



УДК 621.745.45

## IMPLEMENTATION OF GARNISSAGE LINING TECHNOLOGY IN FERRONICKEL REFINING CONVERTER

### ВПРОВАДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ГАРНІСАЖНОГО ФУТЕРУВАННЯ КОНВЕРТЕРА ПРИ РАФІНУВАННІ ФЕРОНІКЕЛЮ

**Akreiev V. V. / Акресв В. В.***postgraduate / аспірант*

ORCID: 0009-0009-3705-4129

**Prykhodko S. V. / Приходько С. В.***postgraduate / аспірант*

ORCID: 0009-0005-0013-2198

**Melnyk S. O. / Мельник С. О.***postgraduate / аспірант*

ORCID: 0009-0009-3964-312X

**Ovcharuk A. M. / Овчарук А. М.***d.t.s., prof. / д.т.н., проф.**Institute of Industrial and Business Technologies, Dnipro, Gagarina avenue, 4, 49000**Інститут промислових та бізнес технологій, м. Дніпро, пр. Гагаріна, 4, 49600*

**Анотація.** Виробництво злитків або гранульованого феронікелю на завершальних етапах технологічного процесу потребує рафінування чорного розплаву у вертикальних основних кисневих конвертерах. Зношення периклазовуглецевого робочого футерування основного конвертера переважно відбувається шляхом розчинення магnezії шлаком, окислення вуглецю в цеглі киснем та вуглекислим газом, а також під впливом комплексу термомеханічних факторів.

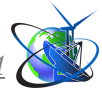
З точки зору застосування прийомів та способів збільшення строків служби футерування, прийнято виділяти наступні характерні режими експлуатації основного конвертера: без проведення поточних ремонтів, періодичне нанесення шлакового гарнісажу з роздуванням газовими струменями після випуску розплаву, торкретування робочого футерування конвертера, підварювання магnezіальномісткими матеріалами найбільш зношених місць робочого футерування.

В цій статті розглянуті питання впровадження такого методу підвищення стійкості периклазовуглецевих вогнетривів, як нанесення захисного гарнісажного шару робочого футерування основного конвертера при рафінуванні феронікелю.

**Ключові слова:** рафінування феронікелю, конвертер, гарнісажне футерування, магnezіальні брикети.

### Вступ

Нікель п'ятий за поширеністю елемент на Землі, який широко зустрічається в земній корі та ядрі, природним чином міститься в ґрунті та воді, є важливим мікроелементом для тварин і рослин. Нікель має унікальний набір фізичних та хімічних властивостей, що робить його незамінним в численних сполуках та матеріалах, його широко застосовують для легування корозійностійких,



жаростійких та жароміцних сталей та як основу для сплавів в поєднанні з хромом та іншими металами:

- має високу температуру плавлення 1453 °С;
- стійкий до корозії та окислення;
- має високу пластичність, нікель ковкий;
- готовий до використання в сплавах;
- магнітний за кімнатної температури;
- може бути нанесений за допомогою гальванізації;
- має каталітичні властивості;
- піддається повній переробці.

Таким чином, майже 66% світового виробництва нікелю витрачається на виплавку нержавіючої сталі, 16% використовується у виробництві електроніки та акумуляторів, сплави кольорових металів - 6%, інші галузі, такі як леговані сталі та ливарне виробництво - 12% [1, 2].

Побужський 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 руди 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 чорнового металу на виході з РТП становить 1360-1480°С. Чорновий феронікель має наступний склад: Ni 10 – 30%; Si 0,1 – 6,0%; С 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 розплаву 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 злитки, масою близько 35 кг або гранулюється [3].

На початку 2000-х років були проведені перші випробування з використанням магнезійних вуглецевмісних пресованих вогнетривів у футеруванні основних конвертерів. Було доведено, що не обпалена цегла на основі MgO може працювати в умовах рафінування феронікелю краще за обпалені вогнетриви. При більш рівномірному та прогнозованому зносі периклазовуглецевої цегли були знижені питомі витрати на футерування [4]. Побузький феронікелевий комбінат встановив тестове робоче футерування основного конвертера для рафінування феронікелю вперше в 2005 році, а з 2008 року почав використовувати периклазовуглецеву цеглу на постійній основі, вдосконалюючи дизайн футерування та впроваджуючи методи догляду за футеруванням, одним з яких є нанесення захисного гарнісажного шару.

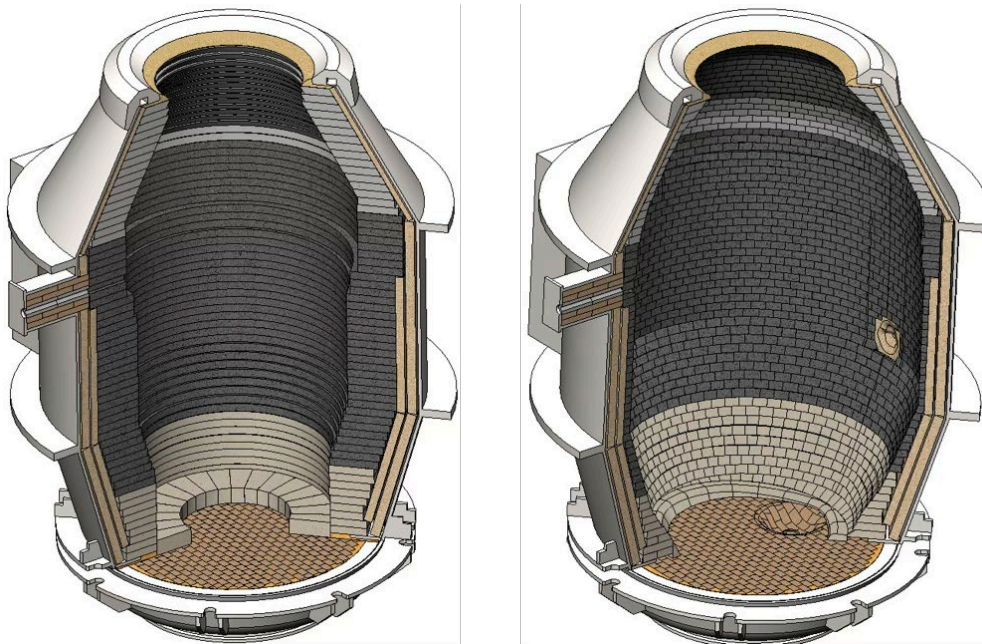
### **Зношення робочого футерування основного конвертера. Підтримка футерування в робочому стані**

Зношення робочого футерування основного конвертера (периклазовуглецевої цегли) більшою мірою спричинене впливом розчинення магнезії шлаком, окисленням вуглецю в цеглі повітрям та CO<sub>2</sub>, а також термомеханічними факторами, що виникають через термічний удар або механічний стрес, викликаний напругою цегляної кладки, ерозією цегли. У зоні подачі металобрухту, в кисневих конвертерах, високий абразивний знос є основним фактором пошкодження вогнетривкої цегли. При подачі з висоти брухт вдаряється об поверхню робочого футерування [4].

Нормальний знос цегли є результатом постійного комплексного впливу наступних явищ: зневуглецювання (шляхом окислення), проникнення сторонніх речовин (після втрати вуглецю, який затримує інфільтрацію), корозійна атака (руйнування відбувається через вплив розплаву) інфільтрованої структури цегли та ерозія матеріалу цегли внаслідок руху метало-шлакової емульсії в конвертері. Крім того, додається періодичний знос - сколювання цегли, що відокремлюються від тіла цеглини через напругу, викликану термічним ударом. Цей процес є



результатом неритмічної роботи агрегату, частих зупинок та глибоких охолоджень [4].



**Рисунок 1 - Моделювання ізометричної проєкції робочого футерування конвертера (зліва) та розгару робочого футерування (справа) після 865 плавок**

На підставі промислового досвіду, з точки зору догляду за футеруванням, прийнято виділяти наступні характерні режими експлуатації основного конвертера, футерованого периклазовуглецевими вогнетривами:

- без проведення поточних ремонтів;
- періодичне нанесення шлакового гарнісажу з вугіллям марки АШ роздуванням газовими струменями після випуску розплаву в розливний ковш;
- періодичне нанесення модифікованих присадками магнезіальномістких добавок (у т. ч. брикетів) кінцевого конвертерного шлаку на футерування роздуванням газовими струменями після випуску;
- торкретування робочого футерування конвертера;
- підварювання магнезіальномісткими матеріалами найбільш зношених місць робочого футерування.



У випадку, якщо на підприємстві є можливість використовувати топографічне сканування (рис. 2) робочого футерування конвертера з метою оперативного контролю поточного профілю, це насамперед дозволяє попередити виникнення аварійних ситуацій, як, наприклад, прогар броні агрегату. Керуючись результатами сканування можливо визначити необхідний спосіб гарячого ремонту конвертера або якоїсь із зон, ґрунтуючись на відхиленні профілю футерування конвертера від оптимального [5].

В основі даного методу оцінки зносу футерування покладено розрахунок величини  $Q_B(i)$  – інтегрального показника динаміки відхилення внутрішньої топографії футерування конвертера від необхідної. Обчислення описується виразами (1) та (2):

$$Q_B(i) = 1/L \sum_{l=1}^L |Q_{Bi}(i)|; \quad (1)$$

$$Q_{Bi}(i) = 1/2H \sum_{h=1}^{2H} |R_{i,n_h}(i) - R_{i,n_h}^T|; \quad (2)$$

де  $i$  - номер плавки на даному футеруванні ( $i = 1, l$ );

$l$  – номер вертикального перерізу конвертера ( $l = 1, L$ );

$n_h$  - номер горизонтального перерізу конвертера ( $n_h = 1 \dots H$ );

$Q_{l,i}(i)$  – значення показника у 1-му перерізі на  $i$ -й плавці;

$R_{l,h}(i)$  – радіус футерування конвертера в точці ( $l$ -м горизонтальному та  $h$ -му вертикальному перерізі) на  $i$ -й плавці;

$R_{i,n_h}^T$  – радіус футерування з необхідним значенням у точці на  $i$ -й плавці.

З метою підтримки футерування в робочому стані та забезпечення необхідної топографії футерування конвертера необхідно виконувати наступні операції гарячого ремонту (коригування профілю) з використанням результатів сканування:

1.  $Q_B < 150$  мм – проводиться роздування кінцевого шлаку з добавками розрахункової кількості магнієвмісних матеріалів з подальшим поворотом конвертера на 90 градусів у бік зливу і завантаження;

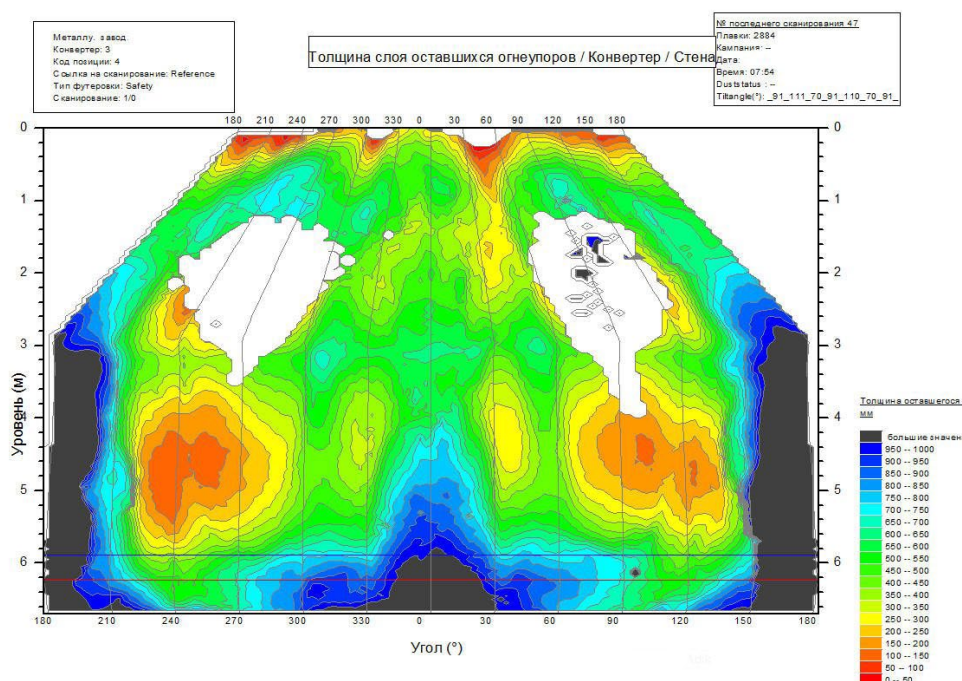
2.  $150 \text{ мм} < Q_B < 200$  мм – проводиться напівсухе торкретування місць та зон найбільш інтенсивного зносу;

3.  $200 \text{ мм} < Q_B < 300$  мм – проводиться торкретування з нанесенням великих



обсягів вогнетривких мас на площу до 50% поверхні футеровки товщиною до 100-150 мм;

4.  $Q_B > 300$  мм, то здійснюється підварювання MgO-вмісними матеріалами.



**Рисунок 2 - Топограма стін 160 тн кисневого конвертера на 2884 плавці**

Для покращення роботи захисного шлаку, що наноситься роздуванням на футерування основного конвертера, було розроблено технологію підготовки шлаку шляхом його модифікування спеціальною магнезійною сировиною у вигляді брикетів. При контакті брикетів в конверторі з розплавленим шлаком відбувається їх інтенсивна деструкція та швидка асиміляція шлаком дисперсного оксиду магнію. Збагачений таким шляхом шлак роздувається через кисневу фурму струменем азоту та застигає на робочій поверхні футерування, утворюючи рівномірний термостійкий шар додаткового гарнісажного футерування. Тривалість операції роздування шлаку становить 1-3 хв.

При регулярному застосуванні магнезійних брикетів та нанесенні захисного гарнісажу підвищується стійкість основного футерування та збільшується ресурс роботи конвертера. Технологія використання магнезійних брикетів була успішно випробувана та впроваджена в серійне виробництво.



Важливо отримувати необхідний склад шлаку з оптимальним співвідношенням легкоплавких і тугоплавких фаз. Легкоплавка фаза забезпечує адгезію шлаку до вогнетриву, а тугоплавка забезпечує стійкість до механічного та хімічного впливу. В ідеалі товщина і стійкість шару нанесеного шлакового покриття повинна компенсувати швидкість зносу футеровки [6].

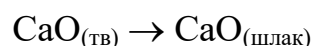
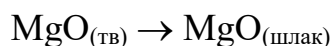
### **MgO брикети з високим вмістом CaO**

Для збільшення терміну служби робочого шару футерування конвертера (не менш, ніж 600 плавок), наближаючи концентрацію MgO у шлаку до рівноважної, рекомендується застосовувати магнезіальні брикети з високим вмістом кальцію марки RM85C (рис. 3), з наступними фізико-хімічними показниками:

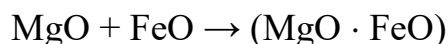
MgO	84,0 - 86,0	%
CaO	≥10,0	%
SiO <sub>2</sub>	≤ 4	%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	≤ 0,8	%

Втрати при прожарюванні - 15% від ваги.

MgO і CaO частково розчиняються в рідкій фазі шлаку при температурі 1600–1700 °С, розчинення переважно обмежено насиченням шлаку (для MgO):



В окисленому шлаку магнезіальна добавка (оксид магнію) в першу чергу реагує з найактивнішим компонентом – оксидом заліза, в результаті чого утворюється магнезіовустіт (феропериклаз) — високотемпературна, тугоплавка сполука:

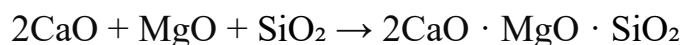
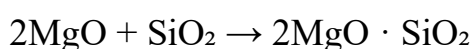
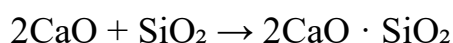


Насичення шлаку тугоплавкими сполуками MgO·FeO і MgO·Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> з температурами плавлення відповідно 1830 °С і 1730 °С сприяє досягненню такого ефекту, як зниження активності FeO, зменшення агресивності шлаку, скорочення різниці концентрацій MgO в периклазовуглецевих вогнетривах та в шлаку, а також підвищення термостійкості захисного шлакового гарнісажу [7].



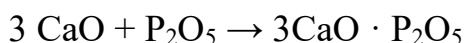
**Рисунок 3 - Магнезіальні брикети з високим вмістом кальцію марки RM85C**

Оксиди магнію та кальцію з брикетів RM85C реагують з кремнеземом конверторного шлаку як на пряму, так і сумісно:



При цьому відбувається зниження активності  $\text{SiO}_2$  і зростання основності, в'язкості шлаку. Формування стабільних твердих фаз у шлаку при насиченні  $\text{MgO}$  «переводить» шлак з агресивного рідкого стану в частково кристалізований захисний.

Додатково зростання  $\text{CaO}$  та зниження вмісту  $\text{FeO}$  побічно сприяє стабілізації фосфатів:



В результаті додавання брикетів з  $\text{MgO}$  і  $\text{CaO}$  формується сумарний технологічний ефект по насиченню шлаку  $\text{MgO}$ , зниженню активності  $\text{FeO}$ , зменшуючи знос периклазовуглецевого робочого футерування, стабілізує шлаковий режим, підвищує теплову стабільність шлаку. При вмісті  $\text{FeO}$  в шлаку  $> 18\text{--}20\%$ ,  $\text{MgO}$  активно розчиняється, маючи слабкий захисний ефект. При  $\text{FeO}$  в шлаку  $< 15\%$ ,  $\text{MgO}$  швидше насичує шлак, досягаючи захисного ефекту.



Після роздування шлаку азотом необхідно отримати суцільний, рівномірно розподілений по всій поверхні футерування шлаковий гарнісаж [8]. Відомо, що основні кінцеві шлаки, що містять менше 8% MgO, при введенні доломіту або вапна для загушення шлаку, не забезпечують формування зносостійкого гарнісажу, оскільки вони на 90% знаходяться в області насичення CaO і характеризуються високим вмістом низькотемпературних фаз – феритів кальцію  $\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$  і  $2\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$  з температурою плавлення 1215 і 1440 °C відповідно. В результаті формується гарнісажний шар, що має низьку ерозійну стійкість і практично не захищає футерування [7].

Система MgO–FeO–CaO–SiO<sub>2</sub> являє собою багатокомпонентний базовий шлак, де FeO — найагресивніший компонент, SiO<sub>2</sub> — кислотоутворюючий, CaO — елемент, що виконує рафінуючу функцію, MgO — буфер для підтримки футерування. MgO майже не знижує FeO безпосередньо, але знижує його активність через фазові рівноваги. Чистий MgO (периклаз) з температурою плавлення  $T_{\text{пл}} \approx 2800$  °C розчиняється повільно, а при локальному введенні може призвести до перенасичення шлаку з різким зростанням в'язкості, можливою локальною кристалізацією, і «холодними» зонами. CaO, взаємодіючи зі шлаком, працює в трьох напрямках одночасно - зв'язує SiO<sub>2</sub>, знижує кислотність шлаку, зменшує розчинність MgO, «витісняє» FeO із силікатів, знижуючи його активність, перешкоджає ерозії MgO з футерування конвертера. Таким чином, наявність CaO утворює рідку фазу CaO–SiO<sub>2</sub>, а MgO працює в стабілізованому шлаку.

### **Застосування брикетів**

Присадку брикетів слід проводити порціями по 180-200 кг на залишок шлаку після плавки, призначеного для азотного роздування. При нарощуванні шлакового гарнісажу робочого футерування конвертера (або нарощуванні дна конвертера) достатньої товщини допускається зниження дозування або скасування додавання магнезійних брикетів. Таке рішення затверджується керівником КР.

Шлакове торкретування феронікелевого конвертера – нанесення на робоче



футерування конвертера тонкого шару спеціальної шлакової маси, підготовленого конвертерного шлаку, для його відновлення, зміцнення та подовження ресурсу агрегата в цілому. Шлакове торкретування необхідно проводити після випуску феронікелю.

Проведення шлакового торкретування із застосуванням магнезіальних брикетів варто виконувати після кожної плавки у початковий період кампанії (перші 10 плавок), а також у наступний період, залежно від стану робочого футерування конвертера. У період з 11-ї по 449-ю плавки проводиться шлакове торкретування футерування конвертера із застосуванням як присадки вуглецевмісних матеріалів, як то вугілля, та/або вапняку. Допускається у цей період проведення разових торкретувань із використанням високомагнезіальних брикетів за рішенням відповідного персоналу.

Підготовка конвертерного шлаку перед його роздуванням на робоче футерування повинна проводитися наступним чином:

- після випуску феронікелю з конвертера необхідно проводити додаткову присадку брикетів та/або вапняку та вуглецевмісних матеріалів, з метою здійснення коригування стану шлаку та його хімічного складу. Масова витрата цих флюсів встановлює конверторник з урахуванням стану поверхні робочого шару футерування конвертера, стану та маси залишеного в конвертері шлаку;

- для нанесення шлакового гарнісажу на робоче футерування шоломової частини і горловини конвертера необхідно забезпечувати рідкіший шлак, а для нанесення на футеровку циліндричної частини і днища конвертера - густіший.

- для підвищення стійкості шлакового гарнісажу на футеруванні конвертера, у разі отримання переокисленого шлаку, необхідно проводити розкислення шлаку перед роздуванням шляхом присадки вугілля марки АШ (антрацит штиб) з масовою витратою 50-100 кг/плавку (Таблиця 1).

**Таблиця 1 - Хімічний склад вугілля**

Марка	C, %	S, %	Зола, %	Леткі, %	Волога (W), %	Фракція, мм
АШ	≥ 70,0	≤ 1,5	≤ 18,0	≤ 8,0	≤ 9,0	0-6



-у разі отримання «густих» кінцевих шлаків, для отримання однорідності та поліпшення їхньої рідкорухливості, проводиться їх попередня роздування киснем протягом 1 – 1,5 хв, після чого проводиться роздування азотом.

Шлак повинен роздуватися азотом, що подається через кисневу фурму. Присадку матеріалів для модифікування шлаку слід проводити до початку роздування шлаку азотом. При азотному роздуванні рекомендується періодично змінювати положення фурми. Тривалість проведення операції шлакового торкретування повинна становити від 2 до 4 хвилин, при цьому роздування шлаку необхідно припинити при зниженні інтенсивності винесення бризок шлаку з конвертера і різкому посиленні звукового ефекту струменя азоту, що витікає з сопла фурми.

Після виконання операції роздування, при необхідності, додатково повинна проводитися операція ошлакування футерування конвертера залишками шлаку шляхом похитування конвертера. Залишки невикористаного шлаку мають бути злиті в шлакову чашу. За наявності резерву робочого часу, після проведення операції шлакового торкретування футерування конвертера, необхідно проводити витримку конвертера у вертикальному положенні протягом 2-3 хвилин для остигання та зміцнення нанесеного шлакового гарнісажу.

Наведена вище інформація щодо кількості добавок передбачають вміст нікелю у чорновому феронікелі не менше, ніж 16%. При зниженні вмісту нікелю необхідно скоректувати технологію шлакового торкретування.

## **Висновки**

Впровадження методу гарнісажного футерування конвертера у поєднанні з відпрацьованою технологією застосування є одним з найбільш актуальних та ефективних методів підвищення стійкості футерування основного конвертера при рафінуванні феронікелю.

1. Використання магnezіальних кальційвмісних брикетів з високим вмістом кальцію марки RM85C разом з вугіллям марки АШ допомогли запобігти виникненню аварійних ситуацій при експлуатації основного конвертера.

2. Використання брикетів дозволило скоротити простої агрегату на 10%.



3. Збільшення тривалості кампанії конвертера за рахунок зниження зносу футерування дозволило зменшити витрати на енергоносії до 5%, трудовитрати на передчасну ломку та футерування агрегату на 14%.

4. Технологія гарнісажного футерування має значний економічний ефект в умовах виробництва ТОВ «Побузький феронікелевий комбінат» за рахунок підвищення стійкості агрегату.

5. За фактом впровадження технології гарнісажного футерування в умовах комбінату, було рекомендовано наступні кампанії конвертерів проводити з використанням даної методики.

### Література

1. Факти про нікель: <http://www.nickelinstitute.org>; 07.01.2026.
2. Нікель: <https://en.wikipedia.org/wiki/Nickel>; 07.01.2026.
3. Опис виробництва феронікелю на ТОВ «ПФК»: <https://pfk.com.ua/>; 07.01.2026.
4. Dr. Thomas Schemmel, Lutz Schade, Panagiotis Kouzoupis, Faruk Beqiri: Magnesia-Carbon Refractory Lining For Ferronickel Converters - Optimization And Lining Improvement At Newco Ferronikeli (Cosovo), Refratechnik Steel GmbH, Duesseldorf, Germany; Newco Ferronikeli Complex LLC, Cosovo; INFACON; 2013.
5. Петрунін, С. М. Про спільний синтез об'єктів та керуючих систем [Текст] / С. М.Петрунін, Л. П.Мишляєв // Системи управління та інформаційні технології - 2007. - Вип. 3 (29). - С.185-187.
6. Манашев І. Р., Степанова А. А. «Практика застосування магнезійних флюсів у киснево-конвертерному процесі», «Металургія сталі», 2017 р.
7. Застосування високомагнезійних флюсів у конвертерному цеху ПАТ «МК «Азовсталь»/Є.С. Попов [та ін] // Сталь. – 2015. – № 4. - С. 16-20.
8. Дідковський, В.К. Використання магнезійних шлакоутворюючих матеріалів для підвищення стійкості футерування кисневих конвертерів / В.К. Дідковський, Є.В. Третьяков. - М.: Черметінформація, 1985. - 23 с.



**Abstract.** The production of ingot or granulated ferronickel at the final stages of the technological process requires refining of the crude melt in vertical basic oxygen converters. The brick wear of the basic converter MgO–C working lining is mainly caused due to solubility attack of magnesia by slag, oxidation of carbon in the refractory brick by air and carbon dioxide, as well as combined action of thermomechanical factors.

From the perspective of applying techniques and methods aimed at extending lining service life, the following characteristic operating practices of the basic converter can be distinguished: operation without intermediate repairs, periodic formation of a protective garnissage coating by gas blowing after metal tapping, gunning of the working lining and local hot repairs of the most intensively worn areas using magnesia-containing materials.

This paper examines the application of a lining maintenance technique based on the formation of a protective garnissage slag coating layer on the working lining of the basic converter during ferronickel refining.

**Keywords:** ferronickel refining, converter, garnissage lining, magnesia briquettes.

Науковий керівник: д.т.н., проф. Овчарук А. М.

Статтю надіслано: 18.02.2026 р.

© Акресв В. В.