

карбонату ніколу на структуру та розмір кінцевого нікелевого пористого матеріалу: залежність розміру часток нікелевого металічного порошку від виду солі

ніколу та концентрації її розчину; залежність типу пористої структури відновленого нікелевого матеріалу від виду осаджувача.

### Література

1. Кипарисов С.С., Либенсон Г.А. Порошковая металлургия. – М.: Металлургия, 1980. – 496 с.
2. Либенсон Г.А. Основы порошковой металлургии. – М.: Металлургия, 1987 – 208 с.
3. Кудрявцева А.А. Составление химических уравнений. – М.: Высшая школа – 320 с.
4. Вансовская К.М. Металлические покрытия, нанесенные химическим способом. – Л.: Машиностроение, 1985 – 103 с.

*Досліджено вплив товщини бічного шунта на теплоенергетичний стан печі графітації Ачесона. Сформульовано енергетичний критерій, використання якого в системі керування дозволяє визначити оптимальну схему формування керна печі*

*Ключові слова: графітація, піч Ачесона, бічний шунт, система керування*

---

*Исследовано влияние толщины бокового шунта на теплоэнергетический состояние печи графитации Ачесона. Сформулирован энергетический критерий, использование которого в системе управления позволяет определять оптимальную схему формирования керна печи*

*Ключевые слова: графитация, печь Ачесона, боковой шунт, система управления*

---

*The influence of the side shunt thickness on Heat-Power state of Acheson graphitization kiln is investigated. Energy criterion is formulated, it's using in control system allows to define the optimal scheme of forming the kiln core.*

*Keywords: graphitization, Acheson kiln, side shunt, control system*

УДК 661.666.2

## ДОСЛІДЖЕННЯ БІЧНОГО ШУНТА ПЕЧІ ГРАФІТАЦІЇ

**М.В. Коржик**

Кандидат технічних наук, доцент\*  
Контактний тел.: (044) 236-57-97  
E-mail: korzhyk@kpi.ua

**Г.І. Гурчик**

Магістрант\*

Контактний тел.: (044) 248-04-16

\*Кафедра автоматизації хімічних виробництв  
Національний технічний університет України  
„Київський політехнічний інститут”  
пр. Перемоги, 37, м. Київ, 03056

### Вступ

У вітчизняній промисловості виробництво великогабаритної графітованої продукції здійснюється електричними печами за технологією Ачесона. Графітація – це процес утворенні кристалічної структури вуглецевого матеріалу під дією високих температур (більше 2000°C) за рахунок джоулевого тепла, яке вивільнюється при проходженні електричного струму крізь kern печі графітації. Kern печі Ачесона формується з рядів вуглецевих заготовок, керової пересипки, що заповнює міжрядовий простір, а також шунтвних областей (див. рис. 1). Для теплоізоляції kern оточено шаром шихти, питомий електричний опір (ПЕО) якої значно перевищує ПЕО матеріалів керна, що дозволяє вважати теплоізоляцію також і електричним ізолятором [1].

Спосіб графітації великогабаритної продукції за технологією Ачесона характеризується істотними перепадами температур у виробках [1], що викликають термонапруження, які є обмежуючим швидквстю розігріву керна чинником, та призводять до деякої нерівномірності властивостей кінцевої продукції. Для вирівнювання температури в перерізі керна використовують таку схему укладки, при якій частина електричного струму при графітації переспрямовується до його периферії, що досягається введенням в kern шунтвних шарів, сформованих з гранульованих вуглецевих матеріалів (див. рис. 1).

Графітація вуглецевих виробів надзвичайно енергоємна (до 7000 кВт·год на тону продукції [1]), тому зниження енерговитрат на кампанію графітації при забезпеченні високої якості кінцевої продукції є актуальною науковою та практичною задачею.

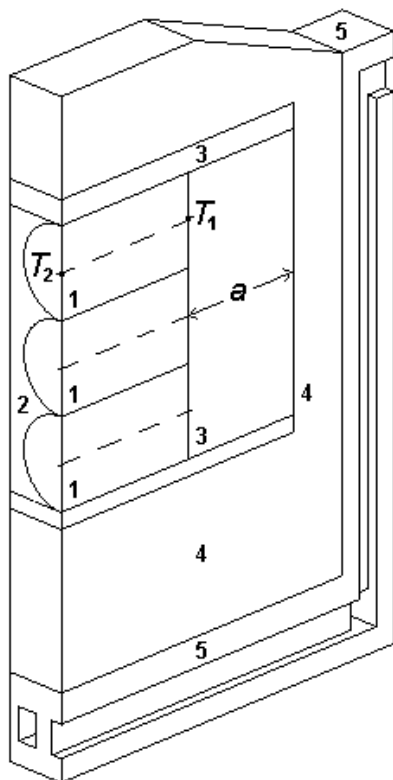


Рис. 1. Розрахунковий фрагмент печі Ачесона:  
 1 – вуглецеві заготовки; 2 – ядерна пересипка; 3 – шунтвні шари; 4 – теплоізоляційна шихта; 5 – шамотна футеровка з повітряними охолоджувальними каналами

**Постановка задачі**

Метою роботи є дослідження впливу товщини бічного шунта на теплоенергетичний стан печі графітації. Результати дослідження дозволять зменшити енерговитрати на графітацію та підвищити якість кінцевої продукції шляхом застосування бічних шунтвних шарів оптимальної товщини в схемі формування ядра печі графітації на підготовчому до кампанії етапі.

**Математична модель стану печі**

В загальному вигляді опис термоелектричного стану печі графітації базується на спряженій системі диференціальних рівнянь теорії потенціалу та теплопровідності з відповідними крайовими умовами. Система містить нестационарне нелінійне неоднорідне рівняння теплопровідності і квазістационарне рівняння безвихрового поля електричного потенціалу для кожної просторової області, що утворюють загальний об'єм печі  $\Omega$  [2].

$$c_i(T)\gamma_i \frac{\partial T}{\partial \tau} - \nabla(\lambda_i(T) \nabla T) \Big|_{\tau=0} = J_i^2 \rho_i(T), \quad (1)$$

$$J_i \Big|_{\tau=const} = -\frac{\nabla \phi_i^2}{\rho_i(T)}, \quad (2)$$

де  $i$  – індекс області, що визначена на просторових координатах  $x, y, z \in \Omega$ ;  $m$ ;  $c$  – ефективна масова ізобарна теплоємність, що враховує ефект сублімації вуглецю для відповідних просторових областей, Дж/(кг×К);  $\gamma$  – густина, кг/м<sup>3</sup>;  $\lambda$  – теплопровідність, Вт/(м·К);  $\rho$  – питомий електричний опір матеріалу просторової області, Ом·м;  $J$  – вектор густини електричного струму, А/м<sup>2</sup>;  $\phi$  – електричний потенціал, В;  $T$  – розрахункова температура, К;  $\tau$  – час, с;  $\nabla$  – диференціальний оператор Гамільтона.

Для замикання системи (1), (2) задаються початкові теплові ( $T_0$ ) і граничні теплові та електричні умови. Причому керування піччю  $U(\tau)$  розглядається, як перепад потенціалів, заданих відповідними граничними умовами на струмопідводах печі.

Початкові умови задачі:

$$T(x,y,z) \Big|_{\tau=0} = T_0, \quad (3)$$

де  $T_0$  – початкова температура печі графітації.

Граничні умови на границях контакту із зовнішнім середовищем:

$$g_j = -\lambda_j(T) \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha_j(T - T_c), \quad (4)$$

де  $j$  – індекс зовнішньої поверхні,  $\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $T_c$  – температура зовнішнього середовища;  $n$  – зовнішня нормаль до поверхні.

Граничні умови на поверхнях симетрії:

$$\frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{z=0} = 0. \quad (5)$$

Граничні умови на границях суміжних просторових областей:

$$T_k = T_{k+1}, \quad \lambda_k(T) \frac{\partial T_k}{\partial n} = -\lambda_{k+1}(T) \frac{\partial T_{k+1}}{\partial n}, \quad (6)$$

де  $k$  – індекс внутрішньої поверхні.

Граничні умови на границях суміжних електропровідних областей:

$$J_k^n = J_{k+1}^n; \quad E_k^t = E_{k+1}^t; \quad \phi_k = \phi_{k+1}, \quad (7)$$

де  $J^n$  – нормальна складова вектора густини струму  $J$ ;  $E^t$  – тангенціальна складова вектора напруженості електричного поля  $E$ , В/м, що визначається для кожної електропровідної області як:

$$E_i = -\nabla \phi_i. \quad (8)$$

Граничні умови на границях з електричним ізолятором:

$$J^n = 0. \quad (9)$$

Граничні умови, що формують керуючий вплив:

$$\phi \Big|_{x=0} = 0; \quad \phi \Big|_{x=h} = U_m(\tau), \quad (10)$$

де  $h$  – довжина, м, ділянки керна печі, до якої прикладається напруга  $U_m$ , В.

В термодинамічному сенсі випаровування вологи є фазовим переходом I-го роду, що супроводжується поглинанням теплоти. Для урахування цього явища представимо рівняння (1) для просторових областей, матеріал яких має істотний вміст вологи, в ентальпійній формі [2]:

$$\frac{dH_1(T)}{dt} - \nabla(\lambda_1(T) \nabla T) \Big|_{\tau=0} = J_1^2 \rho_1(T), \quad (11)$$

$$H_1(T) = \int_0^T c(T) \gamma(T) dT, \quad (12)$$

де  $H$  – тепловміст відповідної просторової області, Дж/м<sup>3</sup>.

### Числове дослідження процесу графітації

При моделюванні впливу товщини бічного шунта  $a$  на теплоенергетичний стан було використано результати натурального експерименту, отримані при графітації електродів діаметром 555 мм та довжиною 1900 мм у печі графітації постійного струму (у відповідності з виробничим регламентом, бічний шунт в експерименті мав товщину  $a = 0.05$  м). Для цього з  $\Omega$  було виокремлено симетричний розрахунковий фрагмент, що описує 1/112 загального об'єму та відображує основні електричні і термічні процеси всієї печі графітації (див. рис. 1), а моделювання виконано методом скінченних елементів [3].

Перевірку адекватності числового розв'язку задачі (1) – (11) здійснено шляхом порівняння результатів розрахунків з експериментальними даними. При цьому в числовій моделі використані теплофізичні властивості матеріалів завантаження печі, що відповідають експериментальним. Зокрема, для формування нижнього та бічного шунта використано матеріал кернової пересипки (сирий гранульований металургійний кокс) із середнім масовим вологовмістом  $v_2 = v_3 = 0.03$ , а вологовміст теплоізоляційної шихти прийнято  $v_4 = 0.08$ .

На отриманій числовій моделі виконано ряд імітаційних розрахунків для різних значень параметра  $a$  (останню точку:  $a = 1.05$  м розташовано біля бічної стіни печі). За критерій припинення розрахунку взято загальну витрату енергії на кампанію  $Q_k$ , кВт·год, що відповідає експериментальній.

На рис. 2 зображено динаміку температури  $T_1$  периферії заготовок верхнього ряду, яка є “найхолоднішим” місцем виробів і характеризує їх ступінь графітації [4].

Як видно з рис. 2, при використанні бічного шунта з сирого коксу кінцевий рівень температур перевищує 2300°C, що дозволяє отримати продукцію задовільної якості за будь-якого значення параметра  $a$ . При цьому в період розігріву керна температура периферії збільшується із збільшенням параметра  $a$ , що дозволяє інтенсифікувати розігрів та пришвидшити кампанію графітації в цілому.

Цей висновок підтверджує і аналіз зображеної на рис. 3 динаміки перепаду температур між центром та периферією заготовок верхнього ряду, який визначається, як:  $\Delta T = T_2 - T_1$  (див. рис. 1).

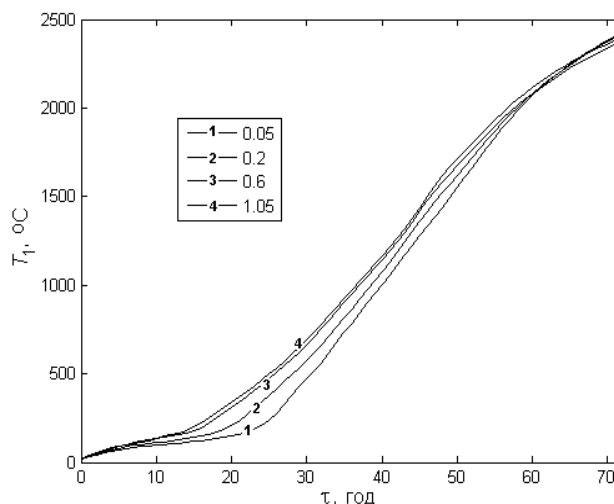


Рис. 2. Динаміка температури характеристичної точки керна печі для різних значень  $a$

Розглянемо динаміку середньої густини струму (див. рис. 4) у бічному шунті, яку можна визначити так:

$$J = \frac{1}{S} \int J dS,$$

де  $J$  – середня густина струму, А/см<sup>2</sup>;  $S$  – площа поперечного перерізу бічного шунта, см<sup>2</sup>.

Як видно з рис. 4, середня густина струму зменшується із збільшенням параметра  $a$ . Це, з урахуванням динаміки температури характеристичної точки (див. рис. 2), свідчить про нерівномірність розподілу густини струму у перерізі бічного шунта і означає, що із збільшенням параметра  $a$  частина шару шунта стає баластною і не бере участі у додатковому розігріві периферії керна.

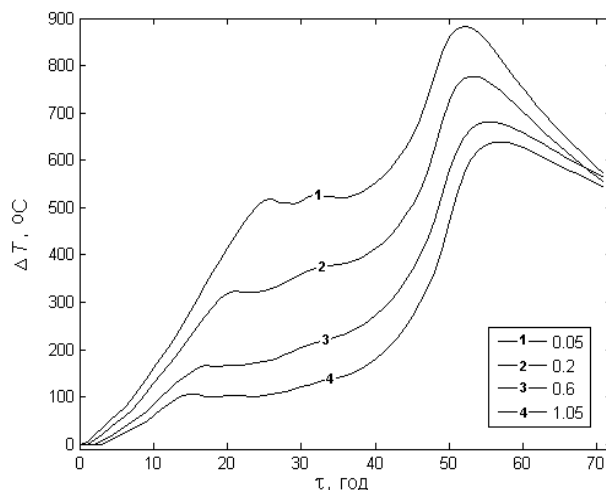


Рис. 3. Динаміка перепаду температур заготовок верхнього ряду для різних значень  $a$

Оскільки вологовміст теплоізоляційної шихти  $v_4$ , зазвичай, істотно перевищує вологовміст матеріалу шунта  $v_3$ , відносно зменшення об'єму теплоізоляції (при збільшенні  $a$ ) дозволяє зменшити енерговитрати на

випаровування вологи. При цьому втрати теплоти у оточуюче середовище бічною стіною печі будуть визначатись сумарною ефективністю теплоізоляції, утвореної матеріалом баластної частини шунта та шаром теплоізоляційної шихти.

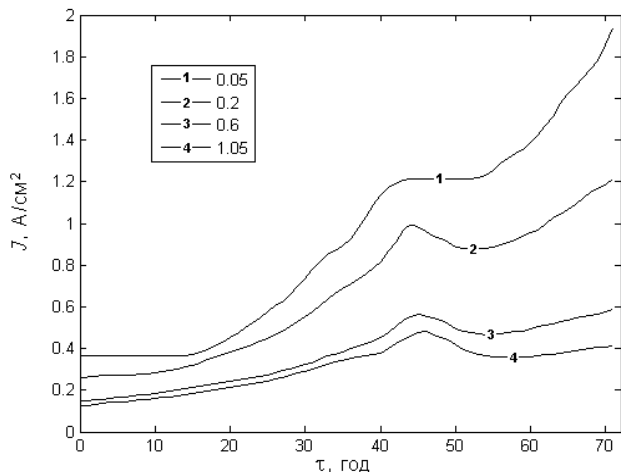


Рис. 4. Динаміка середньої густини струму бічного шунта для різних значень *a*

555 мм в умовах, що відповідають експериментальній кампанії ( $v_3 = 0.03, v_4 = 0.08$ ), оптимальна товщина бічного шунта дорівнює  $a_{opt} = 0.41$  м.

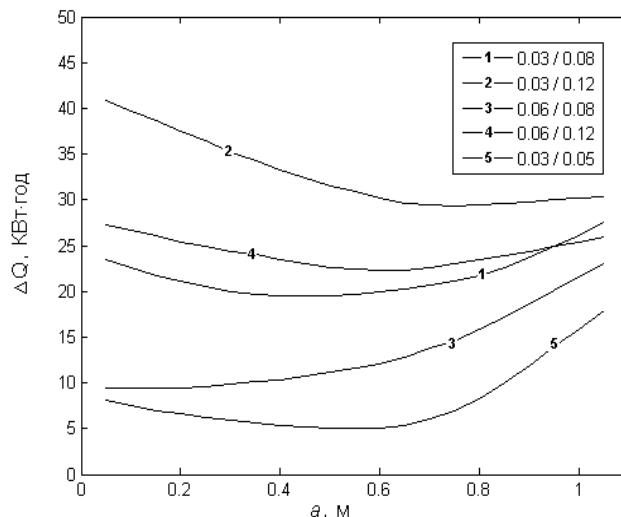


Рис. 5. Непродуктивні витрати теплоти розрахункового фрагмента печі

**Визначення оптимальної товщини бічного шунта**

За технологію Ачесона власне на графітацію виробів витрачається не більше 25 % загальних енерговитрат [1]. Для того, щоб оцінити непродуктивні витрати, пов'язані з впливом бічного шунта, сформулюємо енергетичний критерій у вигляді:

$$Q(a) = Q_b(a) + Q_c(a); \tag{13}$$

де  $Q_c$  – втрати теплоти із зовнішніх поверхонь печі в оточуюче середовище;  $Q_b$  – витрати теплоти на випаровування вологи з сипких матеріалів завантаження печі. Зазначені витрати визначаються так:

$$Q_c(a) = \int_{\tau} \sum_j g_j(a) F_j d\tau;$$

$$Q_b(a) = \sum_i V_i(a) \gamma_i L_i \frac{v_i}{1 - v_i};$$

де  $g$  – середній тепловий потік, Вт/м<sup>2</sup>, через зовнішню поверхню площею  $F$ , м<sup>2</sup>, який визначається у відповідності з (4);  $V$  – об'єм просторової області, матеріал якої має істотний вміст вологи, м<sup>3</sup>;  $\gamma$  – густина сухого матеріалу, кг/м<sup>3</sup>;  $L$  – теплота пароутворення, Дж/кг.

На рис. 5 зображено отримані на імітаційній моделі оцінки змінюваної частини цільової функції (13) для різних комбінацій середнього масового вологовмісту матеріалів шунта та теплоізоляції ( $v_3 / v_4$ ) у розрахунковому фрагменті.

Аналіз результатів показує, що у всіх випадках, коли для формування шунта використовується сухий матеріал, товщина бічного шунта може бути збільшена в порівнянні з сучасними регламентними вимогами. Зокрема при графітації електродних виробів діаметром

Відома система керування процесом графітації [5], що визначає оптимальне керування на основі поточного аналізу термом'якого стану виробів, дозволяє зменшити енерговитрати кампанії графітації на 10–12 %. Дооснащення цієї системи модулем, що мінімізує критерій (13) на основі попередніх оцінок вологості сипких матеріалів завантаження та розрахунків прогнозу енергетичного стану печі дозволить додатково зменшити енерговитрати на 1–2 % лише за рахунок застосування оптимальної схеми формування ядра.

**Висновки**

Проведені на імітаційній моделі дослідження властивостей бічного шунта печі графітації дозволили зробити такі висновки:

- збільшення товщини бічного шунта не призводить до підвищення кінцевих рівнів температур ядра, але зменшує перепад температур у виробі в період розігріву, що дозволяє інтенсифікувати процес та підвищити якість кінцевої продукції;
- у бічному шунті збільшеної товщини густина струму розподілена нерівномірно і частина об'єму шунта перестає виконувати роль елемента теплоділення (стає баластною);
- на основі аналізу властивостей бічного шунта сформульовано енергетичний критерій, мінімізація якого системою керування процесом дозволить отримати додаткове зменшення загальних енерговитрат на кампанію графітації до 2 %.

Подальша робота в області вдосконалення промислового процесу графітації буде пов'язана із дослідженням впливу верхнього та нижнього шунтвального шару на теплоенергетичний стан печі Ачесона.

Література

1. Соседов В.П. Графитация углеродистых материалов / В.П. Соседов, Е.Ф. Чалых. – М. : Металлургия, 1987. – 176 с.
2. Коржик М.В. Модель температурного поля печи графитации / М.В. Коржик, С.В. Кутузов // Наукові вісті НТУУ „КПІ”. – 2007. – № 1. – С. 17–23.
3. Коржик М.В. Керування стадією розігріву печі графитації / М.В. Коржик // Автоматизація виробничих процесів. – 2006. – № 2. – С. 69–78.
4. Коржик М.В. Вдосконалення регламенту графитації електродних виробів / М.В. Коржик, І.Л. Шилович, А.І. Жученко, О.Ю. Уразліна // Наукові вісті НТУУ „КПІ”. – 2004. – № 2. – С. 107–109.
5. Коржик М.В. Розробка системи керування процесом графитації в печах Ачесона / М.В. Коржик, Г.І. Гурчик // Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. – 2010. – № 1. – С. 98–103.

*Розглядаються питання оцінки пластичності металу і сплавів при обробці і впливу на неї різних факторів*  
**Ключові слова:** *формування, пластична деформація, потенційна енергія, швидкість деформації*

---

*Рассматриваются вопросы оценки пластичности металла и сплавов при обработке и влияния на неё различных факторов*  
**Ключевые слова:** *формообразование, пластическая деформация, потенциальная энергия, скорость деформации*

---

*The assessment questions of the metal plasticity and alloys processing and influence of different factors are considered*  
**Key words:** *morphogenesis, plastic deformation, the potential energy, the rate of deformation*

УДК 621.7

# ПЛАСТИЧЕСКОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ МЕТАЛЛА ПРИ ОБРАБОТКЕ ДАВЛЕНИЕМ

**А. А. Дудников**

Кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедрой\*

**А. И. Беловод**

Кандидат технических наук, доцент  
 Кафедра общетехнических дисциплин\*\*

**А. А. Келемеш**

Ассистент\*

**А. М. Погорецкий**

Магистрант\*

**И. В. Перелит**

Магистрант

\*Кафедра ремонта машин и технологии конструкционных материалов  
 \*\*Полтавская государственная аграрная академия  
 ул. Сковороды, 1/3, г. Полтава, 36003

## 1. Введение

Формообразование обработкой давлением основано на способности изделий из металла и сплавов изменять свою форму без разрушения под действием приложенных внешних сил. Обработка давлением является одним из прогрессивных, экономических и высокопроизводительных способов придания металлу формы. Обработкой давлением могут быть получены детали из материала, обладающего как высокой, так и

низкой пластичностью, т.е. способностью необратимо деформироваться без разрушения.

## 2. Постановка проблемы

Способность металла и сплавов при некоторых условиях силового воздействия, независимо от его происхождения, устойчиво изменять свою форму без разрушения сплошности, используется с давних времён. Несмотря на это, механизм пластической деформации из-за сложности происходящих при этом явлений