триетапний режим введення потужності графітації за критерієм середньої температури керна: перший етап – розігрів постійним струмом до середньої температури керна 1000°C, другий етап – розігрів змінним струмом від температури 1000 до 3000°C, третій етап – завершальна фаза графітації постійним струмом. Це дозволить зменшити витрати електроенергії на компенсацію реактивної потужності під час кампанії графітації на 70–75% та ви-

трати електроенергії на тонну готової продукції на 4,2–4,5%. Розроблені технологічні підходи та режими можуть застосовуватись на підприємствах гірничо-металургійного комплексу та суміжних галузей.

Ключові слова: 3D моделювання, процес графітації, електромагнітні та температурні поля, метод скінчених елементів, витрати електроенергії, якість електродної продукції

Purpose. The investigation of regimes, 3D modeling and finite element method calculation of conjugate electromagnetic, electrothermal, heat and mass transfer processes of graphitization, the distribution of current density and power heating density at AC and DC graphitization, which are taken into account the constructions of graphitization furnace, core and packages of electric buses, the temperature dependence of electro, thermal and mass transfer properties.

Methodology. Numerical modeling of the conjugate three-dimensional electromagnetic and heat fields in the Acheson graphitization furnaces and electrode blanks by finite element method (FEM), the theory of electromagnetic fields, heat and mass transfer.

Findings. The theoretical research and modeling of electromagnetic and thermoelectric processes by numerical finite element method realization of the generalized three-dimensional models of DC and AC graphitization are proposed. The features of electromagnetic, electrothermal and heat-mass transfer processes in the graphitization furnace, core, and side bus packages of furnace loops are taken into account. It was established by researches that the increase of AC graphitization specific capacity in the end areas of blanks are achieved by surface effect in the core and of external surface effect of the side bus packages. It will allow to align the temperature distribution in the electrode blanks, to decrease the temperature differences, and to provide the higher level of electrode quality as compared with DC graphitization.

Originality. The character and laws of the distribution of current density and specific electrical losses in the core and electrode blanks during DC and AC graphitization, and their quantitative differences in the main and end areas of the core are determined.

Practical value. The three-step mode of the graphitization power input by the core temperature criteria is substantiated. The first phase is the DC until mean core temperature 1000°C, the second phase is the AC heating from temperature 1000 to 3000°C, the third phase is the ending phase of DC graphitization. This will reduce electricity consumption on the reactive power compensation on 70–75% during the campaign graphitization and energy consumption per ton of finished product on 4,2–4,5%. The developed technological approaches and regimes can be used in mining and metals production sector and related industries.

Keywords: 3D modeling, graphitization, electromagnetic and temperature fields, finite element method, electricity consumption, electrode quality

Рекомендовано до публікації докт. техн. наук І.А. Орловським. Дата надходження рукопису 14.04.14.