

А. Я. Карвацький¹
 С. В. Лелека¹
 А. Ю. Педченко¹
 Т. В. Лазарєв¹

ВПЛИВ ВМІСТУ ВОЛОГИ В ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЙНОМУ МАТЕРІАЛІ НА ТЕПЛОВИЙ СТАН ПЕЧІ КАСТНЕРА

¹Національний технічний університет України
 «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

На підставі числового аналізу виконано дослідження впливу вологовмісту теплоізоляційної шихти на тепловий стан печі Кастнера у процесі графітування великогабаритних електродних заготовок. Встановлено, що суттєве збільшення вологості теплоізоляційного матеріалу печі за високих температур нагрівання може призвести до утворення тріщин у заготовках через інтенсивне виділення з них оксидів сірки.

Ключові слова: піч графітування Кастнера, графітові електроди, сипкий вуглецевий матеріал, вологовміст.

Вступ

Постійне світове зростання обсягів випуску електросталі вимагає підвищення потужностей дугових сталеливарних печей, які зі свого боку потребують використання якісних графітових електродів великих розмірів [1]. Виготовлення та використання саме великогабаритної графітової продукції пояснюється тим, що збільшення діаметра електродів дає змогу зменшити питомі витрати як електроенергії, так і електродів на тонну виготовленої сталі [2], [3].

Графітування електродних заготовок у промисловості здійснюється переважно в електричних печах опору, що працюють за методом Кастнера (прямого нагрівання) або Ачесона (непрямого нагрівання). Для графітування електродів великих діаметрів (600 мм і більше) за основними техніко-економічними показниками найефективнішим є використання печей прямого нагрівання [1].

Найважливішими факторами, що безпосередньо впливають на якість готової електродної продукції є рівень досягнутих температур у вуглецевих заготовках та швидкість їх нагрівання впродовж процесу графітування. Найсуттєвіше ці фактори залежать від властивостей теплоізоляційного матеріалу [4]. В промислових масштабах вологовміст теплоізоляційного матеріалу є складноконтрольованим параметром, а тому проведення досліджень, спрямованих на визначення впливу вологовмісту на тепловий стан печі Кастнера, є актуальною задачею.

Метою роботи є числове дослідження впливу вмісту води у теплоізоляційному вуглецевому матеріалі на теплоелектричний стан печі Кастнера у процесі графітування великогабаритної електродної продукції.

Математична модель процесу прямого графітування електродних виробів

Математична модель печі графітування Кастнера базується на системі нелінійних диференціальних рівнянь теплоелектропровідності та може бути подана у такому вигляді:

$$\begin{cases} \frac{\partial H}{\partial \tau} = \nabla \cdot [\lambda_{\text{eff}}(p, T) \nabla T(X)] + \chi(p, T) |\nabla U(X)|^2 + q_{V, \text{chem}} + q_{V, \text{devapor}}; \\ \nabla \cdot [\chi(p, T) \nabla U(X)] = 0, \end{cases} \quad (1)$$

де $H = \int_{T_{\text{ref}}}^T c_p^{\text{eff}}(T) \rho(T) dT$ — повна об'ємна ентальпія, що враховує теплоту випаровування або конденсацію води у матеріалі, або теплоту сублимації вуглецевмісних матеріалів печі, Дж/м³;

$$\tau \text{ — час, с; } c_p^{\text{eff}}(T) = \begin{cases} c_{p-0}^*(T), & T < T_{\text{eqL}}; \\ \frac{c_{p-0}^*(T_{\text{eqL}}) + c_{p+0}(T_{\text{eqR}})}{2} + \frac{L_{fm}}{\Delta T}, & T_{\text{eqL}} \leq T \leq T_{\text{eqR}}; \\ c_{p+0}(T), & T > T_{\text{eqR}} \end{cases} \text{ — ефективна масова}$$

ізобарна теплоємність, що враховує теплоємність води та теплоту її випаровування в матеріалах зі вмістом вологи, а у графітових матеріалах — теплоту сублімації графіту за високих температур, Дж/(кг·К); $T_{\text{eqL}} = T_{\text{eq}} - \Delta T/2$; $T_{\text{eqR}} = T_{\text{eq}} + \Delta T/2$; T_{eq} — рівноважна температура випаровування, або сублімації (фазового переходу першого роду) або хімічної реакції, К; ΔT — температурний інтервал згладжування [5], К; c_{p-0}^* — масова теплоємність матеріалу з урахуванням вмісту вологи в ньому,

$$\text{Дж/(кг·К); } L_{fm} = \begin{cases} \alpha_\theta L_{f\theta} - \text{під час випаровування вологи;} \\ (1 - \alpha_\theta) L_{fc} - \text{під час випаровування графіту} \end{cases} \text{ — масова теплота під час фазових}$$

переходів першого роду, Дж/кг; α_θ — масова частка води у вологому матеріалі; $L_{f\theta}$, L_{fc} — масова теплота фазового переходу під час випаровування води та сублімації графіту, відповідно, Дж/кг; ρ — густина матеріалу, кг/м³; ∇ — оператор Гамільтона, м⁻¹; $q_{V,\text{chem}}$ — густина внутрішнього джерела теплоти, пов'язана з хімічними реакціями газифікації вуглецевого матеріалу печі, конверсії водню й оксидів вуглецю [6], Вт/м³; $X(x, y, z) \in R^3$ — Декартова система координат, м; $q_{V,\text{de vapor}}$ — густина внутрішнього джерела теплоти, що враховує тепломасоперенесення водяної пари та її конденсацію, Вт/м³.

Згідно з [7] ентальпія, в якій враховується вміст вологи у теплоізоляційному матеріалі та теплота сублімації вуглецевмісних матеріалів печі Кастнера з урахуванням вищенаведеної залежності $c_p^{\text{eff}}(T)$, визначається за допомогою виразу

$$H = \int_0^{T_{\text{eqL}}} c_{p-0}^*(T) \rho_{-0}^*(T) dT + \frac{[c_{p-0}^*(T_{\text{eqL}}) \rho_{-0}^*(T_{\text{eqL}}) + c_{p+0}(T_{\text{eqR}}) \rho_{+0}(T_{\text{eqR}})]}{2} \Delta T + \\ + L_{fv} + \int_{T_{\text{eqR}}}^{T > T_{\text{eqR}}} c_{p+0}(T) \rho_{+0}(T) dT, \quad (2)$$

де c_{p-0}^* , ρ_{-0}^* і c_{p+0} , ρ_{+0} — властивості матеріалів по обидві сторони від температури фазового переходу (з урахуванням вмісту вологи в них), відповідно; ρ_θ , ρ_z — густина води та графіту, відповідно, кг/м³; $L_{fv} = \begin{cases} \alpha_\theta \rho_\theta L_{f\theta} - \text{під час випаровування вологи;} \\ (1 - \alpha_\theta) \rho_z L_{fc} - \text{під час сублімації графіту} \end{cases}$ — об'ємна теплота фазового переходу першого роду, Дж/м³.

Коефіцієнт ефективної теплопровідності матеріалів з урахуванням вмісту вологи визначається залежністю

$$\lambda_{\text{eff}}(p, T) = \begin{cases} \lambda_{-0}(p, T), & T < T_{\text{eqL}}; \\ \lambda_{-0}(p, T_{\text{eqL}}) + \frac{\lambda_{+0}(p, T_{\text{eqR}}) - \lambda_{-0}(p, T_{\text{eqL}})}{\Delta T} T, & T_{\text{eqL}} \leq T \leq T_{\text{eqR}}; \\ \lambda_{+0}(p, T), & T > T_{\text{eqR}}, \end{cases} \quad (3)$$

де λ_{-0} і λ_{+0} — теплопровідність матеріалу по обидві сторони від температури фазового переходу, відповідно, Вт/(м·К); p — тиск, Па.

Густина внутрішнього джерела теплоти, що пов'язана з хімічними реакціями газифікації вуглецевого матеріалу, описується співвідношенням

$$q_{V\text{chem}} = \frac{Q_{r,g} m_{g,\text{vapor}}}{V_{\text{gasific}} \tau_{\text{gasific}}}, \quad (4)$$

де $Q_{r,g}$ — тепловий ефект від хімічних реакцій газифікації, Дж/кг; $m_{g,\text{vapor}}$ — маса водяної пари, що вступила в реакцію газифікації, кг; V_{gasific} — об'єм зони газифікації вуглецевого матеріалу, м³; τ_{gasific} — тривалість процесу газифікації, с.

Густина внутрішнього джерела теплоти, що враховує масоперенесення водяної пари та її конденсацію, визначається залежністю

$$q_{V,\text{devapor}} = \frac{m_{\text{vapor}} L_{fg} \xi_{\text{evac.p}}}{V_{\text{cond}} \tau_{\text{cond}}}, \quad (5)$$

де m_{vapor} — маса вологи, що випарувалася, кг; $\xi_{\text{evac.g}}$ — коефіцієнт, що враховує евакуацію пари у навколишнє середовище; V_{cond} — об'єм зони конденсації пари, м³; τ_{cond} — тривалість процесу конденсації, с.

Початкові умови за $\tau = 0$:

$$\begin{cases} T = 0; \\ U = 0, \end{cases} \quad (6)$$

де U — напруга, В.

Граничні умови за $\tau > 0$:

– на торцях струмопідводів печі

$$j_n(\tau)|_{\text{shunt}} = \mathbf{n} \cdot (-\chi(p, T) \nabla U) \simeq U|_{\text{shunt}} = U(\tau), \quad (7)$$

де j — густина електричного струму, А/м²; \mathbf{n} — вектор зовнішньої нормалі до поверхні струмопідводу; χ — електропровідність матеріалу, См;

– на зовнішніх поверхнях печі, що межують із навколишнім середовищем

$$\begin{cases} \mathbf{n} \cdot (-\lambda(p, T) \nabla T) = \alpha_{\text{eff}}(T)(T - T_{\text{env}}); \\ \mathbf{n} \cdot \nabla U = 0, \end{cases} \quad (8)$$

де α_{eff} — ефективний коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²·К); T_{env} — абсолютна температура навколишнього середовища, К;

– умови теплоелектричного контакту між елементами конструкції печі

$$\begin{cases} \{T\} = \mathbf{n} \cdot (r_\lambda \mathbf{q}); \\ \{\mathbf{n} \cdot \mathbf{q}\} = 0; \\ \{U\} = \mathbf{n} \cdot (r_e \mathbf{j}); \\ \{\mathbf{n} \cdot \mathbf{j}\} = 0, \end{cases} \quad (9)$$

де r_e — контактний електричний опір, Ом·м; r_λ — контактний термічний опір, (м²·К)/Вт; \mathbf{q} — вектор густини теплового потоку, Вт/м²; \mathbf{j} — вектор густини електричного потоку, А/м².

Методика числового розв'язання теплоелектричної задачі

Основним джерелом нагрівання печі Кастнера є джоулева теплота, що виділяється під час проходження електричного струму крізь вуглецеві заготовки. Другим за значенням джерелом теплоти є теплота хімічних реакцій конверсії водню й оксидів вуглецю в теплоізоляційному матеріалі. У відповідності до (1) величина виділеної джоулевої теплоти залежить від квадрата напруженості електричного поля ($E = -\nabla U$, В/м) й електропровідності матеріалів, яка, зі свого боку, залежить від температури та тиску. Згідно з експериментальними даними та отриманою на їх підставі дво-параметричною залежністю електропровідності $\chi(T, p)$ вуглецевих сипких матеріалів [6] встановлено, що у межах зміни температури та тиску в сипких вуглецевих матеріалах печі Кастнера елек-

тропровідність вуглецевих матеріалів залежить набагато сильніше від температури, ніж від тиску. Тому для визначення електропровідності тиск у сипкому шарі можна брати як гідростатичний.

Для числового розв'язання нелінійної задачі (1)—(9) використовувався метод скінченних елементів [8]. Поставлена задача розв'язувалася ітераційно з використанням лінеаризації за методом Ньютона [9], [10].

Дискретизація розрахункової області виконувалася з використанням лінійних тетраедричних і шестигранних елементів. Для розв'язання теплоелектричної задачі застосовувалося програмне забезпечення авторської розробки [10], [11], яке пройшло тестування на точних числових розв'язках. Параметри розрахункової сітки (кількість скінченних елементів, вузлів) визначалися методом подвійного перерахунку [9].

Результати числового моделювання

Числові дослідження проводилися для схеми завантаження печі графітування в одну колону, яка складалася з 7 заготовок. Розміри заготовок мали такі значення $\text{Ø}635 \times 2810$ мм. Як теплоізоляційний матеріал використовувався оборотний коксовий дріб'язок фракції $(-6+1)$ мм. Процес підведення електричної енергії до печі Кастнера складав 12 год.

Зіставлення результатів числового аналізу протягом процесу графітування теплового стану печі Кастнера, у якій використовувався теплоізоляційний матеріал з вмістом вологи 9 % і 29 %, показано на рис. 1—3.

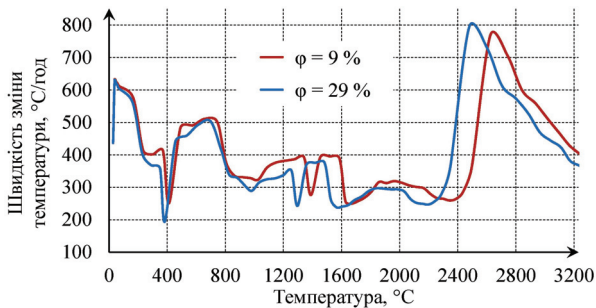


Рис. 1. Швидкість зміни середньомасової температури електродних заготовок залежно від досягнутого в них рівня середньої масової температури

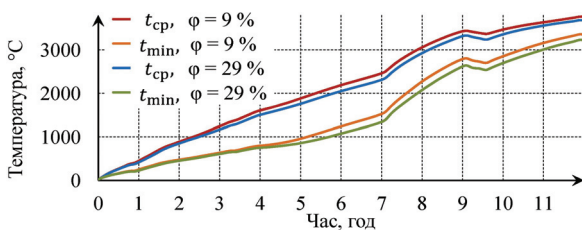


Рис. 2. Середні масові (t_{cp}) та мінімально досягнуті (t_{min}) значення температури в електродних заготовках

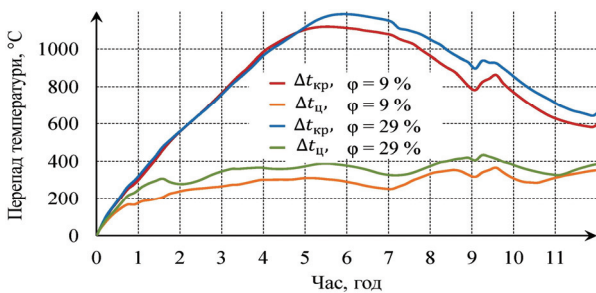


Рис. 3. Перепад температури у крайній ($\Delta t_{кр}$) та центральних ($\Delta t_{ц}$) електродних заготовках

З'ясовано, що за відносної вологості теплоізоляційного матеріалу 9 % інтенсивне зростання температури розпочинається після досягнення рівня середньомасової температури 2400°C (див. рис. 1), що гарантує закінчення процесу видалення гетероатомів з усього об'єму заготовок за винятком торцевих частин крайніх заготовок у колоні. Використання теплоізоляційного матеріалу з вмістом вологи 29 % призводить до зміщення початку інтенсивного зростання температури в бік нижчих середньомасових температур — 2250°C . Відповідно, значна кількість заготовок має рівень температур нижчий за 2100°C , тобто нижче верхнього рівня інтервалу видалення атомів сірки з об'єму заготовок [12], що може викликати інтенсивне газовиділення, та, відповідно, утворення тріщин та брак готової продукції.

Також встановлено, що збільшення вмісту вологи в теплоізоляції з 9 % до 29 % приводить до незначного зниження кінцевої мінімальної та середньомасової температури заготовок (див. рис. 2) і значного збільшення значення перепаду температур у заготовках — на 100°C (див. рис. 3).

Таким чином, у разі використання теплоізоляційного матеріалу печі з різним вмістом вологи доцільно на кінцевому етапі нагрівання електродної продукції коригувати графік підведення потужності в піч за значенням розрахованої середньомасової температури в електродних заготовках задля запобігання утворення браку продукції або перевитрати електроенергії.

Висновки

Для дослідження впливу вологовмісту теплоізоляційної шихти на тепловий стан печі графітування Костнера використано числову модель теплоелектричного стану печі, в якій враховуються теплові ефекти хімічних реакцій газифікації вуглецевого матеріалу, механізм перенесення вологи та водяної пари, конверсія водню й оксидів вуглецю в теплоізоляційному матеріалі. В результаті аналізу результатів числових експериментів встановлено, що нестабільність вологості теплоізоляційного матеріалу печі потребує коригування графіка підведення електричної енергії в піч з метою запобігання механічного руйнування заготовок внаслідок високої швидкості їх нагрівання в небезпечному діапазоні температур, що характеризується інтенсивним виділення оксидів сірки, або перевитрати електроенергії.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Ye. Panov and A. Pedchenko, "Reasonable application analysis of Casnter graphitization furnaces according to the demands of modern market", *Technology audit and production reserves*, vol. 4, no. 118, p. 57, 2014.
- [2] Д. Маслов, *Разработка алгоритмов и систем управления дугowymi сталеплавильными печами, снижающих поломки электродов*", НИУ: МЭИ, 2014.
- [3] J. Borlée, *Monitoring system for controlling and reducing the electrode consumption in DC EAF plants. Luxembourg: Office for Official Publ. of the European Communities*, 2009.
- [4] V. Vedin and V. Pirogov, "Improving thermal insulation for graphitization furnaces", *Refractories and Industrial Ceramics*, vol. 49, no. 6, p. 416-417, 2008.
- [5] R. Arutjunjan, "Integral Equations of the Stefan Problem and Their Application in Modeling of Thawing Soil", *Science and Education of the Bauman MSTU*, vol. 15, no. 10, 2014.
- [6] C. Higman and M. Van der Burgt, *Gasification*. Burlington: Elsevier Science, 2011.
- [7] А. Карвацкий, И. Шилович, и С. Кутузов, "Расчетное обоснование внедрения технологического процесса прямой точной графитации на ОАО «Укрграфит»", *Вісник НТУУ «КПІ». Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження*, Т. 1, № 1, С. 42-46, 2008.
- [8] О. Зенкевич, *Метод конечных элементов в технике*. Москва, Россия: Мир, 1975, 543 с.
- [9] Н. Калиткин, *Численные методы*, 2-е изд. Санкт-Петербург, Россия: БХВ-Петербург, 2011, 586 с.
- [10] А. Карвацкий, та А. Педченко, "Розв'язання нелінійної нестационарної задачі тепло-електропровідності методом скінченних елементів", *Вісник ПДТУ. Серія: Технічні науки*, Вип. 32, С. 205-214, 2016.
- [11] O. Urazlina, V. Churilin, E. Panov, G. Vasilchenko and A. Karvatskii, "Efficiency Analysis of the Use of Highly Graphitized Bottom Blocks in 156–160 kA Aluminum Electrolyzers", *Refractories and Industrial Ceramics*, vol. 46, no. 2, p. 93-97, 2005.
- [12] D. Kuznetsov, "Shrinkage phenomena in graphitization of preforms in Castner furnaces", *Refractories and Industrial Ceramics*, vol. 41, no. 8, pp. 279-282, 2000.

Рекомендована кафедрою теплоенергетики ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 17.10.2017

Карвацький Антон Янович — д-р техн. наук, професор, професор кафедри хімічного полімерного та силікатного машинобудування;

Лелека Сергій Володимирович — канд. техн. наук, науковий співробітник НДЦ «Ресурсозберігаючі технології»;

Педченко Анатолій Юрійович — канд. техн. наук, молодший науковий співробітник НДЦ «Ресурсозберігаючі технології», e-mail: anatolek@ukr.net;

Лазарєв Тарас Валерійович — канд. техн. наук, науковий співробітник НДЦ «Ресурсозберігаючі технології». Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ

A. Ya. Karvatskii¹
S. V. Leleka¹
A. Yu. Pedchenko¹
T. V. Lazarev¹

The Influence of Moisture content in Thermal Insulating Material on the Thermal State of Castner Furnace

¹Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute

Constant world growth of electric steel production volumes leads to increase of capacities of arc furnaces, which require the usage of high quality graphite electrodes of large sizes. The production and usage of large-scale graphite products is

explained by the fact that a diameter increase of the melting electrodes allows to reduce the specific costs of both electricity and electrodes number during the manufactured electrostatic furnace. For graphitization of electrodes of large diameters (600 mm and more), according to the basic technical and economic indicators, it is the most efficient and appropriate to use direct-heating furnaces, which operate using Castner method. The most important factors that mainly affect the quality of finished electrode products are the level of achieved temperatures in carbon blanks and speed of their heating during the graphitization process. What is important, these factors depend on the properties of the selected heat-insulating materials and mainly on its moisture content. In order to study the effect of moisture content in the heat-insulating material on the thermal state of the Castner furnace, a numerical model of the heat-electric state of the graphite furnace was used, which takes into account the thermal effects of the chemical reactions of carbonation gasification, the mechanism of transfer of moisture and water vapor, the conversion of hydrogen and carbon monoxide into a heat-insulating material. On the basis of numerical analysis, the influence of the moisture content of the heat-insulating material on the thermal state of the Castner furnace in the process of graphitization of large-scale electrode billets was investigated. As a result of the analysis of the results of numerical experiments, it has been established that instability of the moisture content of the heat-insulating materials in the furnace requires adjustment the schedule for electric energy introduction into the furnace in order to prevent the mechanical destruction of the blanks due to high speed of their heating in a dangerous temperature range characterized by intense sulfur oxide separation or electricity overrun.

Keywords: Castner's graphitization furnace, graphite electrodes, bulk carbon material, moisture content.

Karvatskii Anton Ya. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Professor of the Chair of Chemical, Silica and Polymer Engineering;

Leleka Serhii V. — Cand. Sc. (Eng.), Researcher of Research Center "Resource-Saving Technologies"

Pedchenko Anatolii Yu. — Cand. Sc. (Eng.), Junior Researcher of Research Center "Resource-Saving Technologies", e-mail: anatolek@ukr.net;

Lazariiev Taras V. — Cand. Sc. (Eng.), Researcher of Research Center "Resource-Saving Technologies"

А. Я. Карвацкий¹

С. В. Лелека¹

А. Ю. Педченко¹

Т. В. Лазарев¹

Влияние содержания влаги в теплоизоляционном материале на тепловое состояние печи Кастнера

¹Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

На основании численного анализа выполнено исследование влияния влагосодержания теплоизоляционной шихты на тепловое состояние печи Кастнера в процессе графитирования крупногабаритных электродных заготовок. Установлено, что существенное увеличение влажности теплоизоляционного материала печи при высоких температурах нагрева может привести к образованию трещин в заготовках из-за интенсивного выделения из них оксидов серы.

Ключевые слова: печь графитирования Кастнера, графитовые электроды, сыпучий углеродный материал, влагосодержание.

Карвацкий Антон Янович — д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры химического полимерного и силикатного машиностроения;

Лелека Сергей Владимирович — канд. техн. наук, научный сотрудник НИЦ «Ресурсосберегающие технологии»;

Педченко Анатолий Юрьевич — канд. техн. наук, младший научный сотрудник НИЦ «Ресурсосберегающие технологии», e-mail: anatolek@ukr.net;

Лазарев Тарас Валерьевич — канд. техн. наук, научный сотрудник НИЦ «Ресурсосберегающие технологии»