

УДК 62-418:[621.365.32:621.3.036.61]-026.661-032.3

КАРВАЦЬКИЙ А. Я., МІКУЛЬОНОК І. О.*, ЛЕЛЕКА С. В., ВИТВИЦЬКИЙ В. М.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ТЕОРЕТИКО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЕЛЕКТРОКОНТАКТНИХ ПРОКЛАДОК ДЛЯ ГРАФІТУВАННЯ ЕЛЕКТРОДНИХ ЗАГОТОВОК У ПЕЧАХ ПРЯМОГО НАГРІВАННЯ

У статті наведено результати теоретико-експериментальних досліджень електричних властивостей електроконтактних прокладок, призначених для їх розміщення по торцях електродних заготовок перед їх графітуванням у печах прямого нагрівання (печах Кастнера). Проведено дослідження питомого контактного електричного опору «графіт–прокладка–графіт», за результатами якого отримано двопараметричну залежність від тиску й температури, яка потрібна для виконання розрахунків теплоелектричного стану печі Кастнера з метою розробки раціональних регламентів графітування. При цьому між електродними заготовками в керні (сукупності послідовно складених для графітування електродних заготовок з електроконтактними прокладками між ними) можна використовувати формулювання контактної теплоелектричної задачі без врахування фізичних розмірів електроконтактних прокладок. Також сформульовано математичну постановку оберненої коефіцієнтної задачі електропровідності, розроблено числову методику й алгоритм розв'язання задачі та проведено з використанням експериментальних даних теоретичні дослідження питомого електричного опору матеріалу прокладок з терморозширеного графіту за різних значень температури й тиску.

Ключові слова: піч Кастнера, заготовки електродів, графітування, електроконтактна прокладка, електропровідність, контактний електричний опір.

DOI: 10.20535/2617-9741.1.2023.276444

*Corresponding author: i.mikulionok@kpi.ua

Received 15 July 2022; Accepted 22 September 2022

Постановка проблеми. Графітування вуглецевих матеріалів є заключним етапом багатостадійного процесу виготовлення електродів, які широко застосовуються в металургії та хімічній промисловості.

У процесі графітування, яке здебільшого відбувається в найбільш ефективних печах Кастнера (печах прямого нагрівання), електроди набувають потрібні фізико-механічні та електричні властивості [1].

Піч Кастнера є електричною піччю опору, в якій електродні заготовки нагріваються в результаті проходження крізь них електричного струму [2]. Електродні заготовки послідовно розміщують у печі Кастнера між двома струмопідводами, відокремлюючи одну від одної електроконтактними прокладками (ЕКП), які призначені для забезпечення надійного електричного контакту електродних заготовок між собою за умов високих значень температури й тиску [3]. Послідовно розміщені в печі електродні заготовки разом з розташованими між ними ЕКП утворюють так званий «керн» (або «колону»), формування якого є найбільш відповідальною підготовчою операцією технології графітування, при цьому роль електроконтактних прокладок у забезпеченні енергетичної ефективності печі має вирішальне значення [3, 4].

Аналіз попередніх досліджень. Працю [3] присвячено обґрунтуванню вибору матеріалу для виготовлення ЕКП, призначених для їх розміщення на торцях електродних заготовок перед їх графітуванням у печах прямого нагріву Кастнера. Як матеріал прокладок пропонується використовувати терморозширений графіт (ТРГ), при цьому ЕКП кріплять до торців електродних заготовок за допомогою декструну або алюмосилікатного клею з додаванням порошку графіту. Розглянуто два способи формування ЕКП, перший з яких полягає у вирізанні їх із заготовленого листа ТРГ заданої щільності, а другий – у безвідходному пресуванні прокладок із сипучого ТРГ низької щільності до заданої значення щільності матеріалу прокладок. Розроблено ескізний проект форми для пресування ЕКП та виконано числовий аналіз напружено-

деформованого стану конструкції, який підтвердив можливість її використання в промислових умовах.

У працях [1, 5] розроблено установку для вимірювання питомого електричного контактного опору контактних пар різних матеріалів залежно від тиску стиснення і температури. Отримані експериментальні дані з питомого контактного електричного опору (ПКЕО) «мідь–графіт» та «графіт–прокладка–графіт» залежно від тиску й температури, виконано порівняння результатів з відомими літературними даними.

Невирішеною частиною наукової проблеми є отримання двопараметричних залежностей електричних властивостей ЕКП у діапазоні робочих значень температури й тиску, які використовуються під час графітування електродних заготовок у печах Кастнера.

Метою статті є теоретико-експериментальні дослідження питомого контактного електричного опору «графіт–прокладка–графіт» та питомого електричного опору ТРГ, що потрібні для виконання числового аналізу теплоелектричного стану печей Кастнера для розробки енергоефективних регламентів їх експлуатації.

Виклад основного матеріалу. Тепловий режим нагрівання електродних заготовок, зокрема градієнти температур у радіальному й повздовжньому напрямках, впливає на якість готової продукції. При цьому зазначений тепловий режим залежить від величини ПКЕО електроконтактних прокладок, які розташовані між електродними заготовками в колонах печі Кастнера [1, 5].

Величина ПКЕО залежать від таких параметрів як дійсна площа контакту прокладки з електродною заготовкою, шорсткість контактних поверхонь, зусилля стиснення та температура [1, 5]. При цьому фактична площа контакту складає незначну частку повної площі прокладок та визначається шорсткістю (наявністю мікроступів і западин, що чергуються між собою) контактних поверхонь прокладок та електродних заготовок (рис. 1).

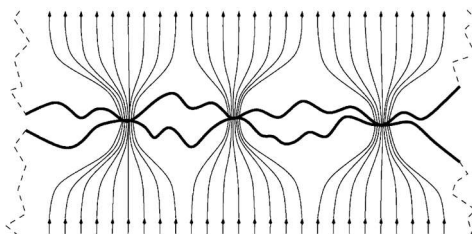


Рис. 1 – Характер ліній течії електричного струму на границях контакту шорстких контактних поверхонь прокладки та електродної заготовки [1, 5]

Відсутність суцільного контакту ЕКП та електродної заготовки по всій торцевій поверхні прокладки спотворює картину ліній течії електричного струму від певної прокладки до електродної заготовки (або навпаки). Утворені плями контакту, загальна площа яких мала порівняно з видимою поверхнею контакту, рівномірно розподіляються по поверхні контакту, а відстань між ними значно перевищує висоту мікронерівностей [1, 5]. Під час наближення до поверхні контакту лінії електричного струму стягуються в точки фактичного контакту. Таким чином, дискретний характер контакту твердих тіл є головною причиною високого електричного опору між контактними поверхнями. При цьому ПКЕО можна розглядати як поверхневий ефект, який залежить від електричних і механічних властивостей контактуючих тіл і властивостей навколишнього середовища.

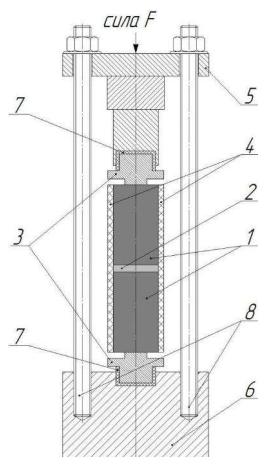
Для визначення ПКЕО між твердими тілами, що перебувають у контакті, широкого поширення отримали експериментальні методи [1, 5]. Для дослідження контактного електричного опору «заготовка–ТРГ–заготовка» або «графіт–прокладка–графіт» залежно від температури та прикладеного тиску використано спеціальну експериментальну установку (рис. 2).

Для виключення впливу контактних пар «мідь–графіт» (див. рис. 2) і зменшення похибки вимірювань використано метод двох зразків, згідно з яким за однакових умов також виконуються дослідження на суцільному графітовому зразку (без прокладки з ТРГ) (рис. 3).

Значення величини ПКЕО (γ , Ом·м²) в обох випадках визначається за формулою [1, 5]

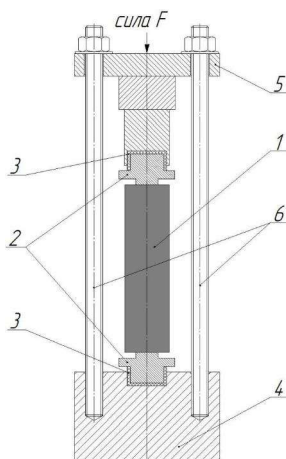
$$\gamma = \frac{U}{I} S, \quad (1)$$

де U – падіння електричного потенціалу між мідними струмопідводами, В; I – сила струму, А; S – повна площа контакту «мідь–графіт» або «графіт–прокладка», м².



1 – графітові зразки $\varnothing 30 \times 40$ мм; 2 – зона контакту (ЕКП – терморозширений графіт);
3 – мідні струмопідводи; 4 – електричний нагрівник; 5 – притискна пластина;
6 – опора; 7 – ізоляційні прокладки; 8 – напрямні шпильки

Рис. 2 – Установа для визначення СКЕО «графіт–прокладка–графіт» [1, 5]



1 – графітовий зразок $\varnothing 30 \times 80$ мм; 2 – мідні струмопідводи;
3 – ізоляційні прокладки; 4 – опора; 5 – притискна пластина;
6 – напрямні шпильки

Рис. 3 – Установа для визначення контактної електричної опору пари «мідь–графіт» [1, 5]

Істинне значення СКЕО «графіт–прокладка–графіт» визначається за формулою

$$\gamma = \gamma_1 - \gamma_2, \quad (2)$$

де γ_1 – величина СКЕО, виміряна на зразку з ТРГ (див. рис. 2), Ом·м²; γ_2 – величина СКЕО, виміряна на зразку без ТРГ (див. рис. 3), Ом·м².

Похибка вимірювання СКЕО оцінюється в межах 4–5 % в інтервалах температур до 250 °С і тиску до 1,75 МПа [1, 5].

Дослідження СКЕО «графіт–прокладка–графіт» виконувалося в інтервалі температур до 250 °С за різних значень тиску до величини 1,75 МПа. Результати цих досліджень у вигляді двопараметричної залежності від тиску й температури для ЕКП з вихідною густиною 1000 кг/м³ наведено на рис. 4 і визначаються формулою

$$\gamma(t, p) = (2.088 - 0.213p + 0.0335p^2) \exp(-0.0016t), \quad (3)$$

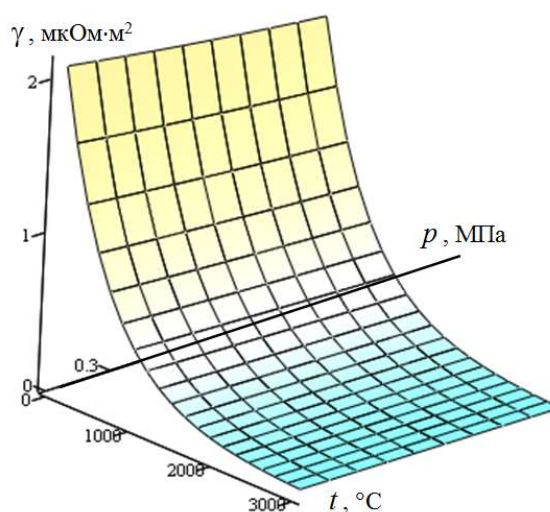
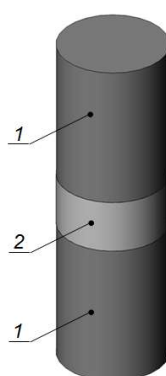


Рис. 4 – Двопараметрична залежність ПКЕО «графіт–прокладка–графіт» від тиску й температури з вихідною густиною 1000 кг/м³

Залежність (3) потрібна для виконання розрахунків теплоелектричного стану печей Кастнера для розробки раціональних регламентів графітування. При цьому між заготовками в колонах печі можна використовувати формулювання контактної теплоелектричної задачі, не задаючи фізичних розмірів електроконтактних прокладок.

Відомо, що в разі експериментального визначення питомого електричного опору (ПЕО) електропровідних матеріалів значну похибку в значення вимірюваної величини вносить контактний опір між експериментальним зразком та електродами для підведення електричного струму. Одним із способів уникнення зазначеної похибки є використання теоретико-експериментального підходу на базі розв'язання оберненої коефіцієнтної задачі [6, 7], в якій враховується питомий контактний електричний опір. При цьому для мінімізації обсягів експериментальних досліджень для визначення ПЕО ТРГ за допомогою розв'язання оберненої коефіцієнтної задачі електропровідності (ОКЗЕ) можна скористатися експериментальними даними, отриманими для визначення ПКЕО «графіт–прокладка–графіт».

Геометрична модель для математичного формулювання ОКЗЕ представляє собою частину вимірювальної комірки установки для дослідження ПКЕО (див. рис. 2) і наведена на рис. 5. Контактний електричний опір, що виникає між зразками 1 і 2 (див. рис. 5), є відомою величиною, яка визначається за методикою, наведеною вище.



1 – циліндричні зразки з графіту з відомим значенням ПЕО; 2 – циліндричний зразок з ТРГ з невідомим значенням ПЕО

Рис. 5 – Геометрична модель дослідної комірки для розв'язання ОКЗЕ

Відповідно до ізотермічних умов проведення експериментів і запропонованої геометричної моделі математична постановка ОКЗЕ базується на лінійному рівнянні електропровідності

$$\nabla \cdot (\chi_i \nabla U) = 0, \quad i=1,2, \quad (4)$$

де ∇ – оператор Гамільтона, m^{-1} ; $\chi = 1/\rho$ – коефіцієнт електропровідності, См; $i = 1,2$ – індекс матеріалу згідно рис. 5; ρ – питомий електричний опір, Ом·м; U – електричний потенціал, В; (\cdot) – оператор скалярного добутку.

Граничні умови (ГУ) для (4) включають (див. рис. 5):

- на нижньому торці нижнього графітового зразка задається нульовий електричний потенціал

$$U|_{z=0} = 0, \quad (5)$$

де Z – вертикальна (повздовжня) вісь, м;

- на верхньому торці верхнього графітового зразка задається додатній електричний потенціал

$$U|_{z=h} = U_E, \quad (6)$$

де h – висота системи з трьох зразків, м; E – індекс, що відповідає фізичному експерименту;

- на бічних поверхнях системи зразків задаються умови відсутності проходження електричного струму

$$\mathbf{n} \cdot \nabla U = 0, \quad (7)$$

де \mathbf{n} – вектор зовнішньої нормалі до поверхні тіла;

- на двох границях контакту «графіт–прокладка» задаються розривні умови електричного контакту

$$\begin{cases} \{U\} = \mathbf{n} \cdot (\gamma \mathbf{j}); \\ \{\mathbf{n} \cdot \mathbf{j}\} = 0, \end{cases} \quad (8)$$

де γ – питомий контактний електричний опір, Ом·м²; $\mathbf{j} = -\chi_i \nabla U$, $i=1,2$ – вектор густини електричного струму, А/м².

Для замикання системи рівнянь ОКЗЕ (4)–(8) потрібно додати умову для визначення невідомого коефіцієнта χ_2

$$\mathbf{j}_E = -\chi_i \nabla U, \quad i=1,2, \quad (9)$$

де E – індекс, який вказує на те, що величину отримано в результаті проведення фізичного експерименту.

Система рівнянь (4)–(9) є повним математичним формулюванням ОКЗЕ згідно із заданою геометрією дослідної комірки (див. рис. 5) і умов проведення фізичного експерименту. При цьому наявність граничної умови (7) вказує на те, що поле електричного потенціалу є одновимірним і залежить тільки від повздовжньої осі Z . Тому в подальшому методику числового розв’язання ОКЗЕ розглядатимемо в наближенні одновимірної задачі.

Для числового розв’язання ОКЗЕ використано метод послідовної мінімізації нев’язки [6, 7], який базується на градієнтному методі. Цей метод передбачає екстремальне формулювання задачі й базується на функціоналі нев’язки у вигляді

$$F_j(\chi_2) = \frac{1}{2} [j_E - j_M(\chi_2)], \quad (10)$$

де j – модуль вектора густини електричного струму, А/м²; M – індекс, що відповідає модельним даним, які описуються залежностями (4)–(8).

Для отримання виразу для ітераційного знаходження коефіцієнту ОКЗЕ за градієнтним методом послідовної мінімізації нев’язки скористаємося розкладанням функції $\chi_2(j)$ в ряд Тейлора в околі експериментальних значень j_E до першого порядку малості

$$\chi_2(j_E) = \chi_2(j_M) + \frac{d\chi_2(j_M)}{dj_M}(j_E - j_M). \quad (11)$$

Метод послідовної мінімізації неув'язки передбачає багаторазове розв'язання прямої задачі (4)–(6), (8) для кожного експериментального значення j_E , яке залежить від температури й тиску під час проведення експерименту. Тому для числової реалізації цього методу скористаємося добре апробованим методом скінченних різниць [8]. Оскільки задача спрощується до одновимірної і є кусково-лінійною, то для її дискретизації використаємо мінімальну кількість вузлів – по три на зразок з подвійними вузлами в місцях контактної взаємодії (рис. 6).

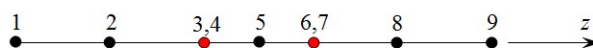


Рис. 6 – Схема дискретизації розрахункової області ОКЗЕ: 3,4 і 6,7 – подвійні вузли

Застосовуючи неявну різницеву схему на триточковому шаблоні з врахуванням граничних умов (8) отримуємо систему дискретних тридіагональних рівнянь вигляду:

– для $i = 2, 5, 8$ (див. рис. 6)

$$\frac{2\chi_k}{z_{i+1} - z_{i-1}} \left(\frac{U_{i+1} - U_i}{z_{i+1} - z_i} - \frac{U_i - U_{i-1}}{z_i - z_{i-1}} \right) = 0 \quad \text{для } i = 2, 8 - k = 1, \quad (12)$$

а для $i = 5 - k = 2$;

– для $i = 3, 6$

$$\frac{2}{z_i - z_{i-1}} \left(\frac{U_{i+1} - U_i}{\gamma} - \frac{\chi_k(U_i - U_{i-1})}{z_i - z_{i-1}} \right) = 0 \quad \text{для } i = 3 - k = 1, \quad (13)$$

а для $i = 6 - k = 2$;

– для $i = 4, 7$

$$\frac{2}{z_{i+1} - z_i} \left(\frac{\chi_k(U_{i+1} - U_i)}{z_{i+1} - z_i} - \frac{U_i - U_{i-1}}{\gamma} \right) = 0 \quad \text{для } i = 4 - k = 2, \quad (14)$$

а для $i = 7 - k = 1$.

Після приєднання до (12) ГУ (5) і (6) отримуємо систему лінійних алгебричних рівнянь (СЛАР), яку можна розв'язувати або методом прогонки, або методом Гауса [8, 9].

У результаті розв'язання СЛАР (12)–(14) з ГУ (5), (6) отримуємо поле значень електричного потенціалу, за яким визначаються модельні значення густини електричного струму у вузлах з номерами $i = 2, 5, 8$

$$j_{Mi} = \chi_k \frac{U_{i+1} - U_{i-1}}{z_{i+1} - z_{i-1}} \quad \text{для } i = 2, 8 - k = 1, \text{ а для } i = 5 - k = 2. \quad (15)$$

Після заміни похідних на скінченні різниці в (11) отримуємо вираз для уточнення коефіцієнта електропровідності/ПЕО ТРГ

$$\chi_2^{l+1} = \chi_2^l + \frac{\chi_2^l - \chi_2^{l-1}}{j_M^l - j_M^{l-1}} (j_E - j_M^l), \quad (16)$$

де l – номер ітерації під час визначення коефіцієнта електропровідності.

Критерієм закінчення ітерацій на кожному з експериментальних значень температури й тиску є виконання умови (10) у вигляді

$$|j_E - j_M^l| \leq \delta_j, \quad (17)$$

де δ_j – абсолютна похибка визначення модельного значення густини електричного струму, А/м².

Алгоритм розв'язання ОКЗЕ методом послідовної мінімізації неув'язки є таким. За відомих з фізичного експерименту значень температури й тиску задаються значення коефіцієнтів χ_1 і γ , густина електричного струму й падіння електричного струму на торцях дослідної комірки та початкове значення шуканого коефіцієнта електропровідності ТРГ χ_2 . Для кожного фізичного експерименту з певними значеннями температури й тиску виконується цикл ітерацій з мінімізації неув'язки, в якому спочатку розв'язується пряма задача (12)–(14), згодом виконується деяке припущення значення коефіцієнта і знову розв'язується пряма задача за нового значення коефіцієнта χ_2 . Далі розраховується нове значення коефіцієнта χ_2 за (16), розв'язується пряма задача (12)–(14) і здійснюється перевірка збіжності за (17). Цикл продовжується до виконання умов нерівності (17). Далі відбувається перехід на нові дані фізичного експерименту з іншими значеннями температури й тиску, коефіцієнтів χ_1 і γ , сили струму та різниці потенціалів, і цикл визначення коефіцієнта χ_2 повторюється.

Для числової реалізації наведеної числової методики та алгоритму розв'язання ОКЗЕ застосовано програмне середовище Mathcad [10].

Приклад кусково-лінійного розподілу електричного потенціалу по висоті вимірювальної комірки за даними розв'язання ОКЗЕ наведено на рис. 7.

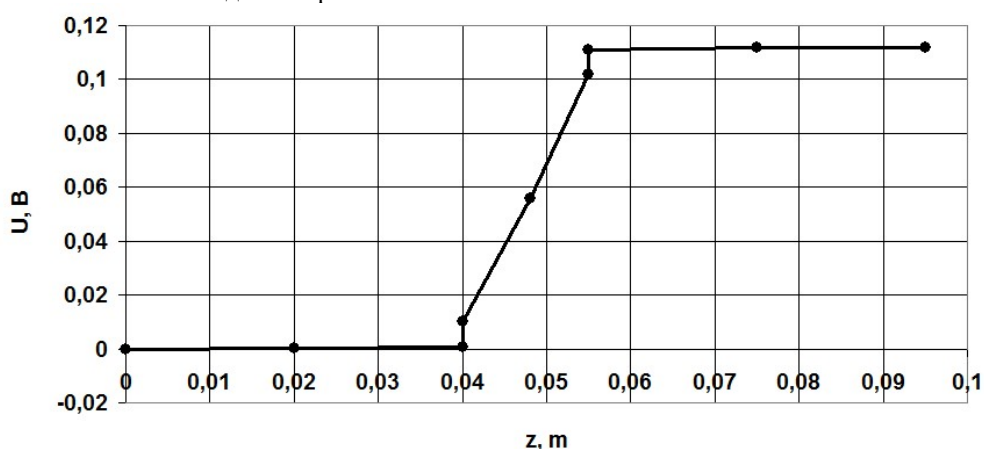


Рис. 7 – Кусково-лінійний розподіл електричного потенціалу у вимірювальній комірці (див. рис. 5) за даними розв'язання ОКЗЕ

Дослідження ПЕО ТРГ (матеріалу ЕКП) з вихідною густиною 1000 кг/м^3 виконувалися в інтервалі температур до $250 \text{ }^\circ\text{C}$ за різного тиску в діапазоні до $1,75 \text{ МПа}$. Похибка виизначення ПЕО так само як і ПКЕО оцінюється в межах $4\text{--}5 \%$ у вказаних інтервалах зміни температури й тиску. Результати цих досліджень у вигляді двопараметричної залежності від тиску й температури з екстраполяцією до $3000 \text{ }^\circ\text{C}$ представлено формулою (18) і наведено на рис. 8.

$$\gamma(t, p) = (45.92 - 21,263 p + 4.343 p^2) \exp(-0.0016 t). \quad (18)$$

Отримана залежність ПЕО ТРГ (матеріалу ЕКП) також як і ПКЕО «графіт–прокладка–графіт» потрібна для виконання розрахунків теплоелектричного стану печей Кастнера з метою розробки раціональних регламентів графітування.

Висновки. Виконано дослідження ПКЕО «графіт–прокладка–графіт», за результатами якого отримано двопараметричну залежність від тиску й температури. Отримана залежність ПКЕО потрібна для виконання числового аналізу теплоелектричного стану печей Кастнера з метою розробки раціональних регламентів графітування. При цьому між заготовками в колонах печі можна використовувати формулювання контактної теплоелектричної задачі без врахування фізичних розмірів електроконтактних прокладок.

Сформульовано математичну постановку оберненої коефіцієнтної задачі електропровідності, розроблено числову методику і алгоритм її розв'язання та проведено дослідження питомого електричного опору матеріалу прокладок з терморозширеного графіту за різних значень температури й тиску.

Проведено дослідження ПЕО терморозширеного графіту, за результатами якого отримано двопараметричну залежність від тиску й температури. Отримана залежність ПЕО терморозширеного графіту (матеріалу ЕКП), також як і ПКЕО «графіт–прокладка–графіт», потрібна для виконання числового аналізу теплоелектричного стану печей Кастнера з метою розробки раціональних регламентів графітування.

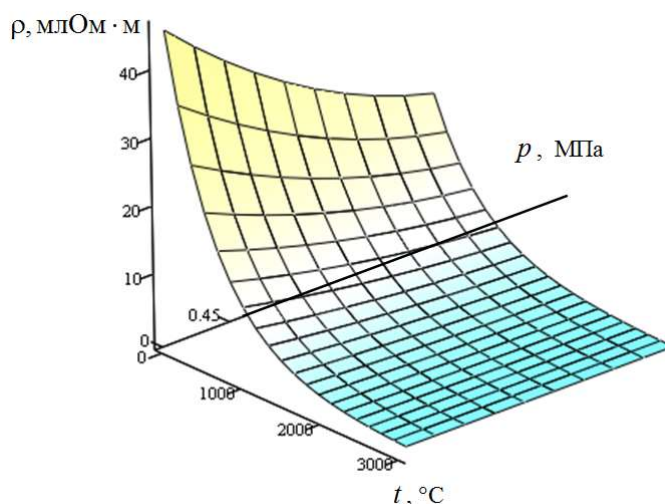


Рис. 8 – Графік двопараметричної залежності ПЕО терморозширеного графіту від тиску й температури з вихідною густиною 1000 кг/м³

Перспективи подальших досліджень. Планується використати отримані двопараметричні залежності ПКЕО «графіт–прокладка–графіт» і ПЕО матеріалу ЕКП від температури й тиску для теоретичного прогнозування енергоефективних регламентів графітування електродних заготовок у печах Кастнера.

Список використаної літератури

1. Теоретично-експериментальні дослідження печей графітування Кастнера / А. Ю. Педченко, Є. М. Панов, А. Я. Карвацький, С. В. Лелека, Т. В. Лазарев. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. 174 с. URL: <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/20800>
2. Кузнецов Д. М., Коробов В. К. Сравнение свойств электродов, графитированных методами Ачесона и Кастнера // Огнеупоры и техническая керамика. 2001. № 10. С. 16–20.
3. Technology of Electrocontact Gaskets for Graphitizing Electrode Blanks in Direct Heating Furnaces / Ye. M. Panov, A. Ya. Karvatskii, S. V. Leleka, I. O. Mikulionok, O. I. Ivanenko // Petroleum and Coal, 2022. No 64(2). P. 299–303. URL: https://www.vurup.sk/wp-content/uploads/2022/07/PC-X_Karvatskii_144_rev1.pdf
4. Соседов В. П., Чалых Е. Ф. Графитация углеродистых материалов. Москва : Металлургия, 1987. 176 с.
5. Исследование электрического контактного сопротивления графита с медью и терморасширенным графитом / А. Я. Карвацкий, С. В. Лелека, И. В. Пулинец, Т. В. Лазарев, А. Ю. Педченко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2014. № 5/5 (71). С. 45–49. DOI: 10.15587/1729-4061.2014.27989
6. Никитенко Н. И. Сопряженные и обратные задачи тепломассопереноса. Київ : Наукова думка, 1988. 240 с.
7. Відновлення теплофізичних властивостей сипких матеріалів за допомогою розв’язання зворотної задачі теплопровідності / А. Я. Карвацький, Г. М. Васильченко, Т. В. Чирка, К. М. Короленко // Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки. 2017. Т. 251, № 4. С. 159–166. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vchnu_tekh_2017_4_30
8. Карвацький А. Я. Моделювання енергозберігаючих регламентів промислового обладнання. Київ : НТУУ «КПІ», 2014. 234 с. URL: <https://intellect.kpi.ua/profile/kay1/publications>
9. Карвацький А. Я., Педченко А. Ю. Розв’язання нелінійних нестационарних задач теплопровідності з використанням Cad-систем // Математичне та комп’ютерне моделювання. Серія : Фізико-математичні науки. 2016. Вип. 13. С. 67–77. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Mtkm_fiz_mat_2016_13_8
10. Mathcad: Math software for your engineering calculations. URL: <https://www.mathcad.com/en> (дата звернення: 15.02.2020)

Anton Karvatskii, Igor Mikulionok, Serhii Leleka, Victor Vytvytskyi

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL STUDIES OF THE ELECTRICAL PROPERTIES OF ELECTRICAL CONTACT GASKET FOR THE GRAPHITIZING OF ELECTRODE PREPARATIONS IN DIRECT HEATING FURNACES

The article presents the results of theoretical and experimental studies of specific contact electrical resistance (SCER) and specific electrical resistance (SER) of electrical contact gaskets (ECG) made of thermally expanded graphite (TEG) and intended for their placement on the ends of electrode blanks before their graphitization in direct heating furnaces – furnaces Castner's. The obtained data of SCER “graphite–gasket–graphite” and SER (or electrical conductivity) of the ECG material are needed to minimize the energy consumption of the graphitization process using numerical modeling of the thermoelectric state of Castner's furnaces in order to develop energy-efficient regulations for their operation.

The method of two samples was used for the experimental determination of the SCER, and the theoretical-experimental approach was used for the study of the SER, which makes it possible to exclude the influence of the contact resistance between the experimental sample and the electrodes for supplying the electric current on the value of the measured quantity and is based on the solution of the inverse coefficient problem of electrical conductivity (ICPE) using experimental data obtained during the SCER study.

A mathematical formulation of the ICPE was formulated, a numerical method and an algorithm for its solution were developed, and a study of the SER of the TEG at different values of temperature and pressure was carried out.

Determination of SCER and SER was carried out for ECG material with an initial density of 1000 kg/m³ in the temperature range up to 250 °C under different pressures in the range of up to 1.75 MPa. The results of these studies are presented in the form of two-parameter dependences on pressure and temperature with extrapolation up to 3000 °C. The measurement error of SCER and SER by the specified methods is estimated to be within 4–5% in the intervals of temperature change up to 250 °C and pressure up to 1.75 MPa.

The obtained SCER and SER dependences for the ECG material are needed to perform a numerical analysis of the thermoelectric state of Castner's furnaces in order to develop rational graphitization regulations.

Keywords: Castner's furnace, blanks, graphitization, electrical contact gasket, electrical conductivity, contact electrical resistance.

References

1. Pedchenko, A. Yu., Panov, Ye. M., Karvatskii, A. Ya., Leleka, S. V., Lazarev, T. V. (2017). Teoretychno-eksperymentalni doslidzhennia pechei grafituvannia Kastnera [Theoretical and experimental studies of Castner graphitization furnaces]. Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv. – URL: <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/20800> (Ukr.)
2. Kuznetsov, D. M., Korobov, V. K. (2001). Sravneniye svoystv elektrodov, grafitirovannykh metodami Achesona i Kastnera [Comparison of the properties of electrodes graphitized by the Acheson and Castner methods]. *Ogneupory i techbicheskaya keramika*, no 10, pp. 16–20. (Rus.)
3. Panov, Ye. M., Karvatskii, A. Ya., Leleka, S. V., Mikulionok, I. O., Ivanenko, O. I. (2022). Technology of Electrocontact Gaskets for Graphitizing Electrode Blanks in Direct Heating Furnaces. *Petroleum and Coal.*, vol. 64, no 2, pp. 299–303. – URL: https://www.vurup.sk/wp-content/uploads/2022/07/PC-X_Karvatskii_144_rev1.pdf
4. Sosedov, V. P., Chalykh, Ye. F. (1987). Grafitatsiya uglerodistykh materialov [Graphitization of carbon materials]. Metallurgiya, Moscow, USSR. (Rus.)
5. Karvatskii, A. Ya., Leleka, S. V., Pulnits, I. V., Lazarev, T. V., Pedchenko, A. Yu. (2014). Issledovaniye elektricheskogo kontaktynogo soprotivleniya grafita s medyu i termorasshirennyy grafitom [Study of electrical contact resistance of graphite with copper and thermally expanded graphite]. *Vostochno-Yevropeyskiy zhurnal perefovykh tekhnologiy*, no 5/5 (71), pp. 45–49. doi: 10.15587/1729-4061.2014.27989 (Rus.)
6. Nikitenko, N. I. (1988). Sopryazhennyye i obratnyye zadachi teplomassoperenosa [Conjugate and inverse problems of heat and mass transfer]. Naukova dumka, Kyiv. (Rus.)
7. Karvatskii, A. Ya., Vasylychenko, G. M., Chirka, T. V., Korolenko, K. M. (2017). Vidnovlrnnia teplofizychnykh vlastyivostei syplykh materialiv za dopomogoiu rozviazannia zvorotnoi zadachi teploprovodnosti [Restoration of thermophysical properties of loose materials by solving the inverse problem of thermal conductivity]. *Visnyk Khmel'nitskogo natsionalnogo uніверситету*. Seriya: Tekhnichni nauky, vol. 251, no 4, pp. 159–166. – URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vchnu_tekh_2017_4_30 (Ukr.)
8. Karvatskii, A. Ya. (2014). Modeliuvannia energosberigaiuchykh reglamentiv promyslovogo obladndnia [Modeling energy-saving regulations of industrial equipment]. NTUU “KPI”, Kyiv. – URL: <https://intellect.kpi.ua/profile/kay1/publications> (Ukr.)
9. Karvatskii, A. Ya., Pedchenko, A. Yu. (2016). Rozviazannia neliniynykh nestatsionarnykh zadach teploprovodnosti z vykorystanniam Cad-system [Solving non-linear non-stationary heat conduction problems using Cad-systems]. *Matematychna ta kompiuterne modeliuvannia. Seriya: Fiziko-matematychni nauky*, no 13m pp. 67–77. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Mtkm_fiz_mat_2016_13_8 (Ukr.)
10. Mathcad: Math software for your engineering calculations. – URL: <https://www.mathcad.com/en> (Accessed February 15, 2022)