Енергозберігаючі технології

УДК [66.043.1+662.998]:621.365.32:004.942

DOI: 10.33070/etars.3.2020.02

Лелека С.В.¹, канд. техн. наук, ORCID 0000-0002-4372-9454,
Панов Є.М.¹, докт. техн. наук, проф., ORCID 0000-0002-4885-2777,
Карвацький А.Я.¹, докт. техн. наук, проф., ORCID 0000-0003-2421-4700,
Васильченко Г.М.¹, канд. техн. наук, ORCID 0000-0003-4026-8661,
Мікульонюк І.О.¹, докт. техн. наук, проф., ORCID 0000-0001-8268-7229,
Борщик С.О.¹, ORCID 0000-0003-4458-8259,
Вагін А.В.², канд. фіз.-мат. наук, ORCID 0000-0002-1234-0753
¹ Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ просп. Перемоги, 37, 03056 Київ, Україна, e-mail: anton@rst.kpi.ua
² ПрАТ «Український графіт», Запоріжжя
Північне шосе, 20, 69600 Запоріжжя, Україна, e-mail: vagin@ukrgrafit.com.ua

Розробка енергоефективних та екологічно безпечних футерівок та теплоізоляції печей електродного виробництва

Виконано числовий аналіз теплоелектричного стану печі Ачесона й запропоновано застосування нової теплоізоляції заготовок, що піддаються графітуванню. Показано доцільність застосування як теплоізоляції однокомпонентної теплоізоляційної шихти. У цьому разі порівняно з використанням традиційної багатокомпонентної синтетичної шихти спостерігається не лише зниження температури заготовок, але й суттєве вирівнювання температури по висі заготовки. На основі результатів вимірювання теплофізичних властивостей та числового моделювання температурних полів в об'ємі печі графітування Ачесона підібрано ресурсо- та енергозберігаючу екологічно ефективну вуглецеву теплоізоляційну шихту, що складається із зерен сирого та графітованого коксу у співвідношенні 50/50 % (мас.) розміром до 2 мм включно. Проведено теоретичні та експериментальні дослідження екологічного стану випалювальних та графітувальних печей. На підставі аналізу отриманих експериментальних даних встановлено температурні й часові залежності концентрації СО на випалювальних та графітувальних печах. Визначено основні джерела утворення СО: недоокиснені вуглецеві матеріали, ароматичні та смолисті речовини зв'язуючого заготовок. Розроблено комплекс заходів, що дають можливість знизити концентрацію викидів СО на пічному обладнанні у промислових умовах. Проведено експериментальне дослідження зі встановлення температурної залежності концентрації СО під час нагрівання багатокомпонентної та однокомпонентної теплоізоляційної шихти, що дало можливість знизити викиди СО більш ніж на 20 % у разі застосування запропонованої однокомпонентної шихти. *Бібл. 17, рис. 9, табл. 3.*

Ключові слова: вуглецевмісна сировина, піч графітування Ачесона, футерівка, теплоізоляція, енергетична ефективність, екологічна безпека.

Виробництво електродної продукції для застосування у металургійних та електротермічних виробництвах характеризується значною енергоємністю й потребує відповідних заходів з енергозбереження та захисту навколишнього середовища [1]. Сировиною для одержання електродних заготовок є продукти нафтової та кам'яновугільної промисловості: піролізний та крекінговий нафтовий кокс, пековий кокс, кам'яновугільні пекки та смолопеки [2, 3].

На стадії виробництва монолітної вуглеграфітової продукції кокс використовується як наповнювач, а як зв'язувальний та просочувальний матеріал — смолопеки й кам'яновугільні пекки з різною температурою розм'якшення [2–4].

Виготовлення вуглеграфітових виробів складається з низки технологічних процесів та операцій: дроблення твердої вуглевмісної сировини, прожарювання, охолодження, подрібнення, грохочення та класифікації (поділ на фракції за розміром грудок та зерен [5]), змішування зі зв'язуючим, охолодження, пресування заготовок, випалювання, графітування (за потреби), охолодження та складування готової продукції.

Після пресування й подальшого охолодження вуглеграфітові вироби піддають випалюванню — термічному обробленню спресованих виробів за температури 850–1300 °С, за якого органічне зв'язуюче переходить у кокс та скріплює частинки наповнювача. Випалювання заготовок здійснюється у печах різних конструкцій [4]. Технологія випалювання змінюється залежно від конструкції печі, проте, незважаючи на конструктивні відмінності печей випалювання, основні технологічні операції є схожими для всіх типів печей.

Послідовність технологічних операцій випалювання вуглеграфітових електродних виробів складається зі стадій підготовки та завантаження печі, випалювання заготовок, охолодження й розвантаження печі [4].

Підготовка печі до роботи полягає в очищенні та профілактичному ремонті її конструкції. Завантаження печі починається із засипання в об'єм касет камер печі шару засипки завтовшки 100 ± 25 мм. Далі заготовки встановлюються паралельно між собою, відстань між ними регулюється залежно від їхніх розмірів та схеми завантаження. Проміжки між заготовками заповнюються засипкою на 100–150 мм вище торців заготовок. Після цього камера печі закривається теплоізолювальним укриттям — склепінням печі.

Випалювання здійснюється у печах завдяки теплоті спалюваного природного газу [4, 6]. Для забезпечення цілісності, потрібної густини та міцності заготовок випалювання проводять з різ-

ними темпами зростання температури, °С/год: до 250 °С — до 2; 250–450 °С — до 1,5–2; 450–650 °С — до 4; вище 650 °С — до 5 [7, 8].

Після повного охолодження камери печі здійснюється вивантаження випалених виробів.

Заключною стадією технологічного процесу виробництва вуглеграфітових виробів є процес графітування, який полягає у високотемпературному обробленні цих матеріалів у графітувальних печах за температури 2500–3000 °С.

Графітувальна піч складається з коритоподібної основи, викладеної з шамотового вогнетриву, та двох стаціонарних торцевих стін з проміжками для укладання струмоподаючих електродних пакетів. Для розрахунку ширини печі враховують не тільки максимальну довжину заготовок (які розміщені перпендикулярно вісі печі), але й відстань між керном та боковою стінкою, яка заповнюється теплоізоляційною шихтою. Товщина цього шару залежить від теплопровідності шихти. Ефективний електричний опір печі досягається за допомогою методу завантаження керна або застосуванням відповідної пересипки.

Пересипкові шихтові матеріали розміщують між вертикальними рядами заготовок. Вони є основними тепловиділяючими елементами, від яких у результаті контактної теплопровідності та теплового випромінювання нагріваються графітовані вироби. Пересипкові матеріали перетворюють електричну енергію на теплову та у кінцевому підсумку визначають тепловий режим печі графітування. Вони є основою електричного опору печі й тому визначають електричний режим роботи агрегату живлення. Питомий електричний опір застосовуваних в електродній промисловості вуглецевих матеріалів як пересипки значною мірою залежить від їхньої температури. У зв'язку з цим дуже важливим є питання впливу електрофізичних властивостей пересипкових матеріалів [9] на формування температурного поля печі у процесі кампанії графітування, що, у свою чергу, визначає її електричні характеристики.

У практиці електродного виробництва як пересипкові матеріали використовують передусім шкаралупу кокосових горіхів.

Проведені дослідження [2] з використанням дослідних кампаній та математичного моделювання у печі графітування на основі пересипки фракційним складом до 30 мм з антрациту, сирого та графітованого коксів, коксового горішку, суміші коксового горішка з кам'яним вугіллям показали відмінний характер розподілу температури у поперечному перерізі керна печі. Було встановлено, що для пересипкових матеріалів,

що характеризуються значною залежністю питомого електричного опору (ПЕО — величина, обернено пропорційна електропровідності) від температури, на певній стадії кампанії графітування відбувається нерівномірне виділення джоулевої теплоти з високою концентрацією у центральній зоні керну й супроводжується збільшенням градієнта температури у тілі заготовок. Результати досліджень показали, що шкаралупа коксового горіху дає можливість отримати достатньо рівномірне температурне поле протягом усієї кампанії графітування.

Ефективність роботи печі графітування залежить від ефективності використання теплоти на нагрівання заготовок та втрат теплоти. Основні втрати теплоти відбуваються крізь теплоізоляцію печі.

Важливим елементом печі графітування є шар теплоізоляційної шихти навколо керна печі. Товщина теплоізоляції значною мірою визначає ефективність використання теплової енергії у печі та, у кінцевому підсумку, витрату енергії на графітування заготовок. Теплоізоляція також визначає надійність роботи вогнетривкої кладки та будівельних конструкцій печі, тобто експлуатаційні характеристики пічного обладнання. Тому велике значення мають чинники, що визначають теплову роботу цього технологічного елементу.

Основна вимога, що ставиться до теплоізоляційної шихти печі графітування, — це висока тепло- та електроізоляційна здатність, а також відсутність плавлення її компонентів за високих температур. Натеper у печах графітування як теплоізоляція використовується суміш піску, оборотного та сирого вуглецевого матеріалу й деревної тирси. Пісок плавиться за температури близько 1700 °C, тому не задовільняє одну з вимог. Суміш піску й вуглецевого матеріалу характеризується вогнетривкими властивостями, при нагріванні до 1500–1600 °C утворює SiC, який не розкладається до температури 2300 °C.

Математичне моделювання [2] показало, що у разі використання електропровідної шихти, якою є суміш коксу, піску й деревної тирси, в процесі розігрівання керна печі у теплоізоляції присутня незначна величина електричного струму, яка має тенденцію до зменшення. Це пояснюється більшим темпом падіння електричного опору керну з підвищенням температури, ніж це відбувається у теплоізоляції в результаті її прогрівання від керну печі.

Незначний вплив електропровідності на розподіл температури в печі графітування дає змогу припустити можливість заміни багатокомпо-

нентної теплоізоляційної шихти (кокс, пісок, деревна тирса) однокомпонентною шихтою (на основі коксу) з раціональним фракційним складом. Водночас виключення зі складу деревної тирси та піску може сприяти поліпшенню екологічного стану виробництва.

Мета роботи полягає у розробці на основі коксу енергоефективної екологічно чистої однокомпонентної шихти з раціональним фракційним складом для її застосування у печах електродного виробництва.

Теоретичний аналіз показників розроблених футерувальних та теплоізоляційних сипких матеріалів

Процес графітування вуглеграфітових заготовок у промисловості здійснюється в електричних печах опору. Сутність графітування полягає у високотемпературній обробці виробів за температури 2500–3000 °C у спеціальних графітувальних печах [2, 3]. Якість готової графітованої продукції визначається за рівнем температури у печі графітування та за рівномірністю властивостей. Рівномірність температурного поля у печі графітування може бути досягнута правильним вибором пересипкових та теплоізоляційних матеріалів [10–12]. Використовувана вуглецева теплоізоляційна шихта відіграє роль не тільки теплоізолятора, але й активного електричного опору. При цьому до теплоізоляційних матеріалів висувають такі вимоги: високий електричний опір, низький коефіцієнт теплопровідності та достатня пористість.

Властивості застосовуваної теплоізоляції у графітувальних печах впливають на енергетичні показники процесу графітування. Наприклад, застосування вуглецевої теплоізоляції дає можливість знизити енергоемність цього процесу на 6 % [12, 13]. Дослідження температурних полів у печах графітування Ачесона до та після внесення конструкційних змін або контролюючих параметрів при використанні експериментальних вимірювань характеризуються значними часовими та фінансовими затратами [2], яких можна уникнути, використовуючи математичне моделювання [14].

Натеper у печах графітування Ачесона використовується синтетична теплоізоляційна шихта (до 10 мм), до складу якої входить сирий, графітований коксовий дріб'язок, деревна тирса й пісок. Синтетична шихта має низький коефіцієнт теплопровідності й високий ПЕО, але потребує значних фінансових витрат на її виробництво та очищення забруднень від продуктів розкладання (монооксид вуглецю).

Авторами запропоновано однокомпонентну синтетичну теплоізоляційну шихту на основі графітованого коксу.

Для визначення раціонального співвідношення суміші сирого та графітованого коксу проведені експериментальні дослідження теплопровідності та електропровідності синтетичної та однокомпонентної шихти (з різним вмістом сирого та графітованого матеріалу) за температури до 1000 °С.

Електродні заготовки після їхнього випалу переводяться у наступний технологічний переділ — графітування. Графітування — це високотемпературна обробка випалених електродних заготовок з метою надати їм нові властивості. Якість продукції графітування визначається низьким питомим електричним опором 5–7 мкОм·м, наявністю однорідних механічних властивостей електродних заготовок, що дає можливість використовувати їх як електроди дугових електропечей [2, 3].

Графітування заготовок відбувається в електричних печах опору за температур вище 2500 °С. У печі графітування заготовки розміщують симетрично по рядах, проміжки між ними пересипаються струмопровідним сипким матеріалом (коксом). Таким чином утворюється безперервний послідовний електричний ланцюг: пересипки — заготовка — пересипки. Внутрішня закладка печі (заготовки й струмопровідна пересипка) називається керном. Для запобігання втрат теплоти та окиснення керна заготовки та кернові пересипки покриваються шаром теплоізоляції, яка являє собою насипний шар з коксового дріб'язку, піску, тирси.

Так само як й у випалювальних печах, проблема викидів монооксиду вуглецю під час роботи печей графітування має першочергове значення. На відміну від випалювальних печей, де має місце виділення летючих зі зв'язуючого (пека), джерелами утворення СО в печах графітування є тільки тверді вуглецеві матеріали: коксова пересипка й теплоізоляційна шихта, а також електродні заготовки. Детальне дослідження газових викидів у печах графітування проводилося авторами праці [15]. Згідно з да-

а

б

Рис.1. Концентрація СО у газах за кампанії графітування на печах змінного (а) та постійного (б) струму.

ними авторів зазначеної праці, газові викиди у процесі графітування є сумішшю, склад якої наведено у табл.1.

У праці [15] показано, що найбільша кількість викидів СО утворюється в разі використання коксу як теплоізоляції, тобто найбільшу хімічну активність до окиснення проявляє чистий вуглець (кокс). Зниження кількості коксу в завантажуваних матеріалах або його ізоляція від окисника може призвести до зниження утворення монооксиду вуглецю.

Пробні попередні вимірювання не показали наявності вуглеводнів та водню у відведених газах. Тому проводилися тільки цільові вимірю-

Таблиця 1. Газові викиди за кампанію графітування [15]

Вид теплоізоляції	Витрата теплоізоляції на 1 т виробів, т/т	Витрата газоповітряної суміші крізь піч, (м³/год)/т	Кількість викидів, % (ваг.)							
			загальна	H ₂	CH ₄	CO	CO ₂	O ₂	смолисті речовини	пил
Суміш	1,41	100–220	19,62	0,39	0,11	7,58	10,73	0,81	—	—
Кокс	1,95	1300–1700	100	1,82	1,22	44,2	52,47	0,26	0,01	0,06
Антрацит	2,14	500–900	90,58	4,02	2,57	18,5	64,93	0,27	0,08	0,26

Рис.2. Температура поверхні верхнього шару пересипки печей змінного (а) та постійного (б) струму.

вання концентрації СО у відхідних газах як найбільш шкідливого викиду в газовому потоці.

Експериментальні дослідження з визначення концентрації монооксиду вуглецю у газах за кампанію графітування на печах змінного струму та постійного струму мали особливості, обумовлені тим, що під час роботи печі вимірювання можна було проводити тільки дистанційно.

Результати вимірювань наведені на рис.1. Час кампанії по горизонтальній вісі вказаний у безрозмірному вигляді (по відношенню до тривалості всієї кампанії). Такий вибір зроблений для узагальнення отриманих даних для різних печей та різних кампаній.

Результати вимірювання температури відхідних газів за той самий період наведені на рис.2. На рис.3 наведені температури газового потоку, виміряні у точці відбору проб.

На рис.4 наведені результати розрахунків температури у печі постійного струму дослідженої кампанії.

Порівняння з характером приросту концентрації СО показує, що характер її росту більшою мірою відповідає характеру зростання максимальної температури надкернової пересипки (за часом інтенсивного росту та за характером зростання).

Експериментально встановлені досить високі значення концентрації СО на виході з печей графітування змінного та постійного струму.

На графіках зміни концентрації СО за час кампанії є максимуми. Вони відповідають різним моментам часу кампаній печей: для печі змінного струму пік концентрації припадає на початок кампанії (від 0,2 загальної тривалості); для печі постійного струму аналогічний максимум має місце всередині тривалості кампанії печі.

Відмінності пояснюються інтенсивністю переміщення ізотерми утворення СО з вуглецевих матеріалів та кількістю вуглецевих матеріалів, що становлять об'єм, який охоплює ізотерма утворення оксиду вуглецю. Верхньою межею

Рис.3. Температура газів на виході з печей змінного (а) та постійного (б) струму.

Рис.4. Розрахункові температури печі постійного струму. реакції утворення СО можна прийняти ізотерму 600 °С. Переміщення зазначеної границі визначатиме кількість вуглецевих матеріалів, які взяли участь у реакції окиснення.

Аналіз руху розрахункової ізотерми 600 °С для печі графітування постійного струму показав, що з часом в об'ємі з температурою нижче 600 °С залишається все менша кількість вуглецевого матеріалу, який є джерелом утворення СО; причому цей процес зменшення кількості

непрореагованого вуглевмісного матеріалу має нелінійний характер. Зазначена особливість виявляється у характері зміни концентрації СО, зафіксованому експериментально.

Таким чином, правомірно вважати, що утворений СО має температуру не нижче за 500 °С. Проходження його крізь непрогріті шари шихтових матеріалів, розбавлення присосами повітря, яке проникає під газозбірну парасольку, призводить до охолодження СО. Тому на виході з печі протягом практично всієї кампанії температура газів не перевищує 200 °С, як показали експериментальні вимірювання. Основний внесок в охолодження газів на виході вносить підсмоктування повітря з-під газозбірної парасольки, який виникає внаслідок тяги димососа.

Зниження та приріст концентрації утворення оксиду вуглецю відбувається із зростанням температури об'єму печі. Одним з можливих пояснень може бути горіння СО у верхніх шарах теплоізоляції при досягненні у них температури займання СО та наявності достатньої кількості повітря, що проходить крізь піч. Горіння оксиду вуглецю у печах графітування відзначається в літературних джерелах, де до-

Рис.5. Концентрації СО на виході з печей графітування залежно від середньої температури зерна: 1 — піч змінного струму; 2 — піч постійного струму.

сліджувалися питання утворення різних газів, у тому числі й оксиду вуглецю.

З метою ідентифікації причин утворення монооксиду вуглецю побудовані графіки зміни концентрації СО залежно від середньої температури зерна для печей змінного й постійного струму (рис.5). Можна виділити три ділянки з різною інтенсивністю приросту концентрації СО: 1-а — (до температур 300 °C) інтенсивного зростання концентрації СО; 2-а — (300–2700 °C) майже лінійного зростання СО з меншою інтенсивністю порівняно з 1-ю ділянкою; 3-а — помітного зменшення концентрації СО (після відключення печі).

Для досліджених умов утворення СО в печі графітування відбувається при взаємодії кисню повітря з твердим вуглецем (заготовки, коксова пересипка, теплоізоляція) [16, 17]. Якщо зазначена хімічна реакція проходить в умовах нестачі кисню, то

У даному випадку мова йде про утворення СО в умовах, що нагадують роботу газогенератора, тобто пристрою технічно призначеного для генерації пального газу СО.

Зазначена реакція неповного окиснення вуглецю до СО відбувається за температур 700–1100 °C. В області існування цих температур у печі графітування утворюється СО: може відбуватися доокиснення до СО₂ (згоріти) з подальшим відновленням знову до СО; вийти назовні крізь шар теплоізоляції.

Іншими словами, зона утворення СО обмежена температурами у печі вище 1100 °C. Переміщення ізотерми 1100 °C

утворює постійно зростаючий простір утворення СО. Це пояснює збільшення концентрації СО (див. рис.5), що відбувається із зростанням температури.

За наявності постійної витяжки газоподібних продуктів з печі димососом у середині печі створюється невелике розрідження, яке сприяє підсосу зовнішнього повітря в об'єм сипких вуглецевих матеріалів. Ця обставина створює умови утворення в тому числі й діоксиду вуглецю, який може при температурних режимах печі відновитися до СО:

При температурах нижче 400 °C реакція зміщена вліво (тобто СО не утворюється); при температурах вище 800 °C — вправо, тобто СО₂ повністю переходить у СО. Це ілюструється діаграмою на рис.6.

На діаграмі показані температурні області утворення й рівноважного існування СО та СО₂ під час взаємодії з твердим вуглецем (у разі печі графітування з коксом за високих температур) залежно від температури.

Таким чином, умови утворення СО в печі графітування:

- наявність кисню повітря у порожнинах між частинками теплоізоляційного шару та пересипки: це повітря знаходиться у кількості, що не може забезпечити повне окиснення вуглецю, але створює умови для утворення СО;

- повітряне дуття (внаслідок присосів повітря), яке створює умови окиснення СО та СО₂ за існуючих температур у печі графітування; дана умова аналогічна існуванню технічних умов подачі повітря крізь колосникові ґрати у пристроях, так званих газогенераторах, які спеціально призначені для утворення СО у великих кількостях.

Сучасні погляди на механізм взаємодії вуглецю з окисниками полягають у тому, що цей

Рис.6. Взаємне перетворення СО та СО₂ залежно від температури при взаємодії з твердим вуглецем.

процес проходить через стадії хемосорбції реагентів та утворення проміжних поверхневих сполук (комплексів), які потім розпадаються з виділенням продуктів реакції у газовий об'єм.

Встановлено, що взаємодія вуглецю з газами активно проходить приблизно лише на третій частині поверхні, а значна її частка (37–48 %) постійно зайнята продуктами реакції.

Розрізняють дві стадії утворення СО та СО₂: дифузійну та кінетичну. На першій стадії (дифузійній) відбувається впровадження двох молекул кисню всередину вуглецевого матеріалу. Третя молекула О₂, що надходить з газового потоку, обумовлює проходженням реакції

У кінетичній області реагування відбувається тільки на крайніх атомах кристалічної решітки вуглецю через утворення й термічне розкладання вуглець-кисневого комплексу з отриманням суміші СО та СО₂ у співвідношенні 2 : 1:

Згідно з останніми дослідженнями, внаслідок того, що газифікація відбувається у неізотермічних умовах, швидкість сумарного процесу лімітується лише хімічними перетвореннями, тобто він завжди проходить у кінетичній області.

На вихід СО₂ та СО за наведеними вище реакціями істотний вплив має швидкість руху повітря у сипкому шарі. За даними досліджень роботи газогенераторів за швидкості не вище 0,1–0,2 м/с СО встигає прореагувати з киснем дуттьового повітря й вихід його зменшується. Іншими словами, зменшення тяги димососа сприяє зниженню виходу СО.

На ступінь відновлення СО₂ до СО впливає також температура. Термодинамічні розрахунки дають значення температури, за якої відбувається істотне відновлення СО₂. Для коксу це теоретичне значення температури відновлення становить 1300 °С. При цій температурі більш 80 % СО₂ перетворюється на СО.

Спрощена схема взаємодії твердого вуглецю з киснем повітря може бути представлена таким чином:

1) доставка окисника з газової фази до поверхні вуглецевого матеріалу внаслідок молекулярної та конвективної дифузії;

2) фізична або хімічна адсорбції молекул окисника;

3) взаємодія між адсорбованим окисником та поверхневими атомами вуглецю з утворенням

продуктів реакції (СО або СО₂), також сорбованих на вуглиці;

4) десорбція продуктів реакції (СО або СО₂) та видалення їх у газову фазу.

За низьких температур (до 450 °С) відбувається повільне окиснення вуглецю, за якого переважають сорбційні процеси, тобто утворюються СО й СО₂ та накопичуються у поверхневому шарі вуглецю. Сорбційний механізм взаємодії з киснем для графіту та високотемпературного коксу перестає відігравати роль приблизно за температур 450–550 °С.

Теоретичні розрахунки показують можливість скоротити вміст у відхідних газах оксиду вуглецю не більше ніж на 20 % від існуючого рівня при переході на однокомпонентну шихту.

У багатокомпонентній шихті міститься 10 % деревної тирси, що, ймовірно, збільшує газовиділення (вихід ароматичних складових при піролізі деревини), а за умови відсутності у печах графітування кисню для згоряння відбувається неповне окиснення високомолекулярних вуглеводнів до СО. Для відтворення умов перебування теплоізоляційної шихти у печі графітування проведені подальші експериментальні перевірки концентрації монооксиду вуглецю у разі використання багатокомпонентної та однокомпонентної теплоізоляційної шихти.

У печах графітування теплоізоляційна шихта являє собою шар вуглецевої вогнетривкої суміші висотою 4 м, ізольований від вільного доступу повітря всередину шару, що створює умови інертного середовища.

У результаті проведення дослідів отримано температурні залежності концентрації монооксиду вуглецю при нагріванні вуглецевої шихти (рис.7).

Результати вимірювання отримані для однакової кількості досліджуваного матеріалу.

Рис.7. Температурна залежність концентрації СО коксового дріб'язку 0–10 мм та використовуваної шихти: 1 — багатокомпонентна шихта; 2 — однокомпонентна шихта.

Для якісної оцінки впливу наповнення теплоізоляції на величину концентрації результати приведені до безрозмірного вигляду. Після нагрівання вище 250 °С у багатокомпонентній шихті починає інтенсивно зростати концентрація монооксиду вуглецю, досягаючи піку при 600 °С, причому цей максимум характерний для однокомпонентної та для багатокомпонентної шихти. На розглянутому температурному діапазоні концентрація СО багатокомпонентної шихти перевищує концентрацію однокомпонентної шихти, що на деяких ділянках сягає 400 %.

Таким чином, дослідження показали, що у разі використання однокомпонентної теплоізоляційної шихти можна суттєво знизити концентрацію викидів монооксиду вуглецю на печах графітування.

Експериментальна перевірка ефективності розроблених футерувальних та теплоізоляційних матеріалів

Експериментальні перевірки впливу фракційного складу теплоізоляції на теплові характеристики печі графітування здійснені при застосуванні багатокомпонентної теплоізоляційної шихти (кокс, пісок, деревна тирса) та однокомпонентної шихти (кам'яновугільний кокс фракцією 0–10 мм). Дослідження температурних полів проводилися на печі графітування постійного струму при графітуванні заготовок діаметром 610 мм.

Під час проведення експериментів на печах змінного й постійного струму для контролю температур у заготовках використовувалися вольфрам-реңіві термомпари. Термомпари 1 та 2 встанов-

Таблиця 2. Характеристики кампаній графітування

Параметр	Кампанія № А	Кампанія № Б
Завантаження печі, т	91,9	92
Короткий запис режиму, кВт	1500; 200 / 5700; 400 / max	1500; 200 / 5700; 400 / max
Максимум потужності (I ₂ ·U ₂), кВт	13300	12947
ПВЕ, кВт·год/т	6500	6150
Тривалість кампанії, год	73,6	69

Примітка. ПВЕ - питомі витрати електроенергії

лені по вісі заготовки нижнього ряду, термомпари 3 та 4 — по вісі заготовки верхнього ряду. Крім цього, здійснювався контроль торця заготовки нижнього ряду за допомогою термомпари 5 та високотемпературного датчика (графітовий блок).

Для оцінки зміни теплового режиму печі графітування при використанні багатокомпонентної та однокомпонентної шихти було проведено порівняння кампаній № А та № Б. Характеристики кампаній на період проведення експерименту наведені у табл.2, схема замірів — на рис.8.

Результати порівняння характерних температур для обох кампаній наведено на рис.9.

Аналізуючи результати натурних експериментів, зазначимо, що температура заготовок збільшується повільніше порівняно з температурою теплоізоляції печі при використанні однокомпонентної шихти.

На температуру керна печі та його теплоізоляцію істотний вплив мають:

- режими введення електроенергії, різні на некерований ділянці для кожної кампанії;
- вологість теплоізоляції;
- неоднорідність властивостей кернової пересипки;
- наявність утеплення газозовлюючої парасольки та ін.

Враховуючи це, з метою виключення впливу зазначених чинників проведено порівняння не тільки даних натурних експериментів, але й результатів числового моделювання, верифікованого на основі натурних експериментів.

Модель налаштовувалася з використанням:

- геометрії печі, керна, теплоізоляційних шарів;
- коефіцієнтів тепловіддачі, вологості шихти та сирого коксу;
- врахування роботи печі з утепленням;
- нових теплоізоляційних властивостей шихти.

Рис.8. Схема експериментальних вимірювань на печі постійного струму: 1–5 — термомпари.

Рис.9. Порівняння характерних температур печі для кампаній з багатокомпонентною (1) та однокомпонентною (2) шихтою: а – середня ядра печі; б – стінки печі; в – середня 1-го ряду заготовок; г – середня 2-го ряду заготовок; д – середня 3-го ряду заготовок.

Результати порівняння характерних температур печі для кампаній з базовою теплоізоляційною багатокомпонентною та однокомпонентною шихтою наведені на рис.9 та у табл.3.

Як видно з рис.9 та табл.3, за умови застосування однокомпонентної теплоізоляційної шихти порівняно з багатокомпонентною:

- істотно зменшується температура ядра печі (у середньому на 109 °С);
- зменшується час витримки ядра при високих температурах (у середньому на 8 год – 29 %);
- збільшується температура на внутрішній поверхні шамотної стінки печі.

Отже, отримані результати при використанні однокомпонентної теплоізоляційної шихти на основі кам'яновугільного коксового дрібязку фракційним складом 0–10 мм не дають можливості досягти бажаних показників теплового стану печі графітування. Кращі теплоізоляційні властивості багатокомпонентної шихти обумовлені не тільки низьким значенням теплопровідності, але й ви-

Таблиця 3. Порівняння характерних температур печі для кампаній № А та № Б

Характеристика	№ А	№ Б
Максимум по перерізу температури ядра, °С:		
середньої $t_{\text{ср}}$	2804	2695
мінімальної $t_{\text{мін}}$	2440	2271
максимальної $t_{\text{макс}}$	2957	2869
Час витримки ядра при температурі вище $t_{\text{ср}} > 2500$ °С, год	35,0	27,0
Швидкість зростання середньої по перерізу температури, °С/год:		
для $t_{\text{ср}} < 1100$ °С	13–70	13–70
для $t_{\text{ср}} = 1100–1700$ °С	70–80	70–78
для $t_{\text{ср}} > 1700$ °С	< 80	< 78
Максимум середньої по перерізу температури заготовок, °С:		
нижнього ряду $t_{\text{ср.н.}}$	2783	2695
верхнього ряду $t_{\text{ср.в}}$	2792	2657
Час витримки заготовок нижнього ряду, год:		
при $t_{\text{ср.н}} > 2500$ °С	30	24
при $t_{\text{ср.н}} > 2500$ °С	36	28
Максимум температури внутрішньої поверхні бічної стінки печі $t_{\text{ст.}}$, °С	1268	1525

соким значенням насипної густини, що, у свою чергу, досягається значним вмістом піску. Проведені дослідження насипної густини різних фракцій коксового дріб'язку дали можливість досягти наближених показників до багатокомпонентної шихти як теплоізоляційної при застосуванні фракції 0–2 мм. Числові розрахунки теплового стану печі графітування при використанні суміші сирого та графітованого матеріалу фракційним складом 0–2 мм доводять можливість зниження температури стінки печі до значень, що відповідають експлуатаційним характеристикам використовуваної шамотної кладки.

Висновки

На підставі результатів числового аналізу теплоелектричного стану печі Ачесона показано, що однокомпонентну теплоізоляцію доцільно використовувати із вмістом сирого коксового дріб'язку не менш 50 % (мас.). У цьому разі порівняно з використанням синтетичної шихти спостерігається не лише зниження температури заготовок (середня об'ємна температура по всіх рядах зменшилася з 3470 до 3220 °С), але й суттєве вирівнювання температури по висі заготовки (перепад температури по всіх рядах заготовок зменшився на 580 °С).

На основі результатів вимірювання теплофізичних властивостей та числового моделювання температурних полів в об'ємі печі графітування Ачесона підібрано ресурсо- та енергозберігаючу екологічно ефективну вуглецеву теплоізоляційну шихту, що складається із зерен сирого та графітованого коксу у співвідношенні 50/50 % (мас.) розміром до 2 мм включно.

Проаналізовано особливості фізико-хімічних процесів, що проходять у печах випалювання та графітування електродних виробів. Проведено теоретичні та експериментальні дослідження екологічного стану випалювальних та графітувальних печей. На підставі аналізу отриманих даних встановлено температурні й часові залежності концентрації монооксиду вуглецю на випалювальних та графітувальних печах. Визначено основні джерела утворення монооксиду вуглецю: недоокиснені вуглецеві матеріали, ароматичні та смолисті речовини зв'язуючого заготовок. Розроблено комплекс заходів, що дають можливість знизити концентрацію викидів монооксиду вуглецю на промисловому пічному обладнанні: зменшення площі контакту димових газів з вуглецевими матеріалами; модернізацію графіка випалу; впорскування води та застосування каталізатора за місцем інтенсивного газовиділення; каталітичне окиснення; хімічна нейтралізація; допалювання відхідних газів.

Проведено експериментальне дослідження зі встановлення температурної залежності концентрації монооксиду вуглецю під час нагрівання багатокомпонентної та однокомпонентної теплоізоляційної шихти, що дало можливість встановити зниження викидів СО більш ніж на 20 % у разі застосування однокомпонентної шихти на основі кам'яновугільного коксового дріб'язку розміром фракції до 10 мм включно.

Список літератури

1. Ivanenko O., Panov Ye., Gomelia N. et al. Assessment of the Effect of Oxygen and Carbon Dioxide Concentrations on Gas Evolution During Heat Treatment of Thermoanthracite Carbon Material. *Journal of Ecological Engineering*. 2020. Vol. 21, № 2. P. 139–149. doi: 10.12911/22998993/116326.
2. Лелека С.В., Панов Е.Н., Карвацкий А.Я. и др. Теплоэлектрическое состояние печей графитирования Ачесона. Київ : НТУУ «КПИ», 2014. 238 с.
3. Педченко А.Ю., Панов Е.М., Карвацкий А.Я. та ін. Теоретично-експериментальні дослідження печей графітування Кастнера. Київ : НТУУ «КПИ ім. Ігоря Сікорського», 2017. 174 с.
4. Пулинец И.В., Панов Е.Н., Карвацкий А.Я. и др. Теплообмен в многокамерных печах обжига углеродистых изделий. Київ : НТУУ «КПИ», 2014. 176 с.
5. Мікульонюк І.О. Механічні, гідромеханічні і масообмінні процеси та обладнання хімічної технології. Київ : НТУУ «КПИ», 2014. 340 с.
6. Шулепов С.В. Физика углеродистых материалов. М. : Металлургия, 1972. 256 с.
7. Карвацкий А.Я., Лелека С.В., Пулинец И.В., Лазарев Т.В. Совершенствование регламентов обжига с учетом динамики газовой выделения обжигаемых заготовок. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2011. № 5/6. С. 42–45.
8. Фокин В.П., Малахов А.А., Малахов С.А., Сошкин С.В. Усовершенствование технологии обжига электродных материалов. *Цв. металлы*. 2002. № 4. С. 48–51.
9. Karvatskii A.Ya., Vasilchenko G.M., Panov E.M. et al. Thermoelectric Properties of Granular Carbon Materials // *Advanced Thermoelectric Materials* / Chong Rae Park (ed.). Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., Beverly, MA 01915-6106 : Scrivener Publishing LLC, 2019. P. 437–468. doi: 10.1002/9781119407348.ch10.
10. Санников А.К., Сомов А.Б., Ключников В.В. и др. Производство электродной продукции. М. : Металлургия, 1985. 129 с.
11. Фиалков А.С. Углеродистые материалы. М. : Энергия, 1979. 320 с.
12. Чирка Т.В., Васильченко Г.М., Панов Е.Н. та ін. Фізичні властивості вуглецевих сипучих матеріалів: Київ : Політехніка, 2016. 152 с.
13. Kutuzov S.V., Buryak V.V., Derkach V.V. et al. Making the Heat-Insulating Charge of Acheson Graphitization Furnaces More Efficient. *Refra-*

- ries and Industrial Ceramics. 2014. Vol. 55, № 1. P. 15–16.
14. Karvatskii A.Ya., Leleka S.V., Pedchenko A.Yu., Lazarev T.V. Numerical analysis of physical fields of graphitization process of electrode production in Castner's furnace. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. Vol. 6, No. 5. P. 19–25. doi: 10.15587/1729-4061.2016.83191.
 15. Знамеровский В.Ю., Коцюр В.А. Сандер Г.В. Исследование газовой выделений из печей графитации // Совершенствование технологии электродного производства : Сб. науч. тр. Москва : НИИГрафит, ГосНИИЭП, 1988. С. 78–82.
 16. Карвацький А.Я., Шилович І.Л., Крутоус Л.В., Кутузов С.В. Зниження концентрації СО в процесі випалу графітових заготовок. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*. 2012. № 68. С. 201–205.
 17. Карвацький А.Я., Шилович І.Л., Крутоус Л.В., Кутузов С.В. Зниження концентрації СО за рахунок установки конверсії монооксида вуглецю. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2013. № 2/11. С. 38–41.

Надійшла до редакції 01.07.20

Лелека С.В.¹, канд. техн. наук, ORCID 0000-0002-4372-9454,
Панов Е.Н.¹, докт. техн. наук, проф., ORCID 0000-0002-4885-2777,
Карвацький А.Я.¹, докт. техн. наук, проф., ORCID 0000-0003-2421-4700,
Васильченко Г.Н.¹, канд. техн. наук, ORCID 0000-0003-4026-8661,
Микулёнок И.О.¹, докт. техн. наук, проф., ORCID 0000-0001-8268-7229,
Бориц С.А.¹, ORCID 0000-0003-4458-8259,
Вагин А.В.², канд. физ.-мат. наук, ORCID 0000-0002-1234-0753
¹ НТУУ «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев
 просп. Победы, 37, 03056 Киев, Украина, e-mail: anton@rst.kpi.ua
² ЧАО «Украинский графит», Запорожье
 Северное шоссе, 20, 69600 Запорожье, Украина, e-mail: vagin@ukrgrafit.com.ua

Разработка энергоэффективных и экологически безопасных футеровок и теплоизоляции печей электродного производства

Выполнен числовой анализ теплоэлектрического состояния печи Ачесона и предложено использование новой теплоизоляции заготовок, которые подвергаются графитированию. Показана целесообразность применения в качестве теплоизоляции однокомпонентной теплоизоляционной шихты. В этом случае по сравнению с использованием традиционной многокомпонентной синтетической шихты наблюдается не только снижение температуры заготовок, но и существенное выравнивание температуры по оси заготовки. На основе результатов измерения теплофизических свойств и числового моделирования температурных полей в объеме печи графитирования Ачесона подобрана ресурсо- и энергосберегающая экологически эффективная углеродная теплоизоляционная шихта, которая состоит из зерен сырого и графитированного кокса в соотношении 50/50 % (мас.) размером до 2 мм включительно. Проведены теоретические и экспериментальные исследования экологического состояния обжиговых и графитирующих печей. На основе анализа полученных экспериментальных данных установлены температурные и временные зависимости концентрации СО в обжиговых и графитирующих печах. Определены основные источники образования СО: недоокисленные углеродные материалов, ароматические и смолистые вещества связующего заготовок. Разработан комплекс мер, которые позволяют снизить концентрацию выбросов СО на печном оборудовании в промышленных условиях. Проведены экспериментальные исследования по определению температурной зависимости концентрации СО в процессе нагрева многокомпонентной и однокомпонентной теплоизоляционной шихты, позволившие снизить выбросы СО более чем на 20 % в случае использования предложенной однокомпонентной шихты. *Библ. 17, рис. 9, табл. 3.*

Ключевые слова: углеродсодержащее сырье, печь графитирования Ачесона, футеровка, теплоизоляция, энергетическая эффективность, экологическая безопасность.

Leleka S.V.¹, Candidate of Technical Sciences, ORCID 0000-0002-4372-9454,
Panov Ye.M.¹, Doctor of Technical Sciences, Professor, ORCID 0000-0002-4885-2777,
Karvatskii A.Ya.¹, Doctor of Technical Sciences, Professor, ORCID 0000-0003-2421-4700,
Vasylchemko G.M.¹, Candidate of Technical Sciences, ORCID 0000-0003-4026-8661,
Mikulionok I.O.¹, Doctor of Technical Sciences, Professor, ORCID 0000-0001-8268-7229,
Borshchik S.O.¹, ORCID 0000-0003-4458-8259,
Vahin A.V.², Candidate of Physics and Mathematics Sciences, ORCID 0000-0002-1234-0753

¹ **National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv**

37, Peremohy Ave., 03056 Kyiv, Ukraine, e-mail: anton@rst.kpi.ua

² **Private Joint-Stock Company «Ukrainsky Grafit», Zaporizhzhia**

20, Pivnichna highway, 69600 Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: vagin@ukrgrafit.com.ua

Development of Energy-Efficient and Environmentally Friendly Linings and Thermal Insulation of Electrode Production Furnaces

A numerical analysis of the thermoelectric state of the Acheson furnace was performed and the use of new thermal insulation of blanks that are graphitized was proposed. The expediency of using a single-component heat-insulating charge as thermal insulation is shown. In this case, in comparison with the use of a traditional multicomponent synthetic mixture, not only a decrease in the temperature of the blanks is observed, but also a significant equalization of temperature along the axis of the blanks. Based on the results of measuring the thermophysical properties and numerical simulation of temperature fields in the volume of the Acheson graphitizing furnace, a resource-saving and environmentally efficient carbon heat-insulating mixture was selected, which consists of raw and graphite coke grains 50/50 % (wt.) up to 2 mm in size. Theoretical and experimental studies of the ecological state of kilns and graphitizing furnaces have been carried out. Based on the analysis of the obtained experimental data, the temperature and time dependences of the concentration of carbon monoxide in kilns and graphitizing furnaces are established. The main sources of carbon monoxide formation are determined: under-oxidized carbon materials, aromatic and resinous substances of binder preforms. A set of measures has been developed that can reduce the concentration of carbon monoxide emissions from furnace equipment in industrial conditions. Experimental studies were carried out to determine the temperature dependence of the concentration of carbon monoxide during heating of a multicomponent and one-component heat-insulating charge, which made it possible to establish a reduction in CO emissions by more than 20 % in the case of using the proposed one-component charge. *Bibl. 17, Fig. 9, Tab. 3.*

Key words: carbon-containing raw materials, Acheson graphitization furnace, lining, thermal insulation, energy efficiency, environmental safety.

References

1. Ivanenko O., Panov Ye., Gomelia N., Vahin A., Leleka S. (2020). Assessment of the Effect of Oxygen and Carbon Dioxide Concentrations on Gas Evolution During Heat Treatment of Thermoan-thracite Carbon Material. *Journal of Ecological Engineering*. 21 (2): pp. 139–149. doi: 10.12911/22989993/116326.
2. Leleka S.V., Panov Ye.N., Karvatskii A.Ya., Pulinets I.V., Chirka T.V., Lazarev T.V. (2014). Teplo energeticheskoye sostoyaniye pechey grafitirovaniya Achesona. [Heat electric condition of Acheson graphitizing furnaces]. Kyiv : NTUU «KPI». 238 p. (Rus.)
3. Pedchenko A.Yu., Panov Ye.M., Karvatskii A.Ya., Leleka S.V., Lazarev T.V. (2017). Teoretychno-eksperymentalni doslidzhennia pechei grafituvannya Kastmera. [Theoretical and experimental design of Castner's furnace]. Kyiv : NTUU «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute». 174 p. (Ukr.)
4. Pulinets I.V., Panov Ye.N., Karvatskii A.Ya., Leleka S.V., Lazarev T.V., Chirka T.V. (2014). Teploobmen v mnogokamernykh pechakh obzhiga uglegrafitovykh izdeliy. [Heat exchange in multi-chamber furnaces of roasting of carbon and

- graphite products]. Kyiv : NTUU «KPI». 176 p. (Rus.)
5. Mikulionok I.O. (2014). Mekhanichni, hidromekhanichni i masoobminni protsessy ta obladnannia khimichnoi tekhnologii. [Mechanical, hydromechanical and mass-exchanged processes and equipment of chemical technology]. Kyiv : NTUU «KPI». 340 p. (Ukr.)
 6. Shulepov S.V. (1972). Fizika uglegrafitovykh materialov. [Physics of carbon graphite materials]. Moscow : Metallurgiya, 256 p. (Rus.)
 7. Karvatskii A.Ya., Leleka S.V., Pulinets I.V., Lazarev T.V. (2011). Sovershenstvovanie reglamentov obzhiga s echetom dinamiki gazovydeleniia obzhigaemykh zagotovok. [Improving firing regulations taking into account the dynamics of gas evolution of fired blanks]. *Vostochno-Evropeiskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy. [Eastern-European Journal of Enterprise Technologies]*. No. 5/6, pp. 42–45. (Rus.)
 8. Fokin V.P., Malakhov A.A., Malakhov S.A., Soskin S.V. (2002). Usovershenstvovanie tekhnologii obzhiga elektrodnykh materialov. [Improving the technology of firing electrode materials]. *Tsvetnye metally*, No. 4, pp. 48–51. (Rus.)
 9. Karvatskii A.Ya., Vasilchenko G.M., Panov E.M., Leleka S.V., Lazarev T.V., Pedchenko A.Yu., Chirka T.V. (2019). Thermoelectric Properties of Granular Carbon Materials. *Advanced Thermoelectric Materials* / Chong Rae Park (ed.). Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., Beverly, MA 01915-6106 : Scrivener Publishing LLC, pp. 437–468. doi: 10.1002/9781119407348.ch10.
 10. Sannikov A.K., Sonov A.B., Klyuchnikov V.V., Molokova T.L., Znamerovskiy V.Yu. (1985). Proizvodstvo elektrodnoy produktsii. [Electrode production]. Moscow : Metallurgiya. 129 p. (Rus.)
 11. Fialkov A.S. (1979). Uglegrafitovye materialy. [Carbon graphite materials]. Moscow : Energiya. 320 p. (Rus.)
 12. Chirka T.V., Vastlchenko G.M., Panov E.M., Leleka S.V., Karvatskii A.Ya. (2016). Fizychni vlastyosti vugletzrvykh sypuchykh materialiv. [Physical properties of carbon bulks]. Kyiv : NTUU «KPI». 152 p. (Ukr.)
 13. Kutuzov S.V., Buryak V.V., Derkach V.V., Panov E.N., Karvatskii A.Ya., Vasil'chenko G.N., Leleka S.V., Chirka T.V., Lazarev T.V. (2014). Making the Heat-Insulating Charge of Acheson Graphitization Furnaces More Efficient. *Refractories and Industrial Ceramics*, 55 (1), pp. 15–16.
 14. Karvatskii A.Ya., SLeleka S.V., Pedchenko A.Yu., Lazarev T.V. (2016). Numerical analysis of physical fields of graphitization process of electrode production in Castner's furnace. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (5), pp. 19–25. doi: 10.15587/1729-4061.2016.83191.
 15. Znamerovskiy V.Yu., Kotzyur V.A., Sander G.V. (1988). Issledovanie gazovydeleniy iz pechey gfaifatsii. [Study of gas evolution from graphitization furnaces]. In: Sovershenstvovanie tekhnologii elektrodnoho proizvodstva. Moscow : NIIGrafit, GosNIIEP, pp. 78–82. (Rus.)
 16. Karvatskii A.Ya., Shilovich I.L., Krutous L.V., Kutuzov S.V. (2012). Znyzhennia kovtsentratsii CO v protsesi vypalu grafitovykh zagotovok. [Reduced concentration of CO in the process of firing graphite blanks]. *Visnyk NTU «KhPI». Seriya: Novi rishennia v suchasnykh tekhnologiiakh*, No. 68, pp. 201–205. (Ukr.)
 17. Karvatskii A.Ya., Shilovich I.L., Krutous L.V., Kutuzov S.V. (2013). Znyzhennia kovtsentratsii CO za rakhunok ustanovky konversii monooksydu vuglrtsiu. [Reduced concentration of CO for the unit of carbon monoxide conversion]. *Vostochno-Evropeiskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy. [Eastern-European Journal of Enterprise Technologies]*. No. 2/11, pp. 38–41. (Ukr.)

Received July 1, 2020

**Шановні автори та читачі журналу
«Енерготехнології та ресурсозбереження»!**

**Передплачуйте наш журнал (індекс 74546)
на II півріччя 2020 року
за «Каталогом видань України»
через сайт ДП «Преса» (<http://www.presa.ua>)
до 16 числа кожного місяця.**