136 МЕТАЛУРГІЯ

УДК 669.184:666.762 doi: 10.31498/2225-6733.46.2023.288166

© Стоянов О.М.[1], Нізяєв К.Г.[2], Малій Х.В.[3], Кухар В.В.[4]

ЗАСТОСУВАННЯ ВОГНЕТРИВКИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ СТАЛЕРОЗЛИВНОГО КОВША

Виконано аналіз умов служби вогнетривів та різні варіанти комбінованого футерування сталерозливних ковшів, які експлуатуються в сталеплавильних цехах з відділеннями позапічної обробки сталі, а також визначено основні тенденції її розвитку. Розглянуті технологічні умови експлуатації сталерозливних ковшів з основною футеровкою, а також визначено причини недостатньої стійкості вогнетривів. Показано, що світова практика характеризується використанням та інтенсивним удосконаленням основної футеровки сталерозливних ковшів за рахунок використання нових матеріалів з підвищеними вогнетривкими та експлуатаційними характеристиками.
Ключові слова: *футерування, вогнетрив, сталерозливний ківш, позапічна обробка сталі, нові матеріали, експлуатаційні характеристики.*

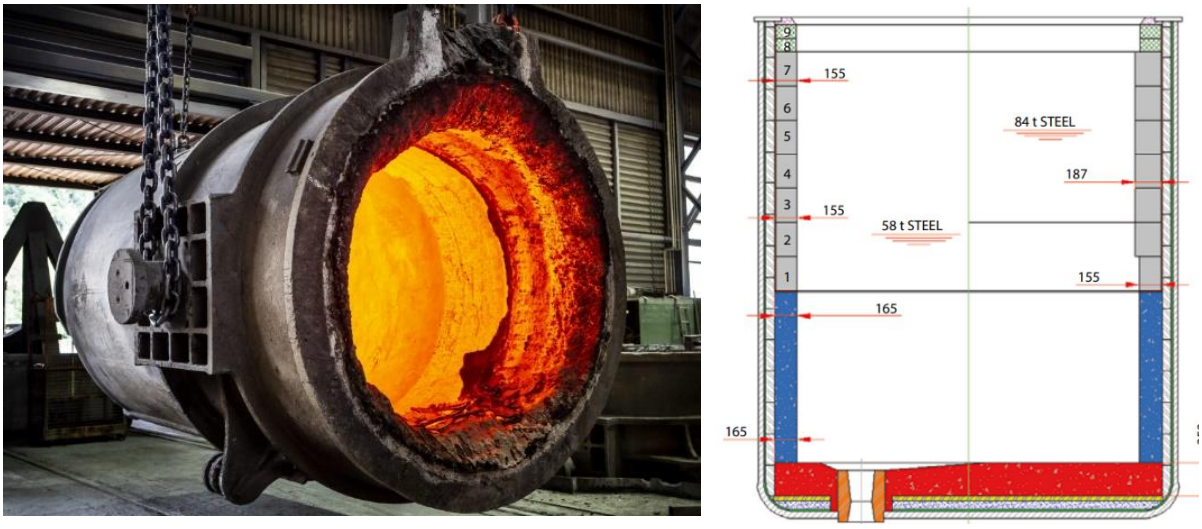
O.M. Stoianov, K.H. Niziaev, Kh.V. Malii, V.V. Kukhar. Application of refractory materials for steel ladles. *The article analyzes the service life of refractories and various options for combined lining of steel ladles used in steelmaking shops with out-of-furnace steel processing departments, and identifies the main trends in its development. The use of various types of lining is analyzed based on the experience of Japan, Germany, Austria, and France. The technological conditions of operation of steel ladles with the main lining are considered. Under operating conditions, the lining areas near the slag belt and the place where the jet hits the bottom of the ladle are subject to the greatest destruction, so it is advisable to install high-quality refractories in these areas. In addition, the reasons for the insufficient stability of refractories are identified, including decarburization, corrosion, ladle slag formed during out-of-furnace metal processing, the use of synthetic additives to slag, high thermal conductivity of refractory materials during operation, and others. Ways to increase the service life of steel ladles are identified. It is shown that the world practice is characterized by the use and intensive improvement of the main lining of steel ladles through the use of new materials with increased refractory and operational characteristics. The experience of refractory improvement by Shinagawa Refractories, TYK Corp, Plibrico, Nippon Steel, Krosaki Harima, and IPSCO Steel, including practical testing at production, is presented. It is established that the high cost of consumables and increased requirements for manufacturing technology hinder the massive introduction of the developed technologies at metallurgical enterprises.*
Key words: *lining, refractory, steel ladle, post-bake treatment of steel, new materials, operational characteristics.*

[1] *канд. техн. наук, доцент, ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», м. Запоріжжя, ORCID: 0000-0002-7136-7403, alexander.stoyanov@mipolytech.education*
[2] *д-р техн. наук, професор ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», м. Запоріжжя, ORCID: 0000-0002-9260-0964, konstantin.nizyaev@mipolytech.education*
[3] *канд. техн. наук, доцент, ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», м. Запоріжжя, ORCID: 0000-0002-9046-4268, kristina.maliy@mipolytech.education*
[4] *д-р техн. наук, професор ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», м. Запоріжжя, ORCID: 0000-0002-4863-7233, kvv.mariupol@gmail.com*

Постановка проблеми. Стрімкий розвиток на металургійних підприємствах позапічної обробки та пов'язане з цим перенесення частини операцій з плавильного агрегату до сталерозливного ковша призвело до того, що ківш став одним з основних технологічних агрегатів. Внаслідок цього суттєво збільшилася тривалість перебування рідкого металу та шлаку в ковші, у зв'язку з чим зросло теплове навантаження на футерування ковша та збільшився його знос. Це послужило імпульсом для інтенсифікації досліджень створення нових вогнетривких матеріалів і використанням диференційної футерування з підвищеними експлуатаційними характеристиками.

Постановка завдання. Визначення основних тенденцій розвитку в напрямку способів футерування сталерозливних ковшів і аналіз умов експлуатації вогнетривких матеріалів при позапічній обробці металу.

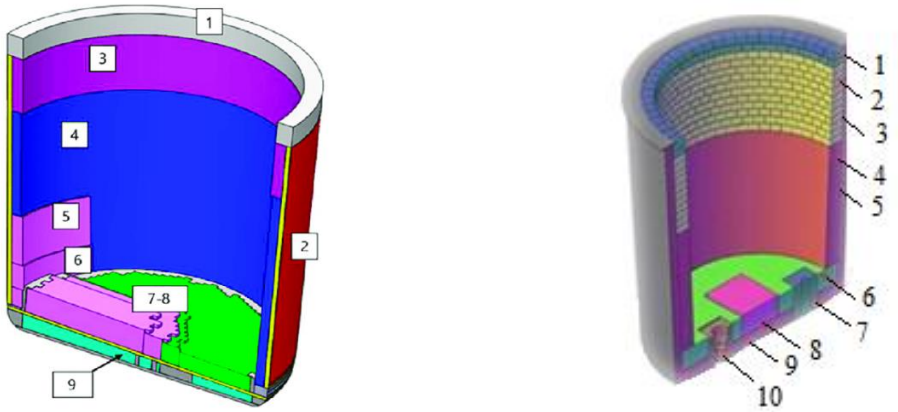
Аналіз останніх досліджень і публікацій. Одним із лідерів з виробництва високоякісних матеріалів для футеровок сталеплавильних агрегатів традиційно вважається Японія [1], а також деякі європейські країни, такі як Німеччина, Австрія, Франція [2-5]. Успіхи Японії пов'язані, перш за все, з розробкою монолітних футеровок для стальковшів (рис. 1). У Європі, зокрема в Україні, продовжують домінувати футерування з формованих вогнетривів, хоча надалі не виключена можливість переходу на монолітні футерування через їх більш високу ефективність [6].



а б

Рис. 1 – Сталерозливний ківш з монолітною футерівкою (а) [7] і комбінованою футерівкою (б) [8]

Застосування комбінованого футерування (рис. 2) викликано різними умовами служби вогнетривів у певних ділянках ковша. Як відомо [7], найбільшому руйнуванню піддаються ділянки футерування в районі шлакового поясу та місці удару струменя по дну ківша, тому доцільно на цих ділянках встановлювати високоякісні вогнетриви, здатні протистояти як хімічній, так і фізичній корозії [9]. Як правило, шлаковий пояс ковша виконується з периклазовуглецевих вогнетривів, а стіни ковша – з високоміцних матеріалів, що мають високу температуру деформації.



а б

Рис. 2 – Варіанти диференційного (комбінованого) футерування ківша: (а) – за джерелом [10]: 1 – верхній шар бетону; 2 – боковий теплоізоляційний шар; 3 – шлаковий пояс; 4 – робочий шар; 5–6 – пристінна цегла; 7–8 – донний шар; 9 – нижній теплоізоляційний шар; (б) – за джерелом [11]: 1, 4, 6 – робочий шар; 2 – шлаковий пояс; 3, 5 – боковий теплоізоляційний шар; 7 – блок для подачі газів; 8 – «бійне» місце; 9 – нижній теплоізоляційний шар; 10 – гніздова цегла

Виклад основного матеріалу. На вітчизняних та закордонних металургійних комбінатах застосовують диференційне футерування сталерозливних ковшів, яке складається з периклазовуглецевих (шлаковий пояс) та алюмопериклазовуглецевих вогнетривів (стіни). Вогнетриви шлакового поясу виготовлені на основі плавленого периклазу чистотою не менше 98%, який має високу опірність як до первинних конвертерних, так і до вторинних ковшових шлаків. Ще однією з переваг даного типу вогнетривів є їх слабка змочуваність шлаком.

Руйнування футерівки в процесі роботи на початковому етапі пов'язане з зневуглецюванням. Подальшою стадією зношування є перехід корунду в шлак при його взаємодії з вапняною, залізистою та силікатною складовими шлакового розплаву [12].

Також застосовують і більш складну схему футерування, яка виглядає наступним чином: днище – алюмопериклазовуглецева (робочий шар у «бійній» частині) та периклазохромітова цегла (в іншій частині); стіни – високоглиноземна набивна маса (робочий шар); шлаковий пояс – периклазовуглецева цегла (робочий шар). Такий варіант футеровки забезпечує стійкість понад 50 наливів за умов повного циклу позапічної обробки сталі.

Можливе використання спечених периклазовуглецевих вогнетривів при футеруванні сталерозливного ковша. Для футерування ділянки шлакового поясу застосовується крупнокристалічний периклаз з вмістом MgO близько 98%. Для днища ковша застосовують вогнетриви алюмопериклазовуглецевого складу з використанням алюмомагнезіальної шпінелі, що містить 28% MgO та 72% Al_2O_3. Застосування цих видів вогнетривів дозволило досягти стійкості стін більше 110 плавок (при використанні гарячих ремонтів).

Деякі закордонні металургійні підприємства для кладки стін використовують формовані Al_2O_3–MgO–C вогнетриви. Вибір таких вогнетривів базується на їхніх службових характеристиках за певних умов експлуатації. Перевага даному виду футеровки надається, в першу чергу, через нижчі витрати на матеріали та футерування.

Як відомо, на термін служби футерівки сталерозливних ковшів істотно впливає ковшовий шлак, що утворюється під час позапічної обробки металу [13]. Багато сучасних металургійних підприємств до етапу позапічної обробки здійснюють відсікання конвертерного шлаку з подальшою добавкою в ківш легкоплавких синтетичних матеріалів на основі CaO, CaF_2 і, в деяких випадках, Al_2O_3 в різних співвідношеннях. Такі синтетичні шлаки виявляють підвищену агресивність по відношенню до основної футеровки сталерозливних ковшів, тому при виборі складу шлакової суміші прагнуть так підібрати матеріали, щоб зберегти високу здатність рафінування шлаку і, в той же час, знизити його негативний вплив на знос вогнетриву. Наприклад, на деяких

вітчизняних підприємствах при використанні на етапі позапічної обробки на установці ківш-піч, для наведення рафінувального шлаку вводять не менше 10 кг/т вапна, 1,5 кг/т плавикового шпату та алюмінію. При використанні шлаку, що містить 0,5-0,8% FeO; 0,1-0,5% MnO; 0,9-1,2% ∑(FeO+MnO), основністю не менше ніж 3,0 та попередньому розкисленні шлаку алюмінієвим дротом або катанкою з витратами близько 1,0 кг/т сталі, були покращені можливості з видалення сірки, а також вдалося значно поліпшити умови служби вогнетривкої футеровки.

На заводі «IPSCO Steel» (США) у конструкцію комбінованої футеровки сталерозливних ковшів були впроваджені глиноземомагнезіальнографітові (Al_2O_3–MgO–C) вогнетриви, які замінили доломітові вогнетриви, що традиційно використовуються при футеруванні днища та стін. На даному заводі для прискореної десульфурації використовується рідкий шлак з заданими параметрами, які досягаються шляхом додавання вапна з невеликою кількістю плавикового шпату і оксиду магнію. Ковшевий шлак має наступний склад: CaO – 51%; SiO_2 – 4,5%; MgO – 9%; Al_2O_3 – 25%; Fe_2O_3 – 0,5%. При роботі зі шлаком такого складу стійкість доломітового футерування не перевищувала 40-45 плавок. При заміні доломітових вогнетривів на глиноземомагнезіальнографітові цей показник значно покращився і становив у середньому 100 плавок. Глиноземомагнезіальнографітові вогнетриви не тільки дозволили значно збільшити кампанію ковшів, так і знизити глибину проникнення металу до 5%, що було виявлено при перефутеруванні ковшу.

Одним з напрямків футерування сталерозливних ковшів є використання монолітних футеровок. Зокрема, майже на всіх підприємствах Японії стальковші переведені на монолітне футерування.

Прогрес в галузі вогнетривів пов'язаний, перш за все, з розробкою та використанням низькоцементних вогнетривких бетонів [14-16], сфера застосування яких значно зросла в останні роки. Низькоцементні вогнетриви – високоміцні матеріали, що мають підвищену корозійну стійкість. Найбільшого поширення набули глиноземошпінельні вогнетриви, що містять до 20% шпінелі, 95% Al_2O_3 і 1,7% CaO, а також глиноземомагнезіальні, що містять 5,5% MgO і 1,36% CaO з добавкою 0,5% тонкодисперсного кремнезему. Корозійна стійкість глиноземошпінельного бетону підвищується зі збільшенням вмісту шпінелі [17, 18]. При зростанні вмісту шпінелі понад 30% знижується стійкість бетону до взаємодії зі шлаком. У глиноземошпінельних бетонах шпінель додають у вогнетривку суміш, у той час як у глиноземомагнезіальних вогнетривах шпінель утворюється в результаті взаємодії між вільними оксидами Al_2O_3 і MgO. Зміна вмісту оксиду магнію у бік збільшення сприяє підвищенню корозійностійких властивостей з одночасним зниженням здатності протистояти проникненню шлаку, що може призвести до розтріскування футеровки. Для цього необхідно чітко регулювати вміст оксиду MgO з урахуванням умов роботи вогнетривів. Останнім часом намітилася тенденція переходу від глиноземошпінельних до глиноземомагнезіальних бетонів, що пов'язано з більш високою стійкістю останніх до корозії та проникнення шлаку, а також нижчою вартістю.

Одним з нових матеріалів, що застосовуються при виробництві монолітних футеровок, є шпінельно-периклазовий бетон, створений японською фірмою «Shinagawa Refractories» [19, 20]. Цей матеріал має приблизно такі ж властивості, як глиноземомагнезіальний, але відрізняється тим, що здатний поєднувати як підвищену корозійну стійкість, так і протистояти проникненню шлаку завдяки наявності грубозернистої шпінелі.

Останнім часом викликає інтерес застосування в сталеплавильному виробництві матеріалів на основі алюмомагнезіальної шпінелі, які мають ряд переваг у порівнянні з магнезіальними та корундовими матеріалами з точки зору їх експлуатації.

Істотних успіхів у розробці та застосуванні бетонів для монолітного футерування сталерозливних ковшів, що містять шпінель, досягнуто фірмою «Plibrico» (Німеччина). Низькоцементний бетон, що містить 93% Al_2O_3; 4,8% MgO; 1,2% SiO_2; 0,5% CaO був застосований для футерування не тільки стін і днища, а й для шлакового поясу. З використанням проміжних ремонтів стійкість футерівки перевищила 500 плавок.

Шпінельні бетони з добавкою металевого волокна виявилися придатними і для монолітного футерування днища сталерозливних ковшів. При експлуатації у шлаковому поясі бетони, що містять шпінель, не мають достатньої стійкості до зносу. З метою підвищення стійкості футерування в районі шлакового поясу в Японії розроблені магнезіальноцирконові бетони, що містять 84-85% MgO, 6-8% ZrO_2, що забезпечило підвищені корозійностійкі властивості.

В Австрії активно застосовують монолітне корундове футерування сталерозливних ковшів на основі табулярного глинозему високої якості [21, 22]. Стійкість стінок ковша перевищила 350 плавок при використанні ремонтів у вигляді підливу тієї ж маси. Після видалення формувальних шаблонів (при виготовленні нового футерування) просушка ковша здійснюється протягом 36-48 годин з наступним розігрівом перед початком експлуатації до 1100-1200°С.

Удосконалення магнезіальношпінельних вогнетривів, призначених для футерування ковшів, здійснила японська фірма «TYK Corp». В першу чергу було досліджено ефективність добавки до магнезіальношпінельного матеріалу оксиду титану (TiO_2). Зі збільшенням добавки оксиду титану значно знижувалася пористість вогнетриву, і це стримувало проникнення в нього шлаку. При добавці 2% TiO_2 стійкість футерівки сталерозливного ковша зросла на 10%.

Випробування добавки оксиду хрому (Cr_2O_3) у кількості 2 і 3% також викликало зниження пористості. За результатами фізико-механічних досліджень та вивчення структурного розтріскування для промислових випробувань вибрали матеріал із добавкою 3% оксиду хрому (есколаіт). Порівняльний хімічний склад вогнетриву робочої поверхні показав, що добавка Cr_2O_3 стримує проникнення шлаку у футеровку. Вдосконалений варіант футеровки дає ефект підвищення стійкості на 25%.

Також однією з проблем під час експлуатації ковшів з основною футеровкою є висока теплопровідність вогнетривких матеріалів і, як наслідок, виникає необхідність знижувати тепловтрати при використанні таких видів вогнетривів. Завдання зниження втрат теплоти металом в сталерозливному ковші може вирішуватися за кількома напрямками: раціональна схема експлуатації сталерозливних ковшів, теплоізоляція дзеркала металу, використання футерованих кришок в період розливання сталі і запобігання втрат тепла через шар футеровки, прогрівання ковшу на спеціально обладнаних стендах під час очікування плавки.

Регулювання втрат тепла через стінку ковша шляхом підбору теплопровідності шарів футерування або збільшення її товщини обмежується місткістю ковша, а також його додатковими функціями [23].

З метою зниження втрат теплоти зазвичай зменшують товщину арматурного шару та додають шар теплоізоляційного матеріалу між арматурним шаром та металевим кожухом ковша. У Німеччині отримано позитивний результат при застосуванні теплоізоляції з волокнистих плит на неорганічній зв'язці теплопровідністю при 300 і 600°С – 0,08 і 0,16 Вт/(м·К) відповідно, при товщині плити 12 мм. Однак у процесі розширення футерування при її нагріванні (на стенді розігріву або під час її експлуатації), ці плити можуть стискатися і достатнє охолодження футеровки ковшу може призвести до утворення зазору між арматурним та теплоізоляційним шарами. Одним з варіантів вирішення цієї проблеми є застосування міцних ізоляційних плит з об'ємною стабільністю, яка виключає деформацію під дією футеровки, що розширюється.

Виміри показали, що в останньому випадку при товщині футеровки 287,5 мм (175 мм периклазовуглецева цегла, 25 мм засипка, 75 мм високоглиноземна цегла – арматурний шар, 12,5 мм ізоляційна плита) втрати теплоти при використанні такої ізоляції виявилися на 20% меншими, ніж без неї.

З метою зменшення тепловтрат через шар вогнетриву фірмами «Nippon Steel» та «Krosaki Harima» проведені дослідження щодо зниження теплопровідності та підвищення термостійкості периклазовуглецевої цегли. Удосконалення здійснені шляхом зниження вмісту графіту з метою зменшення теплопровідності та шляхом нанесення на магнезіальні зерна пекового покриття для покращення термостійкості. Пори, що утворилися в результаті цього, сприяли зниженню напруги, пригнічували зростання тріщин і покращували термостійкість.

Нові периклазовуглецеві вироби з 8% графіту були випробувані в промислових умовах з метою визначення їх впливу на падіння температури рідкої сталі в сталерозливному ковші [24, 25]. Величина зниження температури сталі в період між закінченням випуску металу з конвертера і початком розливу впала приблизно на 17°С при зменшенні вмісту графіту в вогнетривах від 12 до 8%, що супроводжувалось зниженням теплопровідності від 20 до 15 Вт/(м·К) при 550°С.

Зведені характеристики вогнетривів наведені в таблиці.

Таблиця

Зведені характеристики вогнетривів

Місце застосування	Назва матеріалу	Склад матеріалу	Стійкість (кількість плавок)	Примітка
1	2	3	4	5
дно ковша	алюмопериклазо–вуглецева цегла	70% Al_2O_3–MgO–10% C	понад 50	–
	периклазохромітова цегла	MgO від 60 мас.% включ., Cr_2O_3 від 4 до 20 мас.% включ.		
стіни ковша	високоглиноземна набивна маса	Al_2O_3		
ділянка шлакового поясу	периклазовуглецева цегла	MgO близько 98%		
ділянка шлакового поясу	спечена периклазовуглецева цегла	крупнокристалічний периклаз з вмістом MgO близько 98%	110	–
дно ковша	алюмопериклазо–вуглецевий вогнетрив	28% MgO та 72% Al_2O_3		
стіни ковша	глиноземомагнезіально–графітові вогнетриви	Al_2O_3–MgO–C	100	нижчі витрати на матеріали та футерування
дно ковша	доломітові вогнетриви	MgO_3, $CaCO_3$	40–45	Для шлаку з хімічним складом: CaO – 51%; SiO_2 – 4,5%; MgO – 9 %; Al_2O_3 – 25%; Fe_2O_3 – 0,5%.
стіни ковша				
монолітне футерування	глиноземошпінельні вогнетриви	до 20% шпінелі, 95% Al_2O_3 і 1,7% CaO	–	Підвищена корозійна стійкість і зниження протистояння проникненню шлаку
	глиноземомагнезіальні вогнетриви	5,5% MgO і 1,36% CaO з добавкою 0,5% тонкодисперсного кремнезему	–	
монолітне футерування	шпінельно–периклазовий бетон	28,2% MgO; 71,8% Al_2O_3	–	Підвищена корозійна стійкість і протистояння проникненню шлаку
дно ковша	низькоцементний бетон	93% Al_2O_3; 4,8% MgO; 1,2% SiO_2; 0,5% CaO	500 плавок	–
ділянка шлакового поясу				
ділянка шлакового поясу	магнезіальноцирконові бетони	84–85% MgO, 6–8% ZrO_2	–	підвищені корозійностійкі властивості
монолітне футерування	корундове футерування	Al_2O_3	350 плавок	–

Продовження таблиці

1	2	3	4	5
монолітне футерування	магнезіальношпінельні вогнетриви	$MgAl_2O_4$, додавання 2% TiO_2	–	стійкість футерування зросла на 10%
монолітне футерування		$MgAl_2O_4$, додавання 2–3% Cr_2O_3		зниження пористості, стійкість футерування зросла на 25%
монолітне футерування	периклазовуглецева цегла	MgO з 8% графіту	–	зниження теплопровідності та підвищення термостійкості

Висновки

Таким чином, світова практика характеризується використанням та інтенсивним удосконаленням основної футеровки сталерозливних ковшів. Переважним на найближче майбутнє стає низькоцементне футерування, що застосовується в Японії та ряді європейських країн. Але висока вартість витратних матеріалів та підвищені вимоги до технології виготовлення стримують її масове впровадження на металургійних підприємствах. Тому найбільш поширеним на сьогодні варіантом для вітчизняних підприємств є комбіноване футерування на основі формованих вогнетривких виробів, що містять оксиди магнію і алюмінію з добавками вуглецю.

Перелік використаних джерел:

1. Kataoka S. Refractories for steelmaking in Japan; Seikoyo taikabutsu no genjo (Nippon ni okeru seikoyo taikabutsu no hensen). *Taikabutsu (Refractories)*. 1996. Vol. 48, iss. 1. Pp. 201-227.
2. Akselrod L., Garten V. An alternative lining of steel ladles: technical and economic aspects. *Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*. 2018. № 12. Pp. 72-80. DOI: https://doi.org/10.32339/0135-5910-2018-12-72-80.
3. Durmashkin A.L., Orlov V.A., Kortek' A.A. Development of designs of slide gates and a combination of refractories for them for steel teeming ladles and tundishes. *Refractories and Industrial Ceramics*. 1993. № 34. Pp. 291-297. DOI: https://doi.org/10.1007/BF01293235.
4. Degradation mechanisms of magnesia-chromite refractories in vacuum-oxygen decarburisation ladles during production of tainless steel / P.T. Jones, B. Blanpain, P. Wollants, R. Ding, B. Hallemans. *Ironmaking and Steelmaking*. 2000. Vol. 27, no. 3. Pp. 228-237. DOI: https://doi.org/10.1179/030192300677525.
5. Boenzi F., Ordieres-Meré J., Iavagnilio R. Life Cycle Assessment Comparison of Two Refractory Brick Product Systems for Ladle Lining in Secondary Steelmaking. *Sustainability*. 2019. Vol. 11. Pp. 1295-1317. DOI: https://doi.org/10.3390/su11051295.
6. A method for steel ladle lining optimization applying thermomechanical modeling and taguchi approaches / A. Hou, S. Jin, H. Harmuth, D. Gruber. *The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society*. 2018. No. 70. Pp. 2449-2456. DOI: https://doi.org/10.1007/s11837-018-3063-1.
7. Koryt'ko N.G., Loginov P.G., Mar'in A.G. Monolithic Lining for Steel-Pouring Ladles. *Metallurgist*. 2005. Vol. 49. Pp. 91-93. DOI: https://doi.org/10.1007/s11015-005-0059-1.
8. Introduction of a Monolithic Working Lining of Steel Ladle / V. Garten, I. Galenko, O. Ziganshina, M. Dzhundiet, K. Strazhkov. *Interceram – International Ceramic Review*. 2019. Vol. 68(S1). Pp. 26-29. DOI: https://doi.org/10.1007/s42411-019-0043-6.
9. Технології підвищення якості сталі. Підручник / О.Г. Величко, О.М. Стоянов, Б.М. Бойченко, К.Г. Нізяєв. Дніпропетровськ: «Середняк Т.К.», 2016. 196 с.
10. Multi-Objective Optimization Design of Ladle Refractory Lining Based on Genetic Algorithm / Y. Sun, P. Huang, Y. Cao, G. Jiang, Z. Yuan, D. Bai, X. Liu. *Front. Bioeng. Biotechnol*. 2022. Vol.10. Pp. 1-18. DOI: https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.900655.
11. Steel Ladle Refractories Damage Causes Procedure. URL: https://www.castablerefractory.com/industry_News/steel–ladle–refractorines–damage–causes.html (дата звернення 15.01.2023).

12. Damage of monolithic refractory linings in steel ladles during drying / N. Schmitt, Y. Berthaud, J. F. Hernandez, P. Meunier, J. Poirier. *British Ceramic Transactions*. 2004. Vol. 103, № 3. Pp. 121-133. DOI: https://doi.org/10.1179/096797804225012873.
13. Use of Neural Networks for Lifetime Analysis of Teeming Ladles / D. Jančar, M. Machů, M. Velička, P. Tvardek, L. Kocián, J. Vlček. *Materials*. 2022. Vol. 15. Pp. 1-15. DOI: https://doi.org/10.3390/ma15228234.
14. Special refractory concrete for steel ladle equalization layer / N. Anglescu, D.N. Ungureanu, V. Bratu, F. Toma. *Scientific Bulletin of' Valahia'University. Materials & Mechanics*. 2019. Vol. 17, № 16. Pp. 13-17. DOI: https://doi.org/10.2478/bsmm-2019-0002.
15. Low-cement dosage refractory concrete with low thermal conductivity / L. Paunescu, E. Volceanov, B.-V. Paunescu, I.M. Surugiu. *Journal of Engineering Studies and Research*. 2022. Vol. 28, № 4. Pp. 98-106. DOI: https://doi.org/10.29081/jesr.v28i4.001.
16. Migal' V.P., Skurikhin V.V., Gershkovich S.I. High-alumina cembor cements for low-cement refractory concretes. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2012. Vol. 53. Pp. 4-8. DOI: https://doi.org/10.1007/s11148-012-9452-z.
17. Effect of spinel content on slag attack resistance of high alumina refractory castables / L.A. Díaz, R. Torrecillas, A.H. de Aza, P. Pena. *Journal of the European Ceramic Society*. 2007. Vol. 27, iss. 16. Pp. 4623-4631. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2007.04.007.
18. Effect of magnesium aluminate spinel content of porous aggregates on cement clinker corrosion and adherence properties of lightweight periclase-spinel refractories / G. Wu, W. Yan, S. Schafföner, X. Lin, S. Ma, Y. Zhai, X. Liu, L. Xu. *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 185. Pp. 102-109. DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.058.
19. Manna S., Chakrabarti T. Comparative Studies on Synthesis and Characterization of Titania and Iron Oxide Doped Magnesia from Indian Salem Magnesite. *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*. 2016. Vol. 4, № 7. Pp. 67-76. DOI: https://doi.org/10.4236/msce.2016.47010.
20. Pacheco G., Gonçalves G.E., Lins V. Qualitative and Quantitative Coating Tests: A Comparison in Magnesia-Spinel Refractory Bricks. *Ceramics*. 2020. Vol. 3(1). Pp. 144-154. DOI: https://doi.org/10.3390/ceramics3010014.
21. Pivinskii Yu. E., Dyakin P. V. Research in the Field of Composite Materials Based on HCBS and Refractory Materials Based on the System Al_2O_3–SiO_2–SiC. Part 4. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2019. Vol. 60, iss. 2. Pp. 29-38. DOI: http://dx.doi.org/10.1007/s11148-019-00325-x.
22. Cement–Free Refractory Concretes. Part 12–2. Siliceous Composition HCBS and Ceramic Concretes / Yu.E. Pivinskii, E.M. Grishpun, A.M. Gorokhovskii, P.V. Dyakin. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2022. Vol. 62. Pp. 640-652. DOI: https://doi.org/10.1007/s11148-022-00655-3.
23. Volkova O., Janke D. Influence of the Lining on the Thermal Behaviour of a Teeming Ladle. *Steel Research International*. 2005. Vol. 76(4). Pp. 313-319. DOI: https://doi.org/10.1002/srin.200506014.
24. Simonov K.V., Zagnoiko V.V., Burdina G.V. Influence of technological parameters on the properties and wear resistance of periclase-carbon refractories. *Refractories*. 1988. Vol. 29. Pp. 734-741. DOI: https://doi.org/10.1007/BF01280348.
25. Semchenko G.D., Povshuk V.V., Starolat E.E. Periclase–Carbon Refractory Properties with a Different Amount of Graphite in the Charge Using Liquid PFR and Graphite as Modifiers. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2016. Vol. 57. Pp. 273-278. DOI: https://doi.org/10.1007/s11148-016-9967-9.

References:

1. Kataoka S. Refractories for steelmaking in Japan; Seikoyo taikabutsu no genjo (Nippon ni okeru seikoyotaikabutsu no hensen). *Taikabutsu (Refractories)*, 1996, vol. 48, iss. 1, pp. 201-227.
2. Akselrod L., Garten V. An alternative lining of steel ladles: technical and economic aspects. *Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*, 2018, № 12, pp. 72-80. doi: https://doi.org/10.32339/0135-5910-2018-12-72-80.
3. Durmashkin A.L., Orlov V.A., Kortek' A.A. Development of designs of slide gates and a combination of refractories for them for steel teeming ladles and tundishes. *Refractories and Industrial Ceramics*, 1993, № 34, pp. 291-297. doi: https://doi.org/10.1007/BF01293235.

4. Jones P.T., Blanpain B., Wollants P., Ding R., Hallemans B. Degradation mechanisms of magnesia–chromite refractories in vacuum–oxygen decarburisation ladles during production of tainless steel. *Ironmaking and Steelmaking*, 2000, vol. 27, № 3, pp. 228-237. doi: https://doi.org/10.1179/030192300677525.
5. Boenzi F., Ordieres-Meré J., Iavagnilio R. Life Cycle Assessment Comparison of Two Refractory Brick Product Systems for Ladle Lining in Secondary Steelmaking. *Sustainability*, 2019, vol. 11, pp. 1295-1317. doi: https://doi.org/10.3390/su11051295
6. Hou A., Jin S., Harmuth H., Gruber D. A method for steel ladle lining optimization applying thermomechanical modeling and taguchi approaches. *The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society*, 2018, № 70, pp. 2449-2456. doi: https://doi.org/10.1007/s11837-018-3063-1.
7. Koryt'ko N.G., Loginov P.G., Mar'in A.G. Monolithic Lining for Steel-Pouring Ladles. *Metallurgist*, 2005, vol. 49, pp. 91-93. doi: https://doi.org/10.1007/s11015-005-0059-1.
8. Garten V., Galenko I., Ziganshina O., Dzhundiet M., Strazhkov K. Introduction of a Monolithic Working Lining of Steel Ladle. *Interceram – International Ceramic Review*, 2019, vol. 68(S1), pp. 26-29. doi: https://doi.org/10.1007/s42411-019-0043-6.
9. Velychko O.H., Stoianov O.M., Boichenko B.M., Niziaiev K.H. *Technologies for improving the quality of steel. Textbook*. Dnipropetrovsk, «T.K. Srednyak» Publ., 2016. 196 p. (Ukr.)
10. Sun Y., Huang P., Cao Y., Jiang G., Yuan Z., Bai D., Liu X. Multi-Objective Optimization Design of Ladle Refractory Lining Based on Genetic Algorithm. *Front. Bioeng. Biotechnol*, 2022, vol.10, pp. 1-18. doi: https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.900655.
11. Steel Ladle Refractories Damage Causes Procedure Available at: https://www.castablerefractory.com/industry_News/steel–ladle–refractorines–damage–causes.html (accessed 15 January 2023).
12. Schmitt N., Berthaud Y., Hernandez J. F., Meunier P., Poirier J. Damage of monolithic refractory linings in steel ladles during drying. *British Ceramic Transactions*, 2004, vol. 103, № 3, pp. 121-133. doi: https://doi.org/10.1179/096797804225012873.
13. Jančar D. Machů M. Velička M. Tvardek P. Kocián L. Vlček J. Use of Neural Networks for Lifetime Analysis of Teeming Ladles. Materials, 2022, vol. 15, pp. 1-15. doi: https://doi.org/10.3390/ma15228234.
14. Anglescu N., Ungureanu D.N., Bratu V., Toma F. Special refractory concrete for steel ladle equalization. *Scientific Bulletin of'Valahia'University. Materials & Mechanics*, 2019, vol. 17, № 16, pp. 13-17. doi: https://doi.org/10.2478/bsmm-2019-0002.
15. Paunescu L., Volceanov E., Paunescu B.-V., Surugiu I.M. Low-cement dosage refractory concrete with low thermal conductivity. *Journal of Engineering Studies and Research*, 2022, vol. 28, № 4, pp. 98-106. doi: https://doi.org/10.29081/jesr.v28i4.001.
16. Migal' V.P., Skurikhin V.V., Gershkovich S.I. High–alumina cembor cements for low–cement refractory concretes. *Refractories and Industrial Ceramics*, 2012, vol. 53, pp. 4-8. doi: https://doi.org/10.1007/s11148-012-9452-z.
17. Díaz L.A., Torrecillas R., Aza A.H., Pena P. Effect of spinel content on slag attack resistance of high alumina refractory castables. *Journal of the European Ceramic Society*, 2007, vol. 27, iss. 16, pp. 4623-4631. doi: https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2007.04.007.
18. Wu G., Yan W., Schafföner S., Lin X., Ma S., Zhai Y., Liu X., Xu L. Effect of magnesium aluminate spinel content of porous aggregates on cement clinker corrosion and adherence properties of lightweight periclase-spinel refractories. *Construction and Building Materials*, 2018, vol. 185, pp. 102-109. doi: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.058.
19. Manna S., Chakrabarti T. Comparative Studies on Synthesis and Characterization of Titania and Iron Oxide Doped Magnesia from Indian Salem Magnesite. *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*, 2016, vol. 4, № 7, pp. 67-76. doi: https://doi.org/10.4236/msce.2016.47010.
20. Pacheco G., Gonçalves G.E., Lins V. Qualitative and Quantitative Coating Tests: A Comparison in Magnesia-Spinel Refractory Bricks. *Ceramics*, 2020, vol. 3(1), pp. 144-154. doi: https://doi.org/10.3390/ceramics3010014.
21. Pivinskii Yu.E., Dyakin P.V. Research in the Field of Composite Materials Based on HCBS and Refractory Materials Based on the System Al_2O_3–SiO_2–SiC. Part 4. *Refractories and Industrial Ceramics*, 2019, vol. 60, iss. 2, pp. 29-38. doi: http://dx.doi.org/10.1007/s11148-019-00325-x.

22. Pivinskii Y.E., Grishpun E.M., Gorokhovskii A.M. Cement-Free Refractory Concretes. Part 12–2. Siliceous Composition HCBS and Ceramic Concretes. *Refractories and Industrial Ceramics*, 2022, vol. 62, pp. 640-652. doi: https://doi.org/10.1007/s11148-022-00655-3.
23. Volkova O., Janke D. Influence of the Lining on the Thermal Behaviour of a Teeming Ladle. *Steel Research International*, 2005, vol. 76(4), pp. 313-319. doi: https://doi.org/10.1002/srin.200506014.
24. Simonov K.V., Zagnoiko V.V., Burdina G.V. Influence of technological parameters on the properties and wear resistance of periclase-carbon refractories. *Refractories*, 1988, vol. 29, pp. 734-741. doi: https://doi.org/10.1007/BF01280348
25. Semchenko G.D., Povshuk V.V., Starolat E.E. Periclase-Carbon Refractory Properties with a Different Amount of Graphite in the Charge Using Liquid PFR and Graphite as Modifiers. *Refractories and Industrial Ceramics*, 2016, vol. 57, pp. 273-278. doi: https://doi.org/10.1007/s11148-016-9967-9.

Рецензент: М.М. Бойко
канд. техн. наук, доц., УДУНТ

Стаття надійшла 20.02.2023
Стаття прийнята 23.03.2023

УДК 622.2:622.7 **doi: 10.31498/2225-6733.46.2023.288168**

© Кривенко В.В.[1], Чупринов Є.В.[2], Олійник Т.А.[3], Харітонов В.М.[4], Скляр Л.В.[5]

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПРОБИ ЕФІОПСЬКОЇ ЗАЛІЗНОЇ РУДИ АРАВІЙСЬКО-НУБІЙСЬКОГО ЩИТА. ЧАСТИНА 2. МІКРОСКОПІЧНИЙ АНАЛІЗ ПРОБ РУДИ +40,0+5,0 мм

Уточнений мінеральний склад різновидів із матеріалу класів крупності 10-20 мм і 20-40 мм досліджуваної проби руди. Підготовлені прозорі та поліровані шліфи вищеназваних гранулометричних. Проведене мікроскопічне вивчення за допомогою мікроскопу прохідного та відбиваючого світла «Carl Zeiss Jena NU-2 Microscope». Виявлено, що основними рудними мінералами дослідженої руди є дисперсний гематит та гідрогематит, а їх кількість складає близько 54,0 % від загального обсягу. Показано, що другорядними рудними мінералами у досліджуваній сировині є гетит та гідрогетит. Виявлено, що основним нерудним мінералом в досліджуваній сировині є кварц, вміст котрого становить у середньому 30 %. Показана наявність другорядного нерудного мінералу, який має глинисті властивості та представлений каолінітом.

Ключові слова: *залізна руда, аравійсько-нубійський щит, мікроскопічний аналіз, мінералогія, вміст заліза.*

[1] *канд. техн. наук, доцент, Навчально-науковий технологічний інститут Державного університету економіки і технологій, м. Кривий Ріг, ORCID: 0000-0001-7822-6358*
[2] *канд. техн. наук, доцент, Навчально-науковий технологічний інститут Державного університету економіки і технологій, м. Кривий Ріг, ORCID ID: 0000-0001-8605-3434, itchupa@gmail.com*
[3] *д-р техн. наук, професор, Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг, ORCID: 0000-0002-0315-7308*
[4] *канд. техн. наук, доцент, Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг, ORCID: 0000-0002-3358-479X*
[5] *канд. техн. наук, доцент, Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг, ORCID: 0000-0002-2721-1436*