

ПІДВИЩЕННЯ СТІЙКОСТІ ФУТЕРУВАННЯ КОНВЕРТЕРА ПРИ РАФІНУВАННІ ЕЛЕКТРОТЕРМІЧНОГО ФЕРОНІКЕЛЮ

В.В. Акреєв, С.В. Приходько, С.О. Мельник, А.А. Надточій, А.М. Овчарук

Український державний університет науки і технологій.

49600, м. Дніпро, просп. Науки, 4. E-mail: tehnosplavy.dnopr@gmail.com

Заключною стадією процесу отримання феронікелю, одного з варіантів переробки окиснених нікелевих руд перед гранулюванням, є рафінування феронікелю. Технологічні схеми рафінування феронікелю на підприємствах в світі, в основному, містять схожі етапи виробництва з незначними варіаціями, але нерідко використовуються процеси у вертикальних кисневих конвертерах. Двоетапність або дуплексність рафінування феронікелю полягає в тому, що побічний продукт плавки, що утворюється в початковий період обробки чорного феронікелю, містить багато оксиду кремнію. Відповідно, першу стадію рафінування проводять в конвертерах з кислим футеруванням. Другу стадію обробки з видаленням залишків хрому, вуглецю, сірки, фосфору та інших домішок здійснюють в конвертерах з основним футеруванням. Сучасні умови експлуатації основних конвертерів рафінування феронікелю потребують високих вимог до робочого футерування. Воно має поєднувати в собі високу стійкість при одночасній мінімізації питомих витрат на вогнетриви. Таке поєднання досягається системним підходом у виборі конструкції футерування, типорозмірів виробів, хімічного складу, якості матеріалів та систематичним доглядом. У цій роботі розглядаються методи підвищення стійкості футерування однієї з ділянок робочого футерування — верхнього конуса конвертера для рафінування феронікелю. Виділено основні проблеми та можливі шляхи їх вирішення. Бібліогр. 12, табл. 2, рис. 7.

Ключові слова: рафінування, феронікель, основний конвертер, футерування, верхній конус, стійкість, термічне розширення

Вступ. Нікель — п'ятий за поширеністю елемент на Землі, який широко зустрічається в земній корі та ядрі, природним чином міститься в ґрунті та воді. Він має видатні фізичні і хімічні властивості, що робить його присутність необхідною у сотнях тисяч продуктів, його найбільше використовують у легуванні, зокрема з хромом та іншими металами для виробництва нержавіючої та жаростійкої сталі: має високу температуру плавлення — 1453 °C та пластичність; стійкий до корозії та окислення; ковкий; готовий до використання в сплавах; магнітний за кімнатної температури; може бути нанесений за допомогою гальванічного покриття; має каталітичні властивості; піддається повній переробці.

Таким чином, майже 70 % світового виробництва нікелю витрачається на виробництво нержавіючої сталі, 11 % використовується в виробництві електроніки та акумуляторів, 7 % — сплави кольорових металів, інші галузі, такі як леговані сталі та ливарне виробництво — 12 % [1, 2].

Нікель зустрічається в природі, головним чином, у вигляді оксидів, сульфідів і силікатів. Первинний нікель виробляють і використовують у вигляді феронікелю, оксидів нікелю та інших хімічних речовин, а також як чистий металевий нікель. Щорічно у світі виробляється і використовується понад два мільйони тонн нового або пер-

винного нікелю. Існує багато різних нікелевих руд, які вимагають різноманітних методів видобутку нікелю. В даний час нікельовмісні руди видобувають більш ніж в 25-ти країнах світу, а ресурси нікелю оцінюються майже в 350 мільйонів тонн. Понад 50 % світових ресурсів нікелю припадає на Австралію, Індонезію, ПАР, Росію та Канаду, економічні концентрації нікелю зустрічаються в родовищах сульфідних і латеритних руд [1].

Майже 80 % усього історично видобутого нікелю було вилучено протягом останніх трьох десятиліть. Удосконалені технології видобутку, плавлення та рафінування, а також збільшені потужності дозволяють переробляти нікелеву руду з нижчим вмістом. Зниження вмісту руди не обов'язково є ознакою зменшення ресурсів, а є відображенням інновацій і вдосконалень, внесених у видобуток і технологічні процеси. Додатково слід зазначити, що значними вважаються поклади нікелю в морських глибинах. За останніми оцінками у таких родовищах міститься понад 300 млн т нікелю [1].

За оцінками закордонних експертів підтверджені запаси нікелю в Україні становлять близько 190 тис. т (0,4 % від світових). Рентабельні родовища силікатного нікелю виявлені в регіоні Середнє Побужжя (6 родовищ). В Побузькій групі розробляються Деренюхське та Липовеньківське родовища, підго-

В.В. Акреєв — <https://orcid.org/0009-0009-3705-4129>, С.В. Приходько — <https://orcid.org/0009-0005-0013-2198>,
С.О. Мельник — <https://orcid.org/0009-0009-3964-312X>, А.А. Надточій — <https://orcid.org/0000-0001-5077-0562>,
А.М. Овчарук — <https://orcid.org/0009-0007-0218-2513>

товлене до експлуатації Тарнаватське родовище. За вітчизняними даними запаси нікелю в Середньому Побужжі становлять понад 60 тис. т. У районі Побузького феронікелевого заводу виявлено кілька нових родовищ і перспективних ділянок із загальними перспективними ресурсами 52 тис. т. Здебільшого це руда з низьким вмістом нікелю [3].

Побузький феронікелевий комбінат — єдине в Україні підприємство, що виробляє в промисловому масштабі феронікель з бідних окислених нікелевмісних руд. Технологія включає в себе попередню сушку всієї маси руди зі зниженням вологості з 30...35 до 18...20 %, випал рудної шихти-суміші з відновником (АС, АШ) ведеться в трубчастих обертових печах діаметром 4,5 м і довжиною 70 м. Одержаний гарячий недогарок з температурою 800...900 °С завантажується для відновлювальної плавки на чорновий феронікель у рудоплавильних електропечах потужністю 40 МВт з шістьма самоспікаючимися електродами діаметром 1200 мм. Температура чорного металу на виході з РТП становить 1360...1480 °С. Чорновий феронікель має наступний склад: Ni — 10...30 %; Si — 0,1...6,0 %; C — 1,8...2,5 %; S — не більше 0,4 %; Cr — 0,5...2,0 %; P — не більше 0,1 %; Cu — не більше 0,08 %; решта — залізо.

Остаточне очищення від домішок при отриманні товарного феронікелю проводиться у вертикальних 50-тонних конвертерах з верхнім підводом кисню (кисень власного виробництва), дуплекс-процесом, послідовно в двох конвертерах. Товарний феронікель з вмістом нікелю близько 15...20 %, домішок менше 0,5 %, розливається в зливки масою близько 35 кг або гранулюється [4, 5].

Сучасні вимоги до футерівки конвертерів поєднують у собі необхідність досягнення її високої стійкості при мінімізації питомих витрат на вогнетриви. Системний підхід у виборі конструкції футерівки забезпечує підвищення її стійкості. Він полягає в постійному вдосконаленні проектів в напрямку гармонізації зносу різних зон футерівки конвертера в сукупності із застосуванням нових вогнетривких матеріалів і типорозмірів виробів.

Основна частина. В основі вогнетривких матеріалів і виробів лежать шість основних оксидів — SiO_2 , Al_2O_3 , MgO , CaO , Cr_2O_3 , ZrO_2 . Останнім часом їх використовують в поєднанні з вуглецем. На

додаток до вуглецю і карбіду кремнію, додаються невеликі кількості карбіду бору (B_4C) та нітридів (Si_3N_4 , BN) для спеціального застосування. Зазначені вище матеріали і сполуки відрізняються тим, що вони плавляться при високих температурах [6].

В процесі використання вогнетриви стикаються з рідким металом і шлаком, піддаються впливу високих температур, а також механічному впливу металу, шлаку та газів. Вогнетривкі вироби за хімічним складом поділяються на основні, кислі і нейтральні. Такий поділ визначає умови, у яких той чи інший вид вогнетривкого матеріалу можна застосовувати [7, 8].

Деякі заводи пострадянського простору використовують двофазний процес рафінування у двох різних конвертерах: кислому — для зниження вмісту Si у металі, основному — для зниження C, S, P та інших процесів рафінування. При цьому перший (кислий) конвертер зазвичай може бути зафутеровано шамотною, динасовою або високоглиноземистою цеглою, а другий (основний) — обпаленою основною цеглою. Хоча на різних заводах застосовували різні рішення, для основного конвертера найчастіше використовували магнезійно-хромітову цеглу (60 % MgO , 20 % Cr_2O_3) або магнезійну цеглу з вмістом MgO 95...98 % для шлакової зони. Для верхнього конуса та інших зон феронікелевого конвертеру використовували цеглу нижчих марок з нижчим вмістом MgO або Cr_2O_3 . На заводах спостерігали сильне зношування шлакової зони з характерним для обпаленої цегли профілем зносу, глибокою інфільтрацією шлаку і розтріскуванням цегли. Зрештою, виходила так звана шахова картина зносу, коли деякі цеглини футерування тріщали та лушилися, тоді як інші мали задовільну товщину. Такий характер зношування створював низку проблем, складно передбачити можливе закінчення кампанії агрегату та запланувати хід футерувально-ремонтних робіт. У зв'язку з прискореним зношуванням шлакової зони на ряді комбінатів влаштовували проміжний ремонт шлакової зони, наприклад, з цеглою більш короткого ремонтного розміру [9].

На початку 2000-х років були проведені перші випробування з використанням вуглецевмісних MgO –C пресованих вогнетривів у футеруванні основних конвертерів. Було показано, що цегла MgO –C може працювати в умовах рафінування фе-

Таблиця 1. Характеристика оксидних матеріалів за характером хімічної реакції

Поділ	Реакція	Вогнетривкий матеріал
Кислий	$\text{Оксид} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{кислота}$	Кремнезем, Al_2O_3 – SiO_2 продукти, силікат циркону
Основний	$\text{Оксид} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{основа (гідроксид)}$	Продукти на основі магнезії та доломіту
Майже нейтральний	Не реагує ні кислотну, ні основно	Глинозем, хроміт, пікрохроміт, шпінель, форстерит



Рис. 1. Діаграма залежності властивостей MgO–C цегли від модифікацій: 1 — антиоксиданти; 2 — плавлена магнезія; 3 — сорт MgO; 4 — вуглець

ронікелю краще за обпалену. Продуктивність стала вище, а профіль зносу став синхронним та більш прогнозованим [9]. Побузький феронікелевий комбінат встановив MgO–C тестове робоче футерування основного конвертера для рафінування феронікелю вперше в 2005 р., а з 2008 р. почав використовувати магнезіально-графітову цеглу на постійній основі, вдосконалюючи дизайн футерування.

За номенклатурою розрізняють наступні види MgO–C продукції: магнезіальну цеглу на вуглецевому зв'язку ($< 7\% \text{ C}$); магнезіально-вуглецеву цеглу на вуглецевому зв'язку ($\geq 7\% \text{ C}$).

Зазвичай прийнято говорити про магнезіально-вуглецеву цеглу для обох типів продукції або ще іноді — периклазо-вуглецеву цеглу.

Зношення MgO–C цегли в основному спричинене впливом розчинності магнезії шлаком, окисленням вуглецю в цеглі повітрям або CO_2 , а також термомеханічними факторами, що виникають через термічний удар або механічний стрес, спричинений напругою цегляної кладки, ерозією цегли. У зоні подачі металобрухту в кисневих конвертерах високий абразивний знос є основним фактором пошкодження MgO–C цегли. При подачі з висоти брухт вдариється об поверхню робочого футерування [9].

Нормальний безперервний знос цегли залежить від послідовності процесу та є результатом безперервної взаємодії між такими явищами: зне-вуглецювання (шляхом окислення), проникнення сторонніх речовин (після втрати вуглецю, який затримує інфільтрацію), корозійної атаки (руйнування відбувається за допомогою розчину, що взаємодіє з поверхнею матеріалу) інфільтрованої структури цегли та ерозії матеріалу цегли внаслідок руху вмісту в конвертері чи печі. Крім того, додається періодичний знос — відлущування шматків цегли, що відокремлюються від тіла цеглини через напругу, викликану термічним ударом. Цей

процес є результатом неритмічної роботи агрегату, частих зупинок та глибоких охолоджень [9].

Напруга і знос футерування є похідними від чотирьох відповідних робочих та експлуатаційних властивостей: стійкості до корозії; окисно-відновної стабільності; стійкості до ерозії; здатності витримувати напруги, зокрема у випадку термічного удару.

Діаграма на рис. 1 ілюструє принциповий вплив модифікацій цегли MgO–C на загальні властивості цегли.

Аналізуючи наведену інформацію, важливість і значення вуглецю можна побачити в зниженні зносу цегли шляхом зменшення глибини інфільтрації та в з'єднанні необпаленої цегли з характерною структурною гнучкістю вуглецевого зв'язку [10]. Стійкість до термічного удару покращується завдяки збільшенню теплопровідності та зменшеному тепловому розширенню, характерному для вуглецевого зв'язку, ефекту додаткового пресуючого компонента під час виробництва, який дозволяє значно зменшити відкриту пористість цегли MgO–C порівняно з обпаленою цеглою MgO–C. Характерною особливістю магнезіально-вуглецевої цегли є те, що вуглецевий зв'язок остаточно утворюється під час експлуатації футерування, тобто лише тоді цегла досягає своєї остаточної міцності. Глибина інфільтрації змінюється наявністю вуглецю в діапазоні від см до мм, при цьому механізм зносу цегли різко змінюється.

Графіт використовується в природній крупнокристалічній пластівчастій формі (лускатий графіт) із вмістом вуглецю зазвичай між 92...96 %. Технічний вуглець застосовується термічний та пічний на основі природного газу або нафти з низьким первинним розміром частинок. Завдяки розміру можна досягти оптимального заповнення пор цегли вуглецем, що позитивно впливає на стійкість до корозії [6].

Основними матеріалами для виготовлення MgO-C цегли є обпалена та плавлена магнезія, графіт і сажа (технічний вуглець). Органічні матеріали з високим вмістом вуглецю після коксування використовуються як сполучні для забезпечення достатнього зв'язку під час експлуатації цегли. Металеві порошки, такі як Al і Si , або сплави, такі як Al-Si або Al-Mg (так звані антиоксиданти) додаються, щоб вплинути на конкретні властивості цегли.

Від магнезії перш за все вимагається висока корозійна стійкість до шлаків і висока термохімічна стабільність при високих температурах (стійкість MgO до відновлення вуглецем у цеглі) (рис. 2).

Щодо вибору магнезії можна зазначити наступне: молярне співвідношення $\text{CaO/SiO}_2 > 2$, а також низький вміст B_2O_3 і SiO_2 , Al_2O_3 і Fe_2O_3 ; має перевагу незначно реактивна межа поверхня периклазу через низьку відкриту пористість і великі кристали периклазу [11].

Після тривалого періоду удосконалення конструкції футерування конвертера для рафінування феронікелю, фізико-хімічних параметрів вогнетриву, різних методів та прийомів з догляду за агрегатом у 2013 р. було підвищення стійкості футеровки більш ніж у 2,8 разів, з приблизно 300 до 852 плавки.

Експлуатація конвертера проводилася згідно технологічній інструкції з рафінування чорного феронікелю ПФК-ЕР-ТІ-14-0002. У період кампаній проводилися наступні стандартні процедури за доглядом робочого футерування конвертера: застосування доломітизованого вапняку з вмістом $\text{MgO} < 20\%$ для зниження агресивного впливу шлаку на футерування; загушення кінцевих шлаків за рахунок присадки доломітизованого вапняку; азотне торкретування футерування кінцевим шлаком після кожної плавки; підварювання зношених ділянок футерування боєм вогнетривкої цегли і шлаком; ремонт локальних зон методом

напівсухого торкретування; ремонт локальних зон із застосуванням ремонтної маси на основі MgO та пеку на гарячу.

Чорновий феронікель з 10...14 % Ni має високий вміст сірки, що надходить з вуглецевого відновника і з руди, згодом піддається рафінуванню, а потім розливається на машині розливу або гранулюється. Рафінування від домішок вуглецю, кремнію та хрому виконується у вертикальному конвертері з кислим футеруванням та верхнім продуванням киснем. Через підвищену ерозію динасового футерування в кислому конвертері окислюється тільки частина кремнію і вуглецю, а решта цих домішок видаляється на наступному етапі. Рафінування від вуглецю, сірки, фосфору і доведення металу за хімічним складом та температурою виконується у вертикальному конвертері з основним футеруванням і верхнім продуванням киснем.

У нормальних умовах технологічний процес здійснювався в режимі дуплексу, але у період кампанії нерідко проводилися прямі плавки з РТП-2, на яких крім тривалих продувок на збагачення металу по нікелю (у середньому 21...23 хв), шляхом окислення заліза киснем, значно зростала окисленість шлаку і збільшувався час знаходження розплаву в конвертері. Це все підвищувало вимоги до робочого футерування, ускладнювало умови служби вогнетривів і призводило до додаткового залучання засобів по збереженню часу експлуатації футерування конвертера хоча б на тому ж рівні, що і раніше. З іншого боку постійно приймалися зусилля з оптимізації витрат на вогнетриви, оскільки ринкові ціни на нікель знижувалися. Таким чином, відомий спосіб підвищення одних тільки фізико-хімічних властивостей вогнетривкового матеріалу не давав бажаного ефекту збереження стійкості футерування і вимагав більш комплексного підходу. За допомогою удоскона-



Рис. 2. Окисно-відновна реакція в магнезіально-вуглецевій цеглі



Рис. 3. Зона локального зносу в верхньому конусі конвертера
лення конструкції футерування стало можливим збільшити кампанію конвертера і раціоналізувати витрати на вогнетривку футерування.

Так, після випуску 700-й плавки однієї з кампаній, було помічено почервоніння конусної зони корпусу конвертера, приблизно з 50 по 55 ряди. Було прийнято рішення про використання торкрет маси для насичення кінцевого шлаку MgO та його наступного загушення. Цей прийом дав можливість працювати далі і закінчити кампанію виплавки, але треба було відзначити слабке місце в робочому футеруванні газової зони та усилити конусну частину футерування конвертера (у тому числі необхідні заходи щодо запобігання випаданню цегли).

Профіль зносу футерування верхнього конуса конвертера показаний на рис. 3. По-перше, в цій зоні на стику циліндричної та конічної частин футерування виникає концентрація навантаження, що виштовхує вогнетривку цеглу вгору. Це навантаження більшою мірою обумовлено термічним розширенням футерування конвертера з моменту розігріву. Дія цього навантаження могла призводити до утворення тріщин у цеглинах.

По-друге, при виробництві кладки робочого футерування конвертера стандартним клиновим

форматом дуже важко якісно протромбувати проміжок між робочою цеглою і арматурним шаром футерування. Внаслідок цього в цих трикутних зазорах можуть утворюватися порожнечі, які дозволяють цеглинам рухатися. При значному зносі футеровки та досягненні критично малої товщини шару (близько 100...150 мм) відбувається випадання цегли з наступним руйнуванням та оголенням арматурного футерування (плашки).

Третій чинник — технологічний. Вказана вище можливість цегли рухатися призводила до руйнування робочого шару футерування при чищенні газової зони агрегату. Догляд за горловиною конвертера — це в основному видалення цапа металу та шлаку через заростання горловини. Якщо не забезпечується задовільне відділення цього наросту від поверхні футерування конвертера, необхідно більш інтенсивно чистити, докласти більшого зусилля. При малій товщині шару футерування з'являється ризик відірвати цілий сектор.

Було запропоновано вирішувати проблему стійкості конуса наступними способами: створення цільної конструкції футерування без пустот всередині; вдосконалення кладки таким чином, що утворення тріщин у цеглинах не призводило би до подальшого випадіння вогнетриву; оптимізація (рівномірний розподіл) температурних компенсаційних швів кладки.

На рис. 4 відображено стандартний варіант футерування конуса та модернізований. Перший варіант розроблений з використанням стандартного клинового формату цегли, а другий з паралелограмної цегли для конвертерів, так званого типу — SS.

Застосування модернізованого формату спеціальної форми дозволило виключити наявність трикутних порожнин між робочою кладкою та арматурним шаром футерування. Кільця стали укладатися щільніше і цегла вже не мала можливості рухатися у горизонтальній площині, послаблюючи ряди. Застосування SS форматів дозволило знизити мінімальну критичну товщину зношування конуса конвертера до 50...100 мм, уникнувши раннього випадання цег-

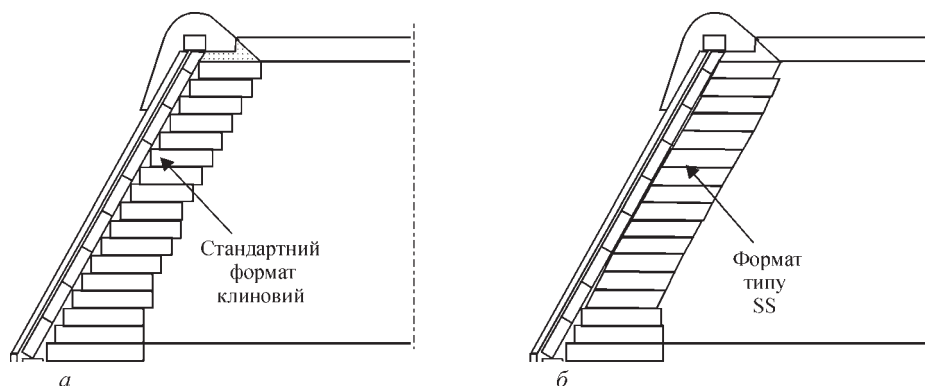


Рис. 4. Стандартний клиновий формат цегли (а) та паралелограмна цегла для конвертерів (б)

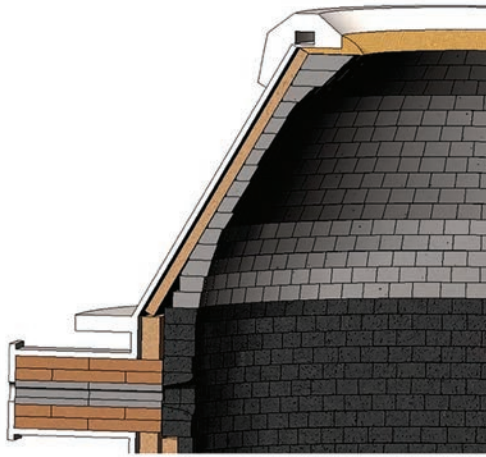


Рис. 5. Комп'ютерне моделювання топографії зносу конусу феронікелевого конвертера з використанням нового формату цегли. За рахунок спеціальної форми та довшої цеглини з'явилася можливість працювати на такому конусі більш тривалий час, ніж при використанні традиційного клинового формату (рис. 5).

Наступний етап щодо оптимізації температурних компенсаційних швів кладки на комбінаті пропонується вирішувати в такий спосіб. Для відшкодування температурного розширення пропонується використовувати спеціальні компенсуючі прокладки. Зазвичай їх розміщують у кожному ряду цегляної кладки конвертера (рис. 6).

В ідеальному випадку роблять попередній розрахунок припуску на теплове розширення кладки, варіюють товщину прокладок і розподіляють їх шарами нерівномірно за висотою залежно від розширення тієї чи іншої зони конвертера.

Враховуючи той факт, що футерування верхнього конуса в нашому випадку відчуває найбільшу напругу, було запропоновано збільшити частку припуску на теплове розширення у футеровці трохи нижче конуса. За допомогою цього максимально знизити зусилля, що виштовхує та діє знизу вгору на вироби в конусі, послабити їх розтріскування та випадіння.

Пропонується також додатковий спосіб скріплення рядів $\text{MgO}-\text{C}$ цегли у футеруванні конуса основного конвертера для запобігання їх випадінню. Як зазначалося раніше, оголення арматурного шару футерування призводило до підвищених витрат на ремонт, а в особливих випадках до виведення агрегату на позаплановий ремонт. Пропонується встановити у шви між цеглою спеціальні

Таблиця 2. Міцність зчеплення $\text{MgO}-\text{C}$ цегли з алюмінієвою прокладкою

Поверхня цегли	Міцність зчеплення, МПа (після нагрівання до 1400 °С, 3 год)
Поперечний переріз	1,1
Поверхня пресування	0,8



Рис. 6. Спеціальні компенсуючі прокладки

розпірні алюмінієві прокладки. Даний метод розрахований на хімічну взаємодію між алюмінієм та зернами MgO під час експлуатації конвертера з подальшим зчепленням вогнетривкої цегли між собою по рядах.

Результати лабораторної оцінки показали утворення зв'язків між шарами при встановленні між периклазо-вуглецевими виробами алюмінієвої прокладки і схильності до термообробки у відновній атмосфері при 1400 °С протягом 3...5 год. Дані щодо міцності одержаної сполуки описані в табл. 2. Міцність зчеплення з пресованою поверхнею цегли була нижчою, ніж з поверхнею в перерізі цегли, але в цілому експерименти дозволяли розраховувати на утворення сталого зв'язку між цеглою [12].

Грунтуючись на лабораторних перевірках розроблена методика проведення експерименту. При виконанні кладки вгорі циліндра конвертера в шви між цеглою необхідно закласти алюмінієві прокладки, як показано на рис. 7.

Дані прокладки мають виконувати не тільки роль підвищення зчеплення між цеглинами в рядах робочого футерування, а ще й роль компенсаційних вставок при температурному розширенні. При такому варіанті побудови робочого футерування температурні прокладки, описані раніше, на цій ділянці не встановлюються.

Проведення такого експерименту на конвертері з рафінування феронікелю передбачає демонтаж

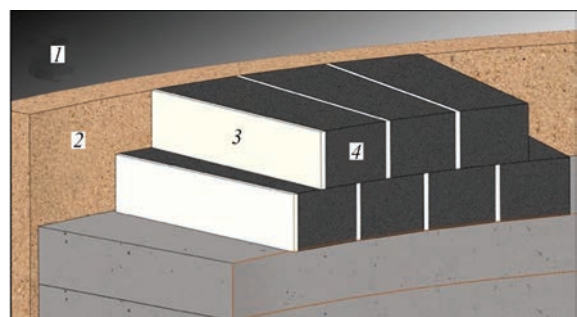


Рис. 7. Встановлення алюмінієвих прокладок у рядах футерування: 1 — кожух конвертера; 2 — арматурний шар футерування; 3 — вироби $\text{MgO}-\text{C}$; 4 — алюмінієві прокладки

робочого футерування після закінчення кампанії в даній області з подальшим вивченням матеріалів та їх структури в зоні зіткнення цегли з алюмінієвими прокладками. Цими заходами передбачається досягти поставленої мети повною мірою, отримати кращу монолітність робочого футерування шляхом рівномірного розподілу та оптимізації температурних швів, а також використовували алюмінієві прокладки. В результаті очікується зменшення розтріскування, скорочення кількості сколів та випадання цегли з футерування верхнього конуса конвертера.

Висновки

1. Розглянуто перелік вогнетривких матеріалів, які використовувалися для побудови робочого футерування однієї з ділянок основного конвертера для рафінування феронікелю — верхнього конуса. Позначено проблеми експлуатації футерування та можливі шляхи їх вирішення, виділено методи підвищення стійкості за допомогою таких дій: створення цільної конструкції футерування без пустот всередині; вдосконалення кладки таким чином, що утворення тріщин у цеглинах не призводило би до подальшого випадіння вогнетриву; оптимізація (рівномірний розподіл) температурних компенсаційних швів кладки.

2. З метою раціоналізації витрат на вогнетривкі матеріали в умовах нестабільного ринку збуту феронікелю було удосконалено конструкцію футерування верхнього конуса. Рівномірний розподіл температурних швів і застосування алюмінієвих прокладок ускладнювали монтаж, але могли ще більш підвищити монолітність кладки, значно зменшити розтріскування та обвалення цегли,

додатково збільшити стійкість футерування верхнього конуса загалом.

Список літератури/References

1. *Facts about nickel* [in Ukrainian]. <http://www.nickelinstitute.org>
2. *Nickel* [in Ukrainian]. <https://en.wikipedia.org/wiki/Nickel>
3. *Nickel resources and reserves* [in Ukrainian]. <https://uk.wikipedia.org/wiki/>
4. *Description of nickel production on LLC "PFK"* [in Ukrainian]. <https://pfk.com.ua/>
5. Shevchenko, D.V., Prikhodko, S.V., Nadtochii, A.A. et al. (2024) Development of the technology of ferronickel production in Ukraine. *Suchasna Elektrometallurhiya*, **2**, 5–12 [in Ukrainian].
6. Gerald, R., Harmut, W. (2012) *Pocket manual of refractory materials: Design, properties, testings*. 4th Ed. Vulkan-Verlag GmbH.
7. Afanasiev, S.G. (1967) *Brief reference book of converter specialist*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
8. Boichenko, B.M., Okhotskii, V.B., Kharlashin, P.S. (2004) *Converter production of steel: Theory, technology, steel quality, structures of units, recirculation of materials and ecology: Manual*. Dnipropetrovsk, Dnipro-VAL [in Ukrainian].
9. Schemmel, Th., Schade, L., Kouzoupis, P., Beqiri, F. (2013) Magnesia-carbon refractory lining for ferronickel converters — optimization and lining improvement at newco ferronickeli (Cosovo). In: *Proc. of The Thirteenth Inter. Ferroalloys Congress on Efficient Technologies in Ferroalloy Industry, June 9–13, Almaty, Kazakhstan*, 393–400.
10. Barthel, H., Kaltner, E. (1983) The effect of carbon in carbon-containing magnesia bricks on the wear in basic oxygen furnaces. In: *Proc. of the 1st Inter. Conf. on Refractories*, 91–104.
11. Buchebner, G., Samm, V., Sampayo, L. (2005) Neuentwicklung Kohlenstoffgebundener Magnesiakohlenstoffsteine Unter Dem Aspekt Der Verbesserten Umweltverträglichkeit — New-Generation Carbon-Bonded Magnesia Carbon Bricks with Improved Environmental Compatibility. *Keramische Zeitschrift*, **57**(6), 378–380.
12. Jansen, H. (2012) Carbon-containing refractories with anti-oxidants in laboratory and practical application. *Refractories Worldforum*, **4**, 87–93.

INCREASING THE LIFETIME OF CONVERTER LINING DURING REFINING OF ELECTROTHERMIC FERRONICKEL

V.V. Akreiev, S.V. Prykhodko, S.O. Melnyk, A.A. Nadtochii, A.M. Ovcharuk
Ukrainian State University of Science and Technology.

4 Prosp. Nauky, 49600, Dnipro, Ukraine. E-mail: tehnosplavy.dnepr@gmail.com

The final stage of the process of producing ferronickel, one of the options for processing oxidized nickel ores before granulation, is refining of ferronickel. Technological schemes of ferronickel refining at enterprises in the world mainly contain similar production stages with minor variations, but the processes in vertical oxygen converters is quite often used. Two-stage or duplex refining of ferronickel consists in that the by-product of melting, formed in the initial period of processing of rough ferronickel, contains a lot of silicon oxide. Accordingly, the first stage of refining is carried out in converters with acidic lining. The second stage of processing with removal of the remains chromium, carbon, sulfur, phosphorus and other impurities is carried out in converters with basic lining. Modern operating conditions of basic converters for ferronickel refining impose high requirements on working lining. It should combine high resistance with simultaneous minimization of specific costs for refractories. Such a combination is achieved by a systematic approach in the selection of lining design, product sizes, chemical composition, quality of materials and systematic maintenance. This paper examines the methods of increasing the lining lifetime in one of the sections of the working lining — the upper cone of the converter for refining ferronickel. The main problems and possible ways to solve them are highlighted. 12 Ref., 2 Tabl., 7 Fig.

Keywords: refining, ferronickel, basic converter, lining, upper cone, lifetime, thermal expansion

Отримано 25.09.2024

Отримано у переглянutoму вигляді 31.10.2024

Прийнято 17.02.2025