

УДК 669.162

Ю. С. Семенов¹, к.т.н., с.н.с., зав. відділу, ORCID 0000-0003-2299-5742**В. В. Горупаха**¹, н.с., ORCID 0000-0003-0531-1871**С. В. Ващенко**¹, к.т.н., с.н.с., ст. досл., ORCID 0000-0001-8344-961X**О. Ю. Худяков**¹, к.т.н., с.н.с., ст. досл., ORCID 0000-0002-6507-1120**Є. І. Шумельчик**¹, к.т.н., с.н.с., ст. досл., ORCID 0000-0001-5350-6425**К. В. Баюл**¹, д.т.н., с.н.с., ст. досл., ORCID 0000-0003-1426-7956¹ *Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України*

РОЗРОБКА СТАБІЛІЗАЦІЙНИХ ЗАХОДІВ, НАПРАВЛЕНИХ НА ВИВЕДЕННЯ ЦИНКУ З ПРОДУКТАМИ ПЛАВКИ ТА АКУМУЛЮВАННЯ ТИТАНУ В ГОРНІ ДОМЕННОЇ ПЕЧІ

Анотація. У статті представлено результати розробки стабілізаційних заходів, направлених на виведення цинку з продуктами плавки та акумулювання титану в горні доменної печі. Актуальність розробки та використання на практиці таких заходів обумовлена нестабільними паливно-сировинними умовами виробництва чавуну, коли складною та важкоздійсною задачею є їх стабілізація, а також необхідністю подовження кампанії доменних печей у міжремонтний період. Негативний вплив оксидів цинку на стан футерівки шихти доменної печі, який супроводжується настилеутворенням, та перевитрата питомої витрати коксу, яка має місце при циркулюванні цинку в об'ємі доменної печі потребують заходів щодо виведення цинку з продуктами плавки. Запропоновані заходи, що складаються з проведення промивок за розробленим регламентом у період роботи доменної печі на планових дугтєвих параметрах та із забезпеченням необхідного теплового резерву. З метою подовження кампанії доменної печі одним з найбільш поширених прийомів захисту футерівки горна є періодичне введення титановмісних матеріалів в шихту доменних печей. Надходження оксидів титану в піч, як правило, забезпечують використанням у складі аглошихти концентрату ільменіту або спеціально підготовлених брикетів з ільменіту з високим вмістом титану, які можуть вводити безпосередньо до складу доменної шихти. В статті проаналізовано досвід використання в складі доменної шихти титановмісних матеріалів та сформульовані заходи щодо інтенсифікації гарнісажеутворення в горні.

Ключові слова: доменна піч, управління доменною плавкою, тепловий стан, пиловугільне паливо, вміст цинку в шихті, вміст титану в чавуні, промивки горна.

Посилання для цитування: Розробка стабілізаційних заходів, направлених на виведення цинку з продуктами плавки та акумулювання титану в горні доменної печі / Ю. С. Семенов, В. В. Горупаха, С. В. Ващенко, О. Ю. Худяков, Є. І. Шумельчик, К. В. Баюл // *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2023. Вип. 37. С. 139-157. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2023-37-139-157>

Стан проблеми

Головною проблемою доменного виробництва завжди залишається забезпечення максимальної енергоефективності за максимального або заданого рівня виробництва. У умовах, що склалися в останні роки, дана проблема вимагає розробки нових і вдосконалення існуючих рішень, підходів і методів для досягнення поставленої мети. Нестабільність технологічних умов під час виробництва чавуну в останнє десятиліття досягла критичного рівня. Вона полягає, насамперед, в імпортозалежності вугільної галузі, що породжує використання коксу змінної якості та пиловугільного палива з вугілля різних марок, переході від технології з використанням природного газу на технологію із застосуванням пиловугільного палива при використанні природного газу в малих кількостях залежно від сезонних цін на нього, роботі без вдування паливних добавок в особливо кризових періодах [1–5]. Використання залізорудної сировини також носить вкрай нестабільний характер, що полягає в змінному вмісті окатишів у доменній шихті, а також високому варіюванні компонентів агломераційної шихти при застосуванні як вторинних ресурсів, так і при кон'юнктурній зміні співвідношення агломераційної руди і залізорудного концентрату при виробництві агломерату. Таким чином, в існуючих нестабільних паливно-сировинних умовах виробництва чавуну в Україні, коли складною та важкодійсною задачею є їх стабілізація, актуальною задачею є вдосконалення та розробка спеціальних стабілізаційних заходів.

Метою роботи є підвищення ефективності доменної плавки та подовження кампанії доменної печі в змінних технологічних та паливно-сировинних умовах за рахунок розробки стабілізаційних заходів, направлених на виведення цинку з продуктами плавки та акумулювання титану в горні доменної печі.

Основний матеріал дослідження

Виведення цинку з продуктами плавки.

Якість залізорудної сировини визначається як теплофізичними властивостями шихтових матеріалів, рівнем вмісту заліза і шлакоутворюючих компонентів, так й наявністю в них компонентів, які погіршують їх технологічні властивості. До них, насамперед, відносяться оксид цинку та оксиди лужних металів [6, 7]. Цинк, потрапляючи в ДП з шихтою, відновлюється в нижній частині шахти та розпарі, випаровується, а потім у міру руху з пічними газами у верхню частину печі відкладається у футерівці та гарнісажі; інша частина цинку конденсується в шихті (ця частина бере участь у циркуляції цинку в печі), а частина виноситься з печі колошниковими газами і вловлюється в системі газоочищення (рис. 1) [8–10].

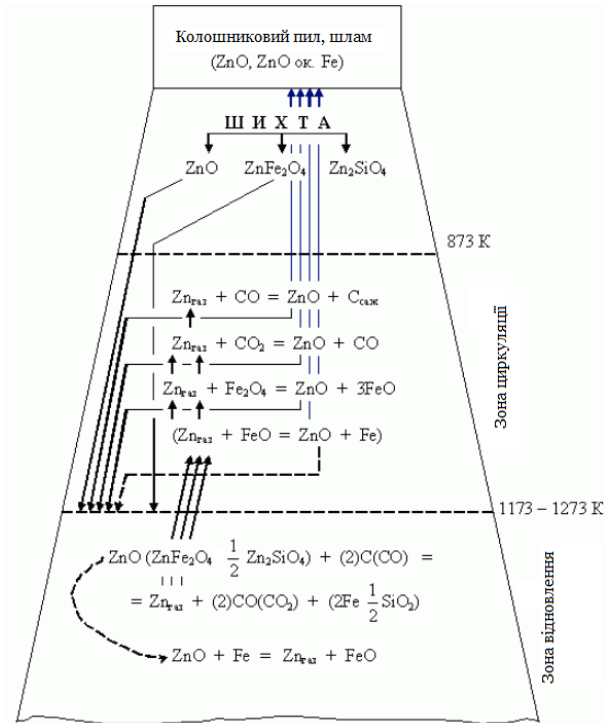


Рисунок 1 – Механізм відновлення та циркуляції цинку в доменній печі [10].

Циркулююча маса цинку в ДП має такі форми: металевий цинк, дрібнодисперсні частинки оксиду цинку, що утворюється в газовому потоці при окисленні парів цинку, оксид у вигляді плівок та оболонок на поверхні шматків шихти [11]. Вивчення процесів, що протікають у ДП при проплавленні цинквмісних матеріалів, та хімічний склад проб гарнісажу та настилів, відібраних під час зупинок печей на ремонти, показують, що гарнісаж по всій висоті печі від рівня чавунних льоток до верхньої половини шахти містить велику кількість оксиду цинку, який присутній у вигляді кристалів різної величини та забарвлення.

В умовах використання цинквмісної сировини для металургійних підприємств з метою виключення настилеутворення в ДП доцільно обмежити надходження цинку з шихтовими матеріалами на рівні 0,3 кг/т чавуну при температурі колошника 150–300°C з підвантаженою периферією. У сучасних умовах на ДП провідних металургійних компаній надходження цинку з шихтовими матеріалами обмежено діапазоном 0,15–0,20 кг/т чавуну. Прийняте на підприємствах України

допустиме цинкове навантаження становить не більше 0,50 кг/т. Для сировинних умов України, у залізорудних родовищах якої цинк практично відсутній, він переважно надходить зі шлами та шлаками сталеплавильного виробництва. Незважаючи на малий його вміст в основних рудних компонентах (фонове надходження), необхідний постійний контроль надходження з вторинними ресурсами агломераційної шихти.

Виходячи з вищесказаного, для умов ПрАТ «Камет-сталь» у 2021 р. авторами статті було рекомендовано проводити постійний контроль надходження цинку в шихту аглофабрики, шляхом визначення вмісту цинку в компонентах агломерату, що є основними джерелами надходження цинку (шлами металургійних переділів, колошниковий пил, концентрат ЦГЗК) не рідше одного разу на тиждень. Крім того, для контролю надходження цинку в доменну шихту рекомендовано було проводити контроль вмісту цинку в агломераті, як основному джерелі його надходження в ДП, не рідше 2-х разів на тиждень, при постійних: шихті аглофабрики, витраті вторинних матеріалів та вмісту в них цинку. При виявлених відхиленнях (у більшу сторону) та змін структури витрат аглошихти, контроль вмісту цинку в агломераті необхідно посилювати, до щодобового контролю вмісту цинку. Аналіз приходу цинку із шихтою у ДП ДЦ ПрАТ «Камет-сталь» показаний на рис. 2. Як випливає з діаграми, максимальні цинкові навантаження, що перевищують допустимі (0,5 кг/т) у 2 рази і більше, були відзначені в червні-липні 2021 р., а також з грудня 2021 р. Отже, проведення заходів щодо видалення цинку з доменних печей було актуальною задачею.

При використанні в доменній плавці шихтових матеріалів, що містять цинк, відбуваються негативні явища, що характеризуються, як було сказано вище, відкладенням цинку на футерівці шахти ДП, а також накопиченням цинку в стовпі шихти [12]. У робочому просторі ДП цинк локалізується у двох контурах циркуляції: у сухій зоні та в зоні «когезія-горн», при цьому цинк може перебувати у всіх агрегатних станах: пароподібному, рідкому та твердому (метал та його оксид) [13, 14]. За даними деяких комбінатів було встановлено також, що при розладах ходу ДП накопичення цинку збільшується в 1,2–1,5 рази при відносно постійному його надходженню з шихтою.

У ДП значна частина цинку видаляється з колошниковим газом, при цьому основна частина осідає в пиловловлювачах і переходить у колошниковий пил, утворюючи таким чином замкнутий контур у металургійному циклі ДП – аглофабрика. З продуктами плавки ДП видаляється менша частина цинку – до 10% з чавуном і близько 5% з шлаком. Основне видалення з продуктами плавки відбувається при обриві настилів, що супроводжуються похолоданнями ДП.

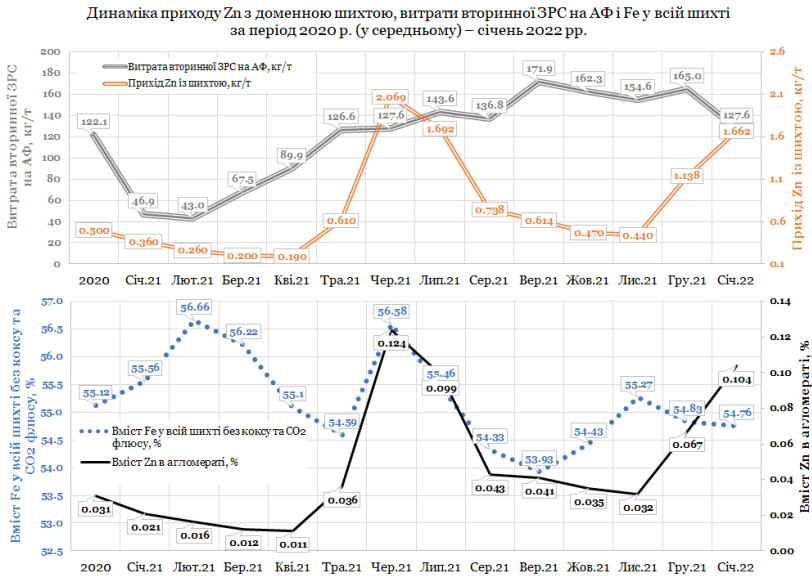


Рисунок 2 – Динаміка зміни приходу цинку з доменною шихтою, витрати вторинних ЗРС, вмісту цинку в агломераті ПрАТ «Камет-сталь» у 2020, в середньому, та у 2021 – початок 2022 рр. щомісячно.

Останнє і свідчить про зв'язок, отриманий у вересні-жовтні 2021 р. на ДП №1М та ДП №12 ПрАТ «Камет-сталь», температури чавуну та вмісту у ньому цинку (рис. 3). Тобто, похолодання печей є наслідком приходу в горн непрогрітих матеріалів, що зійшли зі стін ДП і мають у своєму складі відкладення цинку, в тому числі конденсат металевго цинку, який виноситься з продуктами плавки при різких локальних похолоданнях в горні ДП. Крім цього в результаті виконаного аналізу зміни вмісту цинку в чавуні було відзначено його збільшення при скороченнях витрат дуття (рис. 4).

Таким чином, було рекомендовано періодично використовувати в технології доменної плавки прийоми виведення цинку з продуктами плавки (паро-дуттєві промивки). У серпні 2021 р. регламент цих заходів було розроблено авторами статті та застосовано в якості рекомендацій на комбінаті.

Необхідно відзначити, що вміст цинку в чавуні значно знижується (у 4–5 разів) по мірі віддалення від чавунної льотки чавуну в каналі. Це відбувається внаслідок окислення металевго цинку та випаровування його оксиду з "нижнього контуру циркуляції". Тому важливо це враховувати у методиці відбору проби чавуну для аналізу.

Температура
чавуну, °C

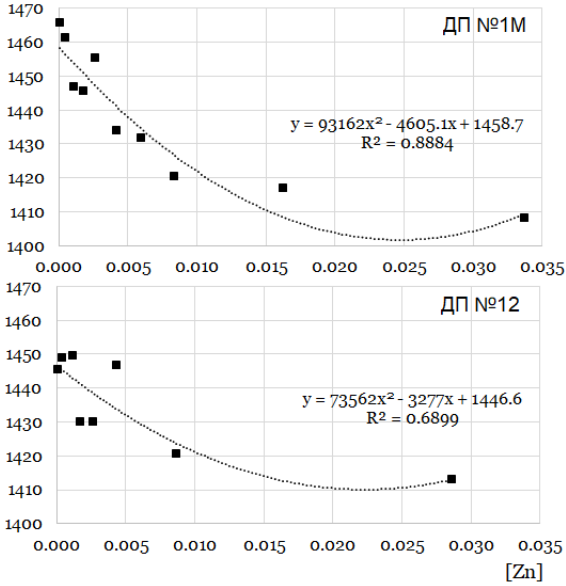


Рисунок 3 – Залежність температури чавуну від вмісту цинку в чавуні на ДП №1М та ДП №12 (кожна точка: 14 випусків продуктів плавки для ДП №1М та 19 випусків – для ДП №12, в середньому).

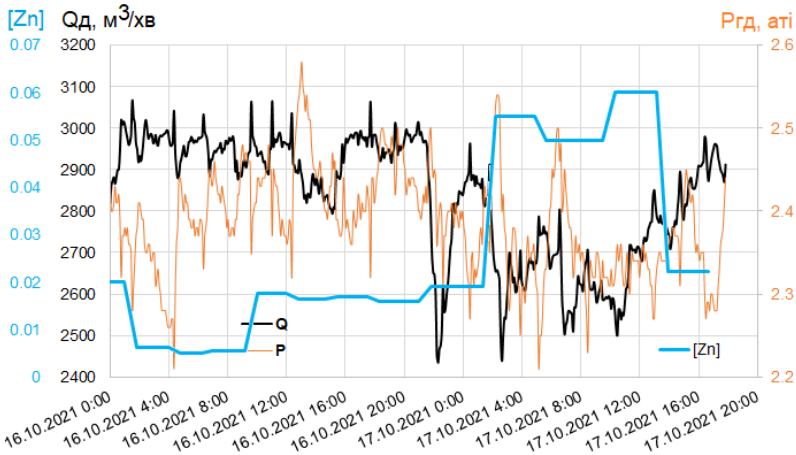


Рисунок 4 – Зміна витрати, тиску дуття та вмісту цинку в чавуні на ДП №1М.

При реалізації заходів щодо виведення цинку (наприклад, 3 рази на місяць на кожній ДП при витраті цинку, що перевищує допустиму межу) з продуктами плавки з ДП, необхідно здійснювати контроль вмісту цинку в чавуні та шлаку на 3-х випусках попередніх проведення заходів, під час промивки та на 1-му випуску після проведення вищевказаних заходів. Розроблена та затверджена програма з виведення цинку представлена нижче. Крім того, контроль вмісту цинку у продуктах плавки ДП необхідно проводити при порушеннях ходу ДП, зсувах гарнісажу та похолоданнях.

Паро-дуттєві промивки є додатковим ефективним способом промивки горна без використання спеціальних промивних матеріалів. Вони полягають у збільшенні кількості кисню, що витрачається на вторинне окиснення елементів чавуну під час його проходження через окисну зону. Весь кисень дуття витрачається в горні ДП на окиснення вуглецю коксу, вуглеводневмісних добавок і вторинне окиснення елементів чавуну. При зменшенні кількості кисню, що витрачається на окиснення добавок, збільшиться його кількість на вторинне окиснення елементів чавуну, концентрація закису заліза та марганцю в шлаку збільшиться, що сприятиме газифікації вуглецю коксового сміття.

Використання паро-дуттєвих промивок широко застосовувалося раніше при використанні природного газу в технології плавки [15, 16]. У 2021 р. їх застосування було спрямоване на виведення з ДП цинку при використанні на постійній основі у технології великих витрат ПВП. Застосування паро-дуттєвих промивок горна спрямовано на виведення з продуктами плавки цинку при високому його приході з шихтовими матеріалами та при перевищенні допустимого навантаження на тону чавуну – 0,5 кг/т.

Розроблений регламент паро-дуттєвих промивок передбачає:

- Проведення промивок у період роботи ДП на планових дуттєвих параметрах та із забезпеченням теплового резерву: $[Si]+0,44 [Mn] \geq 0,7$, де 0,44 – коефіцієнт, що враховує кількість тепла, необхідного для відновлення двох важковідновних елементів (вміст $[Si]$ при цьому має бути не менше 0,6% і Тчав – не менше 1440 °С.
- За 30 хвилин до початку випуску продуктів плавки скоротити подачу ПВП до 6 т/год, замінивши її відповідною кількістю водяної пари для збереження робочої величини теоретичної температури горіння.
- Після початку випуску продуктів плавки поетапно збільшувати витрату ПВП з поетапним зменшенням витрати водяної пари при збереженні теоретичної температури горіння до відновлення робочої витрати ПВП. Збільшення ПВП здійснювати наступним чином: на

першому етапі від 6 до 10 т/год, потім кожні 15 хвилин – збільшувати на 2 т/год до відновлення робочої витрати ПВП.

– Ефективність промивок контролювати щодо зміни вмісту лугів у шлаку та цинку в чавуні.

Розроблений регламент внесений до технологічної інструкції з доменного виробництва ПрАТ «Камет-сталь» для умов роботи ДП з високим надходженням цинку з шихтовими матеріалами.

Акумулявання титану в горні доменної печі.

Для утворення захисного гарнісажу в нижній частині доменної печі (металопріймач-запличики), необхідно створити умови для кристалізації розплавів у місцях збільшеної тепловіддачі з утворенням «металевої решітки» дендритної структури, що має високу теплопровідність, тугоплавкість і стійкість від розчинення в розплаві заліза, тобто для створення цих умов необхідна наявність в чавуні тугоплавких центрів зародження кристалів та коагуляція чавуну навколо них з подальшим затвердінням.

Одним з найбільш поширених матеріалів для захисту футерівки горна при його частковому розпалі є періодичне введення титановмісних матеріалів в шихту доменних печей. Надходження оксидів титану в піч, як правило, забезпечують використанням у складі аглошихти концентрату ільменіту або спеціально підготовлених брикетів з ільменіту з високим вмістом титану, які можуть вводити безпосередньо до складу доменної шихти [17–19]. З літературних даних відомо, що для захисту футерівки горна необхідно введення в піч 4,5–10 кг/т чавуну TiO_2 (для забезпечення вмісту $[Ti]$ у чавуні 0,08–0,25%).

Тобто, частина оксидів титану не відновлюється і залишається в кінцевому шлаку у вигляді TiO_2 та не приймає участі в утворенні гарнісажу, так як має низьку щільність та теплопровідність. Інша частина оксидів титану при достатній кількості тепла відновлюється до TiO , який має значно більшу щільність та випадає із шлаку на поверхню чавуну. Далі під впливом температури і часу у відновлювальному середовищі насиченому вуглецем коксу, утворюються карбіди титану, які володіють температурою розплавлення більше $3000^\circ C$ та акумулюються в горні і виступають центрами утворення металевих кристалів.

Для досягнення збільшення переходу титану в чавун зі шлаку необхідно дотримуватись наступних основних вимог: наявність високих температур та вільного вуглецю у відновлювальному середовищі, знижений вихід шлаку та відсутність важко відновлювальних окислів в горні ДП.

Обмеження вмісту титану в чавуні на рівні, що не перевищує 0,25%, обумовлено виробничим досвідом технологів, що експлуатують

доменні печі, які потребують профілактичної підтримки горна і поду, оскільки в'язкість рідкого металу з високим вмістом титану (понад 0,25%) значно збільшується і ускладнює процес відпрацювання продуктів плавки, особливо в період зупинок доменних печей на профілактичні ремонти, незважаючи на те, що доменні шлаки, що мають вміст TiO_2 на рівні 0,25–2,75%, мають в'язкість, характерну для стійких доменних шлаків (2,0–5,0 Пуаз) (рис. 4). Збільшення вмісту TiO_2 у шлаку до 2,75% знижує температуру початку плавлення розплаву на 100 °С, хоча в'язкість при цьому збільшується з 2,25 до 3,50 Пуаз. При цьому, як показано на рис. 5, збільшення в'язкості приходиться на початковий етап використання титановмісних матеріалів та має більше збільшення (до 3,50 Пуаз) при використанні пиловугільного палива (ПВП ≈ 75 кг/т) ніж при вдуванні природного газу (ПГ ≈ 70 м³/т) – до 3,25 Пуаз.

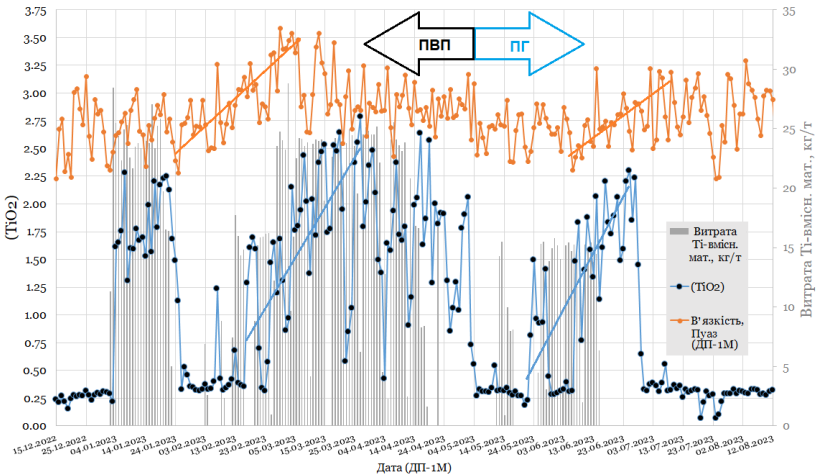


Рисунок 5 – Зміна в'язкості шлакового розплаву, вмісту в ньому TiO_2 та питомої витрати титановмісних матеріалів на прикладі роботи ДП №1М ПрАТ «Камет-сталь» у 2023 р. при вдуванні окремо ПВП та ПГ.

Вміст [Ti] у чавуні на рівні 0,08% швидше можна вважати профілактичним використанням добавок, що містять титан. Відповідно до цього, найбільш раціональним рівнем вмісту титану в чавуні для підтримки ефективного “наморожування” захисного гарнісажу на пошкодженій футерівці горна та поду доменної печі прийнято вважати величину 0,15–0,25%.

Висока вартість сировини, що містить титан, зобов'язує металургів підходити до вибору цього виду сировини з економним її витрачанням і шукати шляхи підвищення ефективності його використання. Тому

одним із шляхів зниження кількості матеріалів, що містять титан, є організація доменної плавки, що забезпечує максимальне переведення титану в чавун.

Аналіз продуктів плавки доменних печей, що проплавляють залізорудні матеріали з різними видами сполук титану в агломераційній та доменній шихті, показує, що вміст титану в чавуні, в основному, залежить як від загального надходження титану з шихтою, так і від розподілу титану між чавуном та шлаком залежно від вмісту кремнію в чавуні. Характерний розподіл щодо різних комбінатів наведений на рис. 6, з якого видно, що вміст $[Ti]$ прямо пропорційний до сумарного приходу титану з доменною шихтою (природно-легована шихта) і вмісту кремнію в чавуні. Причому, слід зазначити, що співвідношення $(TiO_2)/[Ti]$ знижується при вищому вмісті кремнію в чавуні (ефективніший перехід титану в чавун). Робота доменних печей із вмістом кремнію понад 1,0% нераціональна, а достатній рівень переходу титану в чавун та утворення карбідів відбувається при вмісті кремнію в чавуні 0,7–0,9%.

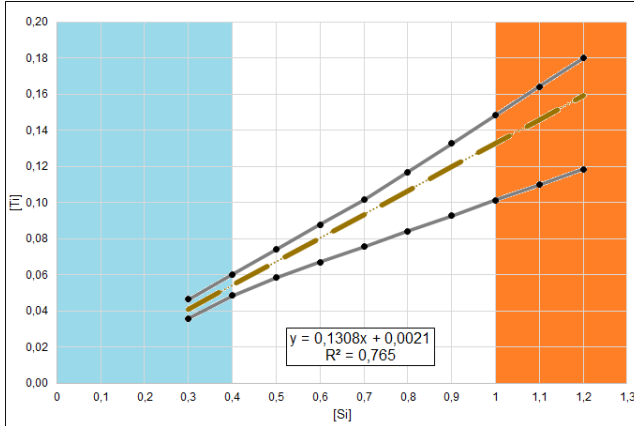
Вибірковий контроль вмісту титану в чавуні та шлаку на українських підприємствах (рис. 7) показує, що незалежно від джерела надходження титану, його розподіл між чавуном та шлаком $(TiO_2)/[Ti]$ корелює із закономірностями розподілу L_{Ti} на підприємствах, що ведуть постійний контроль та проплавляють залізорудні матеріали, що містять природно-леговані оксиди титану (рис. 6).

З вищесказаного випливає, що доведення вмісту титану в чавуні до прийняттого рівня, без нераціональної перевитрати титановмісних матеріалів в шихті, можна домогтися перерозподілом титану між чавуном і шлаком шляхом збільшення нагріву в період використання титановмісних матеріалів в шихті.

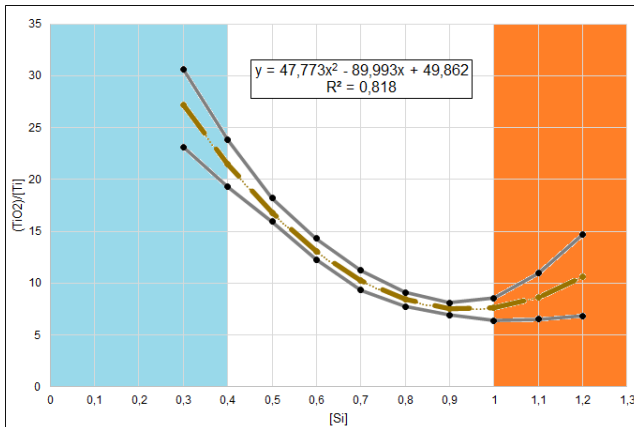
Аналіз продуктів плавки доменних печей України, що проплавляють залізорудні матеріали зі слідами титану в доменній шихті, а також зарубіжних підприємств, що проплавляють залізорудну сировину природно-леговану оксидами титану, що забезпечують вміст у шихті 0,24–0,32% TiO_2 (4,2–8,0 кг/т чавуну або 0,08–0,25% $[Ti]$ у чавуні), показує, що незалежно від джерела надходження титану, вміст $[Ti]$ прямо пропорційний до вмісту кремнію в чавуні незалежно від рівня його надходження. Високий рівень надходження оксидів титану з шихтовими матеріалами є необхідною, але недостатньою умовою формування захисного гарнісажу в горні доменної печі. Тому можна припустити, що без застосування спеціальних прийомів ефективність утворення захисного гарнісажу титану в печі навіть за наявності вмісту титану в чавуні на рівні 0,15–0,20% недостатньо висока.

На підставі практичних і дослідних даних, можна зробити висновок,

що для формування захисного титанистого гарнісажу в горні доменної печі доцільно застосовувати суміш залізорудних матеріалів (осн. 0,85–1,15 од.) і окускований матеріал, що містить титан (краще з високим вмістом титану), що забезпечує надходження титану на рівні не менш ніж 4,5 кг на тону чавуну.



(а)



(б)

Кольорами показані області холодного та гарячого ходу печі

Рисунок 6 – Узагальнена залежність вмісту титану в чавуні [Ti] від вмісту в ньому кремнію [Si] (а) та розподілу титану між чавуном та шлаком ($TiO_2/[Ti]$) залежно від вмісту кремнію [Si] у чавуні (б) при проплавленні природно-легованої титаном шихти протягом тривалого часу.

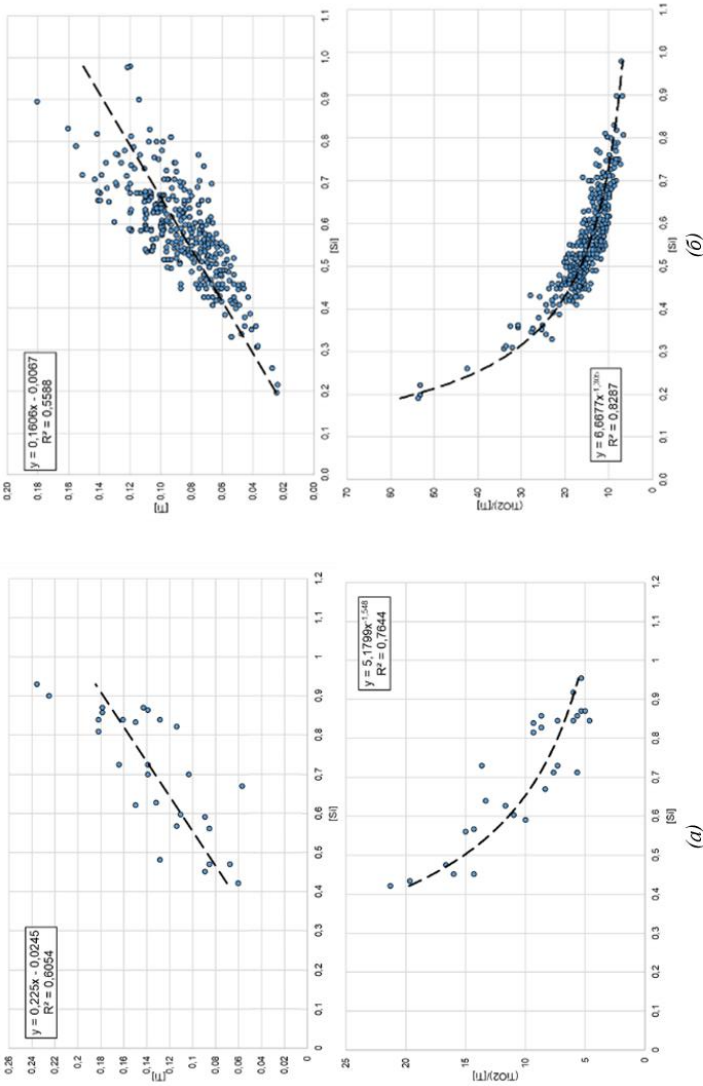


Рисунок 7 – Залежності вмісту титану в чавуні [Ti] від вмісту кремнію [Si], а також характерна зміна розподілу титану між чавуном і шлаком (TiO_2)/[Ti] залежно від вмісту кремнію [Si] у чавуні при використанні в шхті титановмісних матеріалів (навантаження до 4,5–6,5 кг/т чавуну) і при періодичному контролі вмісту титану в продуктах плавки (а), порівняно з промисловими шхтами природно-легованої титаном і з постійним контролем вмісту титану в продуктах плавки (б).

У той же час, до умов, що підсилюють процес гарнісажоутворення в горні доменної печі, необхідно віднести температурний режим доменної плавки та характер формування залізородної порції. Найбільша ефективність зниження температури поду доменної печі (за рахунок формування захисного титанистого гарнісажу) за дослідженнями ІЧМ та літературних джерел досягається при технологічній зупинці доменної печі на капітальний ремонт третього розряду напередодні якого за три доби в периферійну зону доменної печі завантажується суміш залізородних матеріалів основністю 0,9–1,2 од. і добавок, що містять титан, які забезпечують загальне надходження титану на рівні 4,5–6,5 кг/т чавуну. Вміст кремнію у чавуні у цей період доцільно підтримувати на рівні 0,85–0,95%. Безпосередньо за шість-вісім годин до зупинки печі матеріал, що містить титан, і який забезпечує необхідний рівень титану в шихті, доцільно вивести зі складу шихтових матеріалів.

Збільшення витрати титановмісних матеріалів шихти не призводить до якісної зміни переходу Ti в чавун, тому для раціонального і повнішого процесу гарнісажоутворення, необхідно витримувати підвищений нагрів чавуну. При недостатньому нагріванні збільшується вміст TiO_2 в шлаку, викликаючи збільшення його в'язкості і утруднення при відпрацюванні випуску продуктів плавки. Також при недостатньому нагріванні та переході Ti в чавун зменшується ефективність використання ільменітової сировини, незалежно від фонових рівнів та його витрати в доменну шихту.

Ефективність використання титановмісних матеріалів на рівні 0,2 т в подачу на постійній основі підтверджується зниженням теплових навантажень на холодильники горна, верхнього та нижнього поду ДП№1М у жовтні 2022 р. (рис. 8).

Таким чином, для інтенсифікації гарнісажеутворення в горні необхідно:

- надходження титану до ДП забезпечити на рівні не менше 4,5 кг на тонну чавуну;
- забезпечити завантаження до периферійної зони колошника суміші залізородних матеріалів сумарною основністю 0,85–1,15 од. та титановмісної добавки у кількості, що забезпечує вміст титану в чавуні на рівні 0,15–0,25% та відповідає вмісту (TiO_2)=1,15–1,30% у шлаку при $([Si]+0.44 \cdot [Mn]) = 0,7–0,8\%$;
- обмежити потрапляння залізородних матеріалів і добавок, що містять титан, в центральну зону печі;
- при використанні титановмісних матеріалів перед технологічною зупинкою забезпечити виведення титановмісної добавки за 6–8 годин до зупинки ДП [20].

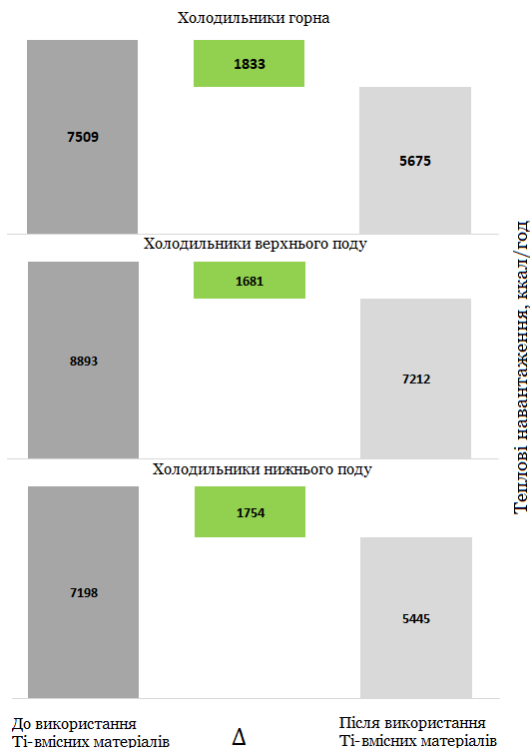


Рисунок 8 – Зміна теплових навантажень на холодильники горна, верхнього та нижнього поду ДП№1М у жовтні 2022 р. до та після використання титановмісних матеріалів на рівні 0,2 т в подачу на постійній основі.

Висновки

Представлено результати розробки стабілізаційних заходів, направлених на виведення цинку з продуктами плавки та акумулювання титану в горні доменної печі. Негативний вплив оксидів цинку на стан футерівки шахти доменної печі, який супроводжується настилеутворенням, та перевитрата питомої витрати коксу, яка має місце при циркулюванні цинку в об'ємі доменної печі потребують заходів щодо виведення цинку з продуктами плавки. Запропоновані заходи, які складаються з проведення промивок за запропонованим регламентом у період роботи доменної печі на планових дуттєвих параметрах та із забезпеченням необхідного теплового резерву. З метою подовження кампанії доменної печі одним з найбільш поширених

прийомів захисту футерівки горна є періодичне введення титановмісних матеріалів в шихту доменних печей. Надходження оксидів титану в піч, як правило, забезпечують використанням у складі аглошихти концентрату ільменіту або спеціально підготовлених брикетів з ільменіту з високим вмістом титану, які можуть вводити безпосередньо до складу доменної шихти. Проаналізовано досвід використання в складі доменної шихти титановмісних матеріалів та сформульовані заходи щодо інтенсифікації гарнісажеутворення в горні.

Перелік посилань

1. Семенов Ю. С., Шумельчик Є. І., Горупаха В. В. *Діагностика та управління доменною плавкою в змінних паливно-сировинних умовах*. Дніпро : Домінанта Прінт, 2018. 260 с. ISBN: 978-617-7371-45-7.
2. Semenov Yu. S. Temperature Distribution of the Gas Flux in Blast Furnaces. *Steel in Translation*. 2017. Vol. 47. No. 7. P. 473–477. <https://doi.org/10.3103/S0967091217070117>.
3. Semenov Yu. S., Shumel'chik E. I., Gorupakha V. V. Efficient Management of the Charging of Blast Furnaces and the Application of Contemporary Means of Control Over the Variable Technological Conditions. *Metallurgist*. 2018. Vol. 61. Iss. 11-12. P. 950–958. <https://doi.org/10.1007/s11015-018-0591-4>.
4. Semenov Yu. S., Horupakha V. V., Shumelchik Ye. I. Measures for Preventing Disruption in the Blast Furnace Operation under Use of Pulverized Coal. *Steel in Translation*. 2020. Vol. 50, No. 2, pp. 100–106. <https://doi.org/10.3103/S0967091220020096>.
5. Semenov Yu. S., Horupakha V. V., Alter M. A., Vashchenko S. V., Khudyakov A. Yu., Shumelchik E. I. Efficiency of Washing Blast Furnace Hearth in case of Pulverized Coal Injection. *AISTech 2022 – Proceedings of the Iron & Steel Technology Conference*, 16–18 May 2022, Pittsburgh, Pa., USA. P. 219–230. <https://doi.org/10.33313/386/025>.
6. Togobitskaya D. N., Khamkhot'ko A. F., Tsvataya N. A., Stepanenko D. A. Corrosion Activity of Alkali-Containing Slags With Respect to a Blast Furnace Refractory Lining. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2013. Vol. 54. P. 155–159. <https://doi.org/10.1007/s11148-013-9568-9>.
7. Belkova A., Togobitska D., Stepanenko D. Model decision-making system in the task of choosing the optimal composition of the blast furnace burden under specific operating conditions of BF. *Acta Metallurgica Slovaca*, 2023. Vol. 29. No. 2, P. 67–74. <https://doi.org/10.36547/ams.29.2.1764>.
8. The Cycle and Effect of Zinc in the Blast-furnace Process / P. Besta, K. Janovská, A. Samolejová, A. Beránková, I. Vozňáková, M. Hendrych // *Metallurgija*. 2013. Vol. 52. No. 2. P. 197–200.
9. Steer J. M., Griffiths A. J. Investigation of carboxylic acids and non-aqueous solvents for the selective leaching of zinc from blast furnace dust slurry. *Hydrometallurgy*. 2013. Vol. 140. P. 34–41. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2013.08.011>.
10. Щукин Ю. П., Гладышев В. И., Антипов Н. С., Урбанович Г. И. Механизм циркуляции цинка в доменной печи. *Сталь*. 1986. №9. С. 8–14.

11. Esezobor D. E., Balogun S. A. Zinc accumulation during recycling of iron oxide wastes in the blast furnace. *Ironmaking & Steelmaking Processes, Products and Applications*. 2006. Vol. 33. Issue 5. P. 419–425. <https://doi.org/10.1179/174328106X114020>.
12. Yang X., Chu M., Shen F., Zhang Z. Mechanism of zinc damaging to blast furnace tuyere refractory. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*. 2009. Vol. 22. Issue 6. P. 454–460. [https://doi.org/10.1016/S1006-7191\(08\)60123-4](https://doi.org/10.1016/S1006-7191(08)60123-4).
13. Blast-furnace heats made with a zinc-bearing charge / Shchukin Yu. P., Sedinkin V. I., Sarychev V. F., Nosov S. K., Vdovin K. N., Terent'ev V. L., Novikov V. S., Kosachenko I. E., Gostenin V. A. // *Metallurgist*. 1997. Vol. 41. No. 397. <https://doi.org/10.1007/BF02768860>.
14. The Results of Pilot Plant Testing the Zinc Removing from the Blast Furnace / Shchukin Yu. P., Sedinkin V. I., Novikov V. S., Kosachenko I. E., Gostenin V. A. // *Stal*. 1997. Vol. 3. P. 11–13.
15. Технологія промивки горна изменением расхода природного газа / Литвинов Л. Ф., Кузнецов А. М., Падалка В. П. и др. // *Металл и литье Украины*. 2003. № 9-10. С. 45–47.
16. Патент UA 60650 C2 на винахід. Спосіб профілактики забруднення горна доменної печі / Литвинов Л. Ф., Товаровський Й. Г., Ярошевський С. Л., Кузнецов О. М., Падалка В. П. Заявл. № 2003010616 від 23.01.2003; опубл. 15.08.2006, бюл. № 8.
17. Sobyagina O. N., Filatov S. V., Zagainov S. A. Analysis of titanium reduction in a blast furnace // *Steel in Translation*. 2012. Vol. 42. No. 3. P. 246–248. <https://doi.org/10.3103/S0967091212030163>.
18. Khudyakov A. Yu., Vaschenko S. V., Baiul K. V., Semenov Yu. S. Experimental Verification of New Compaction Equations for Fine Materials of the Mining and Metallurgical Complex. Part 1. Basic Compaction Equation. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2021. Vol. 62. Issue 1. P. 15–24. <https://doi.org/10.1007/s11148-021-00554-z>.
19. Vashchenko S. V., Khudyakov A. Yu., Baiul K. V., Semenov Yu. S. Method for Predicting the Strength of Pellets Produced from Dry Fine-Grained Materials. Powder Metallurgy and Metal Ceramics. 2021. Vol. 60. Issue 3-4. P. 247–256. <https://doi.org/10.1007/s11106-021-00233-1>.
20. Патент RU 2291199 C1 на изобретение. Способ создания защитного гарнисажа на футеровке горна и лещади доменной печи / Логинов В. Н., Суханов М. Ю., Васильев Л. Е., Каримов М. М., Логинов И. В., Большаков В. И., Нестеров А. С. Можаренко Н. М., Якушев В. С. Заявл. № 2005139986/02 от 22.12.2005; опубл. 10.01.2007.

References

1. Semenov, Yu. S., Shumelchik, E. I., & Horupakha, V. V. (2018). *Diahnostyka ta upravlinnya domennoyu plavkoyu v zminnykh palyvno-syrovynnykh umovakh* (Diagnostics and Management of Blast Furnace Smelting in Variable Fuel and Raw Materials Conditions). Dominanta Print. ISBN: 978-617-7371-45-7. [In Ukrainian]
2. Semenov, Yu. S. (2017). Temperature Distribution of the Gas Flux in Blast Furnaces. *Steel in Translation*, 47(7), 473–477. <https://doi.org/10.3103/S0967091217070117>

3. Semenov, Yu. S., Shumel'chik, E. I., & Gorupakha, V. V. (2018). Efficient Management of the Charging of Blast Furnaces and the Application of Contemporary Means of Control Over the Variable Technological Conditions. *Metallurgist*, 61(11-12), 950–958. <https://doi.org/10.1007/s11015-018-0591-4>
4. Semenov, Yu. S., Horupakha, V. V., & Shumelchik, Ye. I. (2020). Measures for Preventing Disruption in the Blast Furnace Operation under Use of Pulverized Coal. *Steel in Translation*, 50(2), 100–106. <https://doi.org/10.3103/S0967091220020096>
5. Semenov, Yu. S., Horupakha, V. V., Alter, M. A., Vashchenko S. V., Khudyakov A. Yu., & Shumelchik E. I. (2022). Efficiency of Washing Blast Furnace Hearth in case of Pulverized Coal Injection. *AISTech 2022 – Proceedings of the Iron & Steel Technology Conference*, 16–18 May 2022, Pittsburgh, Pa., USA. P. 219–230. <https://doi.org/10.33313/386/025>
6. Togobitskaya, D. N., Khamkhot'ko, A. F., Tsivataya, N. A., & Stepanenko, D. A. (2013). Corrosion Activity of Alkali-Containing Slags With Respect to a Blast Furnace Refractory Lining. *Refractories and Industrial Ceramics*, 54, 155–159. <https://doi.org/10.1007/s11148-013-9568-9>.
7. Belkova, A., Togobitska, D., & Stepanenko, D. (2023). Model decision-making system in the task of choosing the optimal composition of the blast furnace burden under specific operating conditions of BF. *Acta Metallurgica Slovaca*, 29(2), 67–74. <https://doi.org/10.36547/ams.29.2.1764>
8. Besta, P., Janovská, K., Samolejová, A. et al. (2013). The Cycle and Effect of Zinc in the Blast-furnace Process. *Metallurgija*, 52(2), 197–200
9. Steer, J. M., & Griffiths, A. J. (2013) Investigation of carboxylic acids and non-aqueous solvents for the selective leaching of zinc from blast furnace dust slurry. *Hydrometallurgy*, 140, 34–41. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2013.08.011>
10. Shchukin, Yu. P., Gladyshev, V. I., Antipov, N. S., & Urbanovich, G. I. (1986). The mechanism of zinc circulation in a blast furnace. *Stal*, 9, 8–14
11. Esezobor, D. E., & Balogun, S. A. (2006). Zinc accumulation during recycling of iron oxide wastes in the blast furnace. *Ironmaking & Steelmaking Processes, Products and Applications*, 33(5), 419–425. <https://doi.org/10.1179/174328106X114020>
12. Yang, X., Chu, M., Shen, F., & Zhang, Z. (2009). Mechanism of zinc damaging to blast furnace tuyere refractory. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 22(6), 454–460. [https://doi.org/10.1016/S1006-7191\(08\)60123-4](https://doi.org/10.1016/S1006-7191(08)60123-4)
13. Shchukin, Yu. P., Sedinkin, V. I., Sarychev, V.F. et al. (1997). Blast-furnace heats made with a zinc-bearing charge. *Metallurgist*, 41(397). <https://doi.org/10.1007/BF02768860>
14. Shchukin, Yu. P., Sedinkin, V. I., Novikov, V. S. et al. (1997). The Results of Pilot Plant Testing the Zinc Removing from the Blast Furnace. *Stal*, 3, 11–13
15. Litvinov L.F., Kuznetsov A.M., Padalka V.P. et al. (2003) Tekhnologiya promyvki gorna izmeneniyem raskhoda prirodnogo gaza (Hearth flushing technology by changing the flow rate of natural gas) // Metal and casting of Ukraine. 2003. № 9–10. P. 45–47. [In Russian].
16. Lytvynov, L. F., Tovarovskyi, Y. G., Yaroshevskiyi, S. L., Kuznetsov, O. M., & Padalka, V. P. (2006). Patent UA 60650 C2 for the invention. Prevention method for blast furnace hearth blockage. Application No. 2003010616 of January 23, 2003; published 15.08.2006, Bull. No. 8. [In Ukrainian]

17. Sobyagina, O. N., Filatov, S. V., & Zagainov, S. A. (2012). Analysis of titanium reduction in a blast furnace. *Steel in Translation*, 42(3), 246–248. <https://doi.org/10.3103/S0967091212030163>

18. Khudyakov, A. Yu., Vaschenko, S. V., Baiul, K. V., & Semenov, Yu. S. (2021). Experimental Verification of New Compaction Equations for Fine Materials of the Mining and Metallurgical Complex. Part 1. Basic Compaction Equation. *Refractories and Industrial Ceramics*, 62(1), 15–24. <https://doi.org/10.1007/s11148-021-00554-z>

19. Vashchenko, S. V., Khudyakov, A. Yu., Baiul, K. V., & Semenov, Yu. S. (2021). Method for Predicting the Strength of Pellets Produced from Dry Fine-Grained Materials. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 60(3-4), 247–256. <https://doi.org/10.1007/s11106-021-00233-1>

20. Loginov, V. N., Sukhanov, M. Yu., Vasiliev, L. E., Karimov, M. M., Loginov, I. V., Bolshakov, V. I., Nesterov, A. S. Mozharenko, N. M., Yakushev, V. S. (2007). Patent RU 2291199 C1 for the invention. The method of creating a protective skull on the lining of the hearth and bream of a blast furnace. Application No. 2005139986/02 of December 22, 2005; published 10.01.2007. [In Russian]

Yu. S. Semenov¹, Ph. D. (Tech.), Senior Researcher, Head of Department, ORCID 0000-0003-2299-5742

V. V. Horupakha¹, Researcher, ORCID 0000-0003-0531-1871

S. V. Vashchenko¹, Ph. D. (Tech.), Senior Researcher, ORCID 0000-0001-8344-961X

O. Yu. Khudyakov¹, Ph. D. (Tech.), Senior Researcher, ORCID 0000-0002-6507-1120

Ye. I. Shumelchyk¹, Ph. D. (Tech.), Senior Researcher, ORCID 0000-0001-5350-6425

K. V. Baiul¹, D. Sc. (Tech.), Senior Researcher, ORCID 0000-0003-1426-7956

¹ *Iron and Steel Institute of Z. I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine*

DEVELOPMENT OF STABILIZATION MEASURES AIMED AT REMOVING ZINC WITH SMELTING PRODUCTS AND ACCUMULATING TITANIUM IN THE HEARTH OF A BLAST FURNACE

Abstract. The article presents the results of the development of stabilization measures aimed at the removal of zinc with the products of melting and accumulation of titanium in the hearth of a blast furnace. The relevance of the development and use in practice of such measures is due to the unstable fuel and raw materials conditions for the production of pig iron, when their stabilization is a complex and difficult task, as well as the need to extend the campaign of blast furnaces during the overhaul period. The negative effect of zinc oxides on the condition of the blast furnace shaft lining, accompanied by slab formation, and the overconsumption of specific coke consumption, which occurs when zinc circulates in the volume of the blast furnace, require measures to remove zinc from the smelting products. The article proposes such measures, which consist of flushing according to the proposed schedule during the operation of the blast furnace at planned blowing parameters and with the provision of the necessary thermal reserve. In order to lengthen the campaign of a blast furnace, one of the most common methods for protecting the hearth lining is the periodic

introduction of titanium-containing materials into the charge of blast furnaces. The entry of titanium oxides into the furnace, as a rule, is ensured by the use of concentrate or specially prepared ilmenite briquettes with a high titanium content as part of the sinter charge, which can be introduced directly into the composition of the blast furnace charge. The article analyzes the experience of using titanium-containing materials as part of a blast furnace charge and formulates measures to intensify skull formation in the hearth.

Key words: blast furnace, blast furnace control, thermal state, pulverized coal, zinc content in the charge, titanium content in cast iron, hearth washings.

For citation: Semenov, Yu. S., Horupakha, V. V., Vashchenko, S. V., Khudyakov, O. Yu., Shumelchik, Ye. I., Baiul, K. V. (2023). Development of stabilization measures aimed at removing zinc with smelting products and accumulating titanium in the hearth of a blast furnace. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, 37, 139-157. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2023-37-139-157>

Стаття надійшла до редакції збірника 06.10.2023 р.

Рекомендовано до друку редколегією збірника (Протокол № 9 від 19.12.2023 р.)