

DOI: 10.34185/1991-7848.2025.01.21

УДК 669.18:669.054.82:504.06

Л.В.Камкіна, Г.П.Стовпченко, Я.В.Мяновська, В.Ю.Селівьорстов,
Д.В. Автономов

СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ ПЕРЕРОБКИ ПИЛУ ЕЛЕКТРОСТАЛЕПЛАВИЛЬНОГО ВИРОБНИЦТВА І ТЕХНОГЕННИХ ЗАЛІЗОВМІСНИХ МАТЕРІАЛІВ

Анотація. *Металургійна технологія переробки пилу ДСП та залізовмісних відходів металургійного виробництва.*

Аналіз фізико-хімічних процесів, експериментальні дослідження та розробка інноваційних технологічних рішень та рекомендацій щодо пилу ДСП та залізовмісних відходів металургійного виробництва.

Теоретичні дослідження базуються на основних положеннях фізичної хімії і теорії металургійних процесів. Розрахунки термодинамічної рівноваги оксидних систем ґрунтуються на теорії Гіббса та реалізовані за допомогою комп'ютерної програми «FASTSage 6.0»; дослідження хімічного складу фазових складових марганцевих феросплавів виконали з застосуванням растрового електронного мікроскопу YSM-6300LA фірми JEOL, Японія.

Ефективне видалення цинку з пилу ДСП можливе вже при помірних температурах 1000...1100°C, у тому числі при використанні як вуглецевого відновника некондиційних вуглецевих матеріалів. Для отримання рідкого продукту слід передбачити надмірну кількість вуглецю на навуглецювання з тим, щоб знизити температуру одержуваного розплаву.

При температурах порядку 1000...1100°C залізовмісний пил і шлам зазнають змін, що призводить до зменшення вмісту Zn в обробленому матеріалі, переходу вихідних пиловатих матеріалів в компактну, досить міцну масу.

Спільна переробка окалини та пилу ДСП шихтуванням у різних пропорціях не є раціональною, оскільки в цьому випадку відбувається зменшення концентрації цинку, що збирається в газоочистці переробного агрегату. Більш ефективним буде організація почергової переробки пилу ДСП та окалини у різні часові періоди (наприклад, помісячно).

Ключові слова: *електродугова піч, пил, цинк, вуглець, технологія, термодинаміка.*

Вступ.

Для сталого розвитку всіх галузей промисловості та інтеграції України до Європейського співтовариства все більша увага приділяється підвищенню ефективності виробництва, економному витрачання ресурсів та енергії, охороні навколишнього середовища. Вимоги регіональних стандартів постійно посилюються у напрямку зменшення шкідливого впливу на природу та здоров'я людини та гармонізуються з вимогами Європейських норм та світових стандартів. Існуюча законодавча база ЄС [1] містить стандарти та директиви щодо якості повітря, води, поводження з відходами та небезпечними (шкідливими) матеріалами.

У 2008 році ЄС вирішив повністю переглянути свою законодавчу базу щодо відходів, небезпечних відходів, транспортування відходів та інших питань утилізації відходів як необхідного кроку для покращення, серед іншого, захисту людського багатства та навколишнього середовища. Ця Директива встановлює заходи для захисту навколишнього середовища та здоров'я людини шляхом запобігання або зменшення несприятливого впливу, управління відходами та шляхом зменшення загального впливу використання ресурсів та підвищення ефективності такого використання. Іншими словами, Директива встановлює чотири основні принципи, такі як: принцип запобігання – природа і ресурси повинні бути збережені, а утворення відходів повинно бути мінімізовано; принцип обережності – зменшення наслідків від відходів для здоров'я людини та навколишнього середовища, особливо для зменшення небезпечних речовин у відходах; принципи платить забруднювач та відповідальність виробника; принцип близькості і самодостатності – адекватна інфраструктура шляхом створення інтегрованої та адекватної мережі засобів утилізації [2].

Директива 75/442/ЄЕС, як Рамкова директива ЄС щодо відходів, підкреслює кілька основних правових питань для металургійної промисловості щодо заохочення запобігання або зменшення виробництва відходів та їх шкідливості, зокрема за рахунок розвитку чистих технологій, більш економного використання природних ресурсів або зробити найменший можливий внесок, за характером їх виробництва, використання або видалення,

збільшення кількості або шкідливості відходів і небезпеки забруднення; розробка відповідних методів остаточної утилізації небезпечних речовин, що містяться у відходах, призначених для утилізації.

Закон ЄС про навколишнє середовище загалом і особливо щодо поводження з відходами забезпечує адекватний захист навколишнього середовища. Управління металевими відходами шляхом вторинної переробки є одним із найкращих способів вирішення проблеми великих родовищ металевих відходів у всьому світі, але також може бути корисним для металообробної промисловості в країнах, де немає потреби в подальшій експлуатації шахтних запасів і експлуатації з меншими витратами.

Директива ЄС 84/360/ЄЕС щодо скорочення забруднення повітря, викликаного промисловими заводами; Директива ЄС 76/464/ЄЕС щодо забруднення небезпечними речовинами, що потрапляють у водне середовище; Директива ЄС 75/442/ЄЕС та 78/379/ЄЕС зі змінами 91/156/ЄЕС щодо поводження з відходами; Директива ЄС 85/337/ЄЕС щодо оцінки впливу на навколишнє середовище; Директива 2008/1/ЄС Європейського Парламенту та Ради від 15 січня 2008 року щодо запобігання та контролю загального забруднення. На підставі Директиви 84/360/ЄЕС від 28 червня 1984 року, Європейське співтовариство випускає документи, що містять опис Кращих Доступних Технологій (Best Available Techniques). Ці документи зазвичай містять опис існуючих нових технічних рішень:

- техніко-економічне дослідження відновлювальних заходів, заснованих на кращих доступних технологіях, витрати води та утворення відходів для процесів первинної та вторинної металургії, остаточний звіт 1993 [3];

- технічні нотатки за Кращими Доступними Технологіями для зменшення викидів в атмосферу електросталеплавильними заводами, остаточний звіт квітень 1994 [4];

- кращі доступні технології, Реферативний документ з виробництва чавуну та сталі, грудень 2001, лютий 2008 [5, 6].

Більшість законодавчих актів та рекомендаційних документів в електронному вигляді доступні на сайтах Європейської спільноти [7-12]. В останніх перерахованих документах міститься інформація про основні

проблеми металургійного виробництва та існуючі на сьогодні шляхи їх вирішення. Щодо стану переробки пилу, що утворюється на заводах ЄС [5] вказується, що даними дослідження EC Study станом на 1996 близько двох третин пилу ЕДП відправляли у відвали (табл. 1).

У той же час, автори [5], вказують, що частка перероблюваного пилу в окремих країнах членах ЄС суттєво відрізняється. Це значною мірою визначається регіональними вимогами та нормами, доступністю відвалів, податками та іншими економічними аспектами. Так, дані таблиці 2 показують, що в Австрії, Німеччині та країнах Бенілюкс досягнуто високого рівня переробки пилу, у той час як у Південній Європі та Великій Британії він нижче. Це означає, що дані дослідження ЄС 1996 року не повною мірою відображають стан, який до того ж за останні роки суттєво змінився у бік збільшення частки пилу, що переробляється [13, 14].

Наголошується на тому, що відвали, в які складається пил ЕДП, обладнуються різними системами ізоляції їх від впливу навколишнього середовища («запечаткування») з використанням різних сполучних матеріалів або мембран. Частка застосовуваних ізолюючих систем при похованні пилу фільтрів газоочищення ЕДП у відвалах у ЄС – за даними EC Study, 1996 – цитується за [5] складає 38% глини, 31% невідомо, 13% мембрани, 11% бітумні склади, 7% цемент або відмостка.

Таблиця 1

Частка пилу ДСП (виробництва низьколегованих і вуглецевих сталей),
перероблюваних Вельц процесом для вилучення цинку [5]

Країни	Загальна кількість пилу, т/рік	Пил, що перероблюється Вельц процесом, т/рік	Частка, %	Доля кількості пилу, що залишилась
Австрія і Швейцарія	30000	25000	83	Відвали
Бенілюкс	65000	55000	85	Відвали
Данія	12000	-	100	-
Франція	90000	30000	33	Відвали
Німеччина	150000	105000	70	Відвали, заповнення шахт
Італія	180000	80000	44	Відвали і повернення
Скандинавія	30000	10000	33	Відвали і захоронення для майбутнього
Іспанія і Португалія	120000	25000	20	Відвали
Велика Британія	65000	0	0	Відвали
Усього	730000	330000	45	

Документ [5] був доповнений і видана нова версія [6], яка багато в чому повторює попередню, проте містить і деякі нові відомості, що становлять інтерес. Так, у цьому документі приділяється велика увага емісії токсичних органічних речовин. Наведено дані про середній фракційний склад пилу ЕДП. Відсоткове співвідношення частинок різного діаметра (мкм) становить, >250 – (0...14); 250...90 – 1,2...1,5; 90...32 – 1,98...1,99; 32...20 – 3,02...10,22; <20 – 85,3...93,78.

Таким чином, пил електродугових печей відноситься до небезпечних відходів (як за версією ЄС, так і відповідно до законодавства США та інших країн) насамперед, через високий вміст у ньому важких металів (цинку та свинцю). З огляду на високу дисперсність пилу існують додаткові обмеження щодо умов його зберігання у відвалах, а також пов'язані з цим проблеми з вилуговуванням водою важких металів.

Аналіз публікацій щодо переробки пилу ДСП та залізовмісних відходів металургійного виробництва

Переробка пилу та інших відходів металургійного виробництва стає необхідною з двох причин: через високий вміст оксидів заліза пил є цінною сировиною для металургії, а посилення екологічного законодавства робить дорожчим захоронення відходів на полігоні [15, 16]. Дрібні фракції пилу з різних етапів сталеплавильного процесу містять, окрім заліза та вуглецю, важкі метали, особливо цинк і свинець, а також важкі вуглеводні, які не прийнятні для захоронення на звалищах або для повторної переробки без будь-якої спеціальної обробки. При високотемпературній обробці сталеплавильного пилу може відбуватись видалення небезпечних компонентів і виробництво чистої сировини з високим вмістом заліза для переробки.

Пил електродугових печей (ДСП) є важливим вторинним ресурсом, який містить багато металевих елементів, таких як цинк, свинець, залізо, хром і кадмій. Переробка пилу сприяє не тільки збільшенню економічного потенціалу шляхом відновлення цих цінних металів, але також сприяє вирішенню проблем утилізації та забруднення навколишнього середовища, викликаних важкими металами (наприклад, свинцем, хромом і кадмієм), які містяться в пилу [17].

Серед існуючих процесів і тих, що знаходяться на стадії розробки, пірометалургійні процеси вважаються основним вибором для обробки пилу ДСП через високий потенціал відновлення металу, легку обробку залишків і відносно коротку технологічну схему.

Для переробки пилу ДСП розглядаються різні пірометалургійні процеси [17], включаючи: процес у Вельц-печі, обертовий процес в подовій печі (RHF), процес PRIMUS, процес OXYCUP, процес при наявності коксового шару, процес Ausmelt, процес у електроплавильній відновлювальній печі (ESRF), процес Plasamadust з використанням плазмової дуги, процес Elkem багатоцільової печі (EMPF), процес зануреної плазми, процес з одержанням оксиду цинку та чавуну (PIZO), процес полум'яного реактора, процес термічного плазмового відновлення, мікрохвильова обробка, процес сонячного термічного відновлення, процес плавлення чавуну в ванні, процес галогенування. Однак виникають конкретні технічні проблеми при пірометалургійній обробці пилу

ДСП, що потребує і відповідних заходів для покращення переробки пилу шляхом підвищення ефективності обробки з усуненням вторинних небезпечних забруднюючих речовин.

Окрім того, при розгляді можливих технологій переробки пилу ДСП необхідно враховувати при здійсненні процесів виплавки якої марки сталі утворився пил [18]: пил, отриманий від виробництва вуглецевої сталі, з високим, низьким і проміжним вмістом кольорових металів, і пил, отриманий від виробництва нержавіючої сталі. Автори публікації вказують, що для пилу виробництва вуглецевої сталі з проміжним вмістом кольорових металів бракує відповідної технології.

Утилізація пилу, що утворюється в металургійних виробництвах, запобігає утилізації відходів і збільшує використання вторинної сировини. В роботі [19] було запропоновано одночасну переробку сталеплавильного пилу та доменного шламу за допомогою мікрохвильового нагріву. Вивчено можливість використання доменного шламу як відновника для видалення цинку з пилу. Було досліджено три зразки сталеплавильного пилу, отримані зі сталеливарних заводів у Фінляндії, з різними концентраціями цинку та цинквмісними фазами. Суміші пилу та графіту з доменного шламу різних фракцій >250 мкм та >125...250 мкм нагрівали протягом 20 хвилин при мікрохвильовій потужності 1100 Вт. Результати показали, що ефективність видалення цинку залежить від кількості оксиду заліза і оксиду кальцію в сумішах. Найбільше видалення цинку спостерігалось для сумішей з високим вмістом оксиду кальцію та низьким вмістом оксиду заліза. Видалення цинку 92,79...96,06% було досягнуто для сумішей із фракцією доменного шламу >125...250 мкм. Тому автори рекомендують для досягнення ефективного видалення цинку використовувати більш грубі фракції (>125 мкм).

Як відмічається в роботі [20], до 80 мільйонів тонн цинквмісного пилу щорічно викидається металургійною промисловістю, і традиційний пірометалургійний процес переробки цих небезпечних відходів із використанням твердого вуглецю, як відновника, має високе енергоспоживання, великі викиди вуглецю та незначну додану вартість продуктів. Запропоновано інноваційне використання цинквмісного пилу

шляхом відновлення воднем для відновлення цинку та свинцю, а також синергетичну підготовку залізовуглецевих мікроелектролізних матеріалів для очищення стічних вод. Було досліджено поведінку гранул цинквмісного пилу щодо відновлення воднем. Результати показали, що ступінь металізації, ступінь видалення цинку та свинцю з окатишів цинквмісного пилу становили 98,5%, 96,8% та 71,1% відповідно при оптимальних умовах відновлення.

Глобальна нестача цинкових шахт робить видобуток цинку з цинквмісних відходів актуальною темою для досліджень [21]. На основі відомостей про джерела та характеристики пилу від різних процесів, автори проаналізували механізми фізичних, гідрометалургійних, пірометалургійних і пірометалургійно-гідрометалургійних комбінованих процесів утилізації пилу, та порівняли ці методи з точки зору споживання енергії, складності процесу та промислового застосування. Рекуперація цинку з пилу ДСП гідрометалургійним процесом має низькі економічні вигоди, а залишок після вилуговування важко повторно використовувати на сталеплавильних заводах, що призводить до розтрати ресурсів заліза. Також важко економічно відновити цинк з пилу з використанням процесу Waelz через низький вміст цинку в пилу. Тому необхідно реалізувати синхронне вилучення цинку і заліза. Автори вважають, що пірометалургійний процес та комбінований процес пірометалургії та гідрометалургії є основними тенденціями в галузі рециклінгу пилу ДСП.

В іншій роботі [22] автори стверджують, що пряма переробка пилу є недоцільною, тоді як, принаймні в Північній Америці, утилізація на безпечних звалищах стає непомірно дорогою. Представлені результати поетапної програми розробки процесу обробки цього пилу. Перший етап послідовного процесу – атмосферне вилуговування пилу ДСП розчином хлорного заліза. Потім суспензію обробляють в автоклаві в умовах, що призводять до утворення вільно осідаючого фільтрувального залишку, що складається в основному з гематиту та кремнезему. Результати випробувань показують, що залишок відповідає канадським критеріям для утилізації на санітарних звалищах. Також обговорюються можливості альтернативного використання залишків.

Оскільки пил ДСП внесено до списку небезпечних відходів і він становить одну з головних проблем електросталеплавильного заводу, пропонується [23] здійснювати переробку пилу ДСП шляхом спікання композитного агломерату, який одержують при використанні гранул з пилу ДСП, частинок коксу, окалини та флюориту. В результаті процесу було отримано два побічних продукти, агломерат з загальним вмістом заліза понад 70%, та цинковий пил, що містить більше 50% цинку в результаті випаровування цього металу під час процесу спікання і збирання рукавним фільтром. Крім того, вилучено близько 90% свинцю і кадмію, які містяться у початковому пилу.

Підкреслюється авторами роботи [24], що майбутній розвиток процесу повинен використовувати каталітичний ефект металевої ванни, що призведе до покращення кінетики процесу та оптимізації економіки процесу.

Основною проблемою, з якою стикаються ці процеси, є зниження стабільності одного з продуктів реакції відновлення, окису вуглецю при зниженні температури. Це призводить до збільшення відсотка вуглекислого газу в газах, що утворюються в результаті реакції, коли вони охолоджуються і частина цинку переокислюється. Крім того, мідь і сірка концентруються в багатих на залізо залишках і забруднюють залізо, витягнуте з цих матеріалів. Можливим процесом, як пропонують автори [25], буде реакція пилу із твердим або рідким залізом. У цьому випадку пар в основному буде складатися з цинку.

Розглядаються [26] можливості підвищення вмісту цинку та свинцю в пилу при введенні його в піч. Кінетику досліджували в експериментах, у яких пил вводили в 70 кг чавуну або сталі в індукційній печі. Були також досліджені додаткові добавки вуглецю та кисню для подолання теплового навантаження на систему. Вміст цинку збільшився з 16% до 60...80%. Близько 50% цинку в пилу розчиняється в чавуні або сталі. Авторами встановлено, що ZnO у пилу відновлюється розчиненням вуглецем і парами цинку, розчиненими в залізі.

Останнім часом мікрохвильова енергія викликає все більший інтерес для прискорення теплових реакцій. У дослідженні [27] розглядався вплив мікрохвильового нагрівання на швидкість відновлення цинку з пилу електродугової печі і хрому, що утворюється при плавці у конвертері. Результати показали, що мікрохвильове нагрівання потребує нижчої

температури для відновлення цинку з пилу порівняно зі звичайним тепловим нагріванням. Для пилу з конвертера рівень відновлення цинку 37,84% та 97,43% було отримано при звичайному та мікрохвильовому нагріванні відповідно при 850°C. Для пилу ДСП рівень відновлення цинку 79,88% та 98,20% було отримано при звичайному та мікрохвильовому нагріванні відповідно при 850°C. Покращене відновлення цинку в цьому дослідженні було зроблено в результаті швидкості мікрохвильового нагрівання та взаємодії між електромагнітним мікрохвильовим полем і молекулами нагрітих матеріалів.

З плавильного агрегату при виплавці сталі в ДСП видаляються продукти взаємодії у вигляді дисперсних частинок та парів, які конденсуються та накопичуються у вигляді пилу у фільтрах газоочищення [13-30]. Складування та поховання цих відходів не раціонально з технічної точки зору, оскільки вони мають високий вміст цинку та свинцю та високий вміст заліза, що робить їх цінною сировиною. Найбільш складним з погляду рециклінгу є пил газоочищення електрофільтрів електросталеплавильних цехів.

Складність вилучення цинку та заліза з пилу газоочищення полягає в тому, що обидва елементи входять до складу комплексної сполуки – фериту цинку, із загальною формулою $ZnFe_2O_4$, яку необхідно розкласти термічними або хімічними методами. Пил електродугових печей (ДСП) є важливим вторинним ресурсом, який містить багато металевих елементів, таких як цинк, свинець, залізо, хром і кадмій [17 - 30].

Ще більше загострить проблему утилізації сталеплавильного пилу перехід на виробництво оцинкованого листа для автомобілебудування та конструкційних матеріалів із захистом від корозії покриттями цинку, що повертаються у переплав у вигляді скрапу. Пошук ефективних технологій утилізації пилу ДСП із вилученням цінних продуктів є дуже актуальними та насущними, оскільки забезпечують повернення у виробництво цінних металів і одночасно сприяють зниженню забруднення навколишнього середовища, оскільки при цьому скорочуються викиди у відвали та запобігають шкоді навколишньому середовищу та здоров'ю людей.

Шляхи утворення пилу в технологіях одержання металів та сплавів

Цинк з пилу можна відновити за допомогою різних технологій, а залишок можна використовувати як сировину для виробництва сплавів заліза. У роботі [21] були наведені джерела та характеристики пилу від різних процесів та представлені механізми фізичного, гідрометалургійного, пірометалургійного та комбіновані пірометалургійно-гідрометалургійні процеси утилізації пилу та ці методи порівнюються з точки зору споживання енергії, складності процесу та промислового застосування.

У процесі виробництва чавуну та сталі може утворюватися велика кількість пилу. У документі [29] аналізується хімічний склад, розподіл частинок за розміром і мікроскопічні характеристики пилу виробництва сталі. Сталеплавильний пил має високий вміст заліза, значну кількість CaO та містить вуглець. Цей пил від виробництва чавуну та сталі можна використовувати як сировину для виробництва чавуну. Частинки пилу мають малий розмір, що потребує значних зусиль для організації пилоуловлювання.

Більшість видів металургійного пилу не можна безпосередньо повертати до процесів виробництва чавуну та сталі через вміст цинку. Було розроблено багато процесів для відновлення металів з пилу, щоб комплексно використовувати їх і вирішити ці екологічні проблеми [30]. Цинк у SMD можна відновити за допомогою цих технологій, а залишок можна використовувати як сировину для виробництва чавуну.

У процесі виробництва чавуну в доменних печах (ДП) цинк у пилу в основному походить із спеченої руди [31]. Цинк є мікроелементом у сировині ДП, і зазвичай він надходить у ДП у вигляді оксидів і сульфідів. Сполуки цинку легко відновлюються за високої температури та відновної атмосфери, а потім випаровуються за високої температури через низьку температуру кипіння, потрапляючи в димовий газ і відповідно піднімаючись угору. Невелика кількість цинку осідає після окислення в низькотемпературній зоні верхньої частини доменної печі, потім він потрапляє разом із шихтою. Ця частина цинку спричинить циклічне накопичення цинку в ДП, тому вміст цинку в ДП не повинен перевищувати 10% [5]. Велика частина цинку потрапляє в систему газового пиловідведення з димовими газами і в кінцевому підсумку потрапляє

в пил. Видалення пилу фільтруванням є різновидом методу очищення відхідних газів від дрібного пилу, що є поширеним методом завдяки своїм перевагам у високій швидкості видалення пилу, низькій вартості та низькому рівні забруднення. Загальний вміст заліза в цьому пилу становить 23,4...35,6%, і залізо в основному існує у формі магнетиту. Вміст вуглецю в ньому становить 18,5...33,0%, що може зменшити кількість вуглецю, який використовується для відновлення. Вміст цинку становить 1,2...3,4%, цинк в основному існує у вигляді ZnO та $ZnFe_2O_4$. Пил доменного виробництва має невеликий розмір частинок і невелику питому вагу. Як правило, сукупна швидкість пропускання пилу становить 50...65% при використанні сита 200 mesh. Тому він легко розсіюється в атмосфері і сильно забруднює навколишнє середовище.

У процесі виробництва сталі в електродугових печах цинк у пилу ДСП в основному походить із оцинкованого брухту. Пил складається з агломератів дуже дрібних нерегулярних і злегка сферичних частинок і деяких явно розплавлених більших сферичних частинок. Форма цих частинок відображає механізм утворення пилу ДСП у процесі виробництва сталі [32]. Дослідження показали, що основною причиною утворення пилу ДСП є розрив бульбашок CO на поверхні розплаву, що розриває плівку розплаву, яка спочатку вкривала бульбашки на дрібні краплі, а потім ці дрібні краплі також викидаються разом із вуглекислим газом.

Крім того, через швидке нагрівання та бурхливе перемішування в ДСП метал з низькою температурою плавлення буде випаровуватися або потрапляти безпосередньо в систему видалення пилу з потоком гарячих газів разом з деякими оксидами в шлаку. Вищевказаний пил з печі остаточно осідає в системі видалення пилу з утворенням сталеплавильного пилу. Відповідно до літературних даних, у Китаї вміст заліза в пилу ДСП становить приблизно 29,0...48,6%, а вміст цинку – приблизно 3,8...27,0%, як показано в таблиці 2.

Таблица 2

Хімічний склад пилу, що утворюється в різних процесах [33,34].

Тип процесу	Хімічний склад, % мас.					Оксид цинку
	Fe	C	Zn	Mg	Лужний метал	
Доменний пил	23,4–35,6	18,5–33,0	1,2–3,4	0,5–1,1	0,4–1,9	ZnO, ZnFe ₂ O ₄
Конвертерний пил	50,0–80,0	-	1,7–9,4	0,4–2,2	-	ZnO, ZnFe ₂ O ₄
Пил ДСП	29,0–48,6	0,4–3,0	3,8–27,0	0,4–2,2	1,2–2,7	ZnO, ZnFe ₂ O ₄

Пил ДСП може викликати лужність ґрунту при складуванні на промислових майданчиках завдяки своєму лужному складу. Крім того, пил ДСП містить елементи важких металів, такі як Pb, Ni та Cr. Ці елементи будуть просочуватися назовні після змивання дощем під час укладання, спричиняючи забруднення води та ґрунту важкими металами.

Пірометалургійні процеси є ефективним способом переробки елементів з електросталеплавильного пилу. В даний час процес відновлення пилу в основному поділяється на дві категорії: прямий метод відновлення і метод відновної плавки. Температура в реакційній зоні цих двох методів відрізняється, що робить реакції між компонентами сировини в печі різними, в результаті чого утворюються різні кінцеві продукти. Цинк, свинець та інші низькокиплячі оксиди металів у пилу відновлюються до металу у вигляді пари і відокремлюються від залишку. Різниця в тому, що температура в зоні реакції методу прямого відновлення нижча, залишок не плавиться, а оксид заліза в ньому відновлюється до заліза прямого відновлення. Температура в реакційній зоні методу відновної плавки дуже висока, і майже всі оксиди металів з пилу відновлюються і плавляться.

Зазвичай використовувані методи прямого відновлення включають Вельц-процес [33-41] і процес з обертовим подом [35]. Методи відновної плавки включають ОхуСур [36, 42-43], процес DK [41] і процес із коксовим шаром [38, 44 - 46]. Характеристика цих процесів показані в таблиці 3.

Таблиця 3

Порівняння пірометалургійних процесів знецинкування пилу[33-38]

Процес	Продукт	Переваги	Недоліки
Вельц	Zinc-rich dust; Waelz oxide	1. Менше кроків операції та простий процес 2. Налагоджена технологія та надійний процес	1. Високі витрати на обслуговування 2. Низька продуктивність 3. Високі вимоги до вмісту цинку в сировині (вміст цинку >16 %)
RHF	Збагачений цинком пил; залізо прямого відновлення	1. Добре налагоджена технологія та надійний процес 2. Менше операційних кроків і простий процес 3. Висока швидкість металізації залишку	1. Високі початкові інвестиції та експлуатаційні витрати 2. Високі вимоги до робочої температури
ОхуСур	Збагачений цинком пил; розплавлене залізо; шлак	1. Багато видів пилу, який можна переробити 2. Високий коефіцієнт вилучення металу 3. Висока додана вартість продукції	1. Робочий цикл обладнання короткий 2. Висока вартість виплавки
DK	Чавун; пил збагачений цинком	1. Відпрацьована технологія та надійний процес 2. Низькі інвестиції в обладнання 3. Вироблений чавун можна використовувати в процесі лиття	1. Велике споживання енергії 2. Серйозне забруднення довкілля 3. Погана безпека довгострокової експлуатації
Спікання з вуглецем	Збагачений цинком пил; розплавлене залізо; шлак	1. Можливе розділення металевого заліза та шлаку 2. Сировина не потребує агломерації	1. Велике споживання тепла і відпрацьоване тепло важко відновити 2. Високі вимоги до матеріалів устаткування 3. Висока інвестиційна вартість

Пірометалургійні процеси можуть певною мірою відновити залізо і цинк із пилу, але в цих процесах є деякі проблеми, які потребують термінового вирішення [47 - 49]. Зокрема, Вельц-процес має високі вимоги до сировини, нестабільний технологічний процес та високе споживання енергії. Процес RHF має низьку ефективність виробництва та високі інвестиційні витрати. Процес

ОхуСур має короткий робочий цикл обладнання та високу вартість через використання коксу. Процес ДК споживає велику кількість енергії, а викиди від процесу спікання забруднюють навколишнє середовище. Процес коксового шару має високі енерговитрати та малий термін служби обладнання.

Процеси пірометалургійно-гідрометалургійної комбінованої обробки (РНСТ). Поєднання пірометалургійних і гідрометалургійних процесів для обробки сталеплавильного пилу може реалізувати комплексне відновлення різних цінних металів з пилу. Пірометалургійна частина процесу РНСТ може використовувати RHF для безпосереднього відновлення та випалу металургійного пилу, в якому метали з нижчою температурою кипіння, такі як цинк, свинець та кадмій, будуть відновлені в газові викиди. Після охолодження викиди проходять очищення в рукавному фільтрі, а потім лужний метал з уловленого пилу відновлюється гідрометалургійним методом. Після цього Zn, Pb та Cd із шламу вилуговування можна вилучити методом вилуговування аміаком.

Цей метод може руйнувати $ZnFe_2O_4$ при високій температурі та досягати високоефективного розділення цинку та заліза в пилу. Цинк в основному існує у формі ZnO, який легко вимивається після обробки пилу, тому швидкість вилучення Zn з пилу буде покращена. Процес РНСТ може поєднувати переваги методів пірометалургії та гідрометалургії. Він долає низьку ефективність вилучення цинку методами гідрометалургії та низьку чистоту цинку отриманого методами пірометалургії. Однак цей процес передбачає більше технологічних операцій і вищі інвестиційні витрати.

Використання сталеплавильного пилу як техногенного ресурсу може бути реалізовано за допомогою фізичних, гідрометалургійних і пірометалургійних процесів, і водночас можуть бути вирішені екологічні проблеми, викликані накопиченням пилу, зменшити попит на мінеральні ресурси та принести економічні вигоди. Переваги та недоліки цих процесів обробки порівнюються в таблиці 4.

Фізичні методи поділяють пил на пил з високим вмістом цинку та пил з низьким вмістом цинку відповідно до різниці в розмірі частинок і щільності. Пил з низьким вмістом цинку можна використовувати в процесі спікання та

повертати в процес виробництва чавуну та сталі. Однак вміст цинку в багатому на цинк пилу недостатній для безпосереднього використання у виробництві металевого цинку, і потребує подальшого збагачення на цинк. Тому фізичний метод можна використовувати лише як процес попередньої обробки для гідрометалургійного та пірометалургійного процесів.

Таблиця 4

Порівняння кількох процесів обробки вилучення металів
із сталеплавильного пилу [50 - 54]

Процес переробки	Переваги	Недоліки
Фізичний процес	1. Процес експлуатації простий 2. Низькі інвестиції	1. Продукти не можна переробляти безпосередньо 2. Низька ефективність
Гідрометалургійний процес	1. Висока швидкість вилуговування цінних металів 2. Висока ефективність вилуговування	1. Шлам, який утворюється при вилуговуванні, не підлягає переробці 2. Велика кількість вилуговувача 3. Невідновлені інші метали пилу забруднюють відновлений метал.
Гідрометалургійний процес	1. Залізо, вуглець та інші цінні елементи пилу можуть бути повністю використані 2. Продукти, що містять залізо, можуть бути безпосередньо використані як сировина для виробництва чавуну	1. Ступінь вилучення металів у кінцевий продукт сильно відрізняється 2. Процес реакції споживає багато енергії
Поєднання пірометалургійного і гідрометалургійного процесу	1. Поєднує в собі переваги пірометалургійних і гідрометалургійних процесів 2. Висока повна швидкість відновлення металу	1. Багато операцій і складний процес 2. Висока інвестиційна вартість

Гідрометалургійними процесами можна отримати цінні метали з високою масовою часткою. Їх енергоємність низька завдяки тому, що вони проводяться при низькій температурі. Однак ці методи вимагають високої корозійної стійкості обладнання. Шлам вилуговування не може бути використаний як

сировина для доменної печі через складний склад і не відповідає вимогам законодавства про охорону навколишнього середовища щодо зберігання.

Пірометалургійні процеси на сьогодні є основними методами відновлення пилу. Ефективність цих методів відносно висока, і цінні елементи в пилу можуть циклічно збагачуватися. Продуктами є метал або металізовані окатиші, які можна безпосередньо повертати в процес виробництва сталі. Однак пірометалургійні процеси потребують подальшого вдосконалення через високе енергоспоживання, низьку чистоту продуктів і велике обладнання.

Залишок після пірометалургійної обробки в комбінованому процесі РНСТ може бути повернутий у процес виробництва чавуну та сталі завдяки високому ступеню металізації та низькому вмісту цинку. Після цього інші цінні метали, збагачені в пилу, можуть бути поступово вилучені за допомогою гідрометалургійних процесів для досягнення повного вилучення з складу пилу. Цей процес підходить для переробки великої кількості цинквмісного пилу, з різним вмістом цинку. Однак технологічний процес також має недоліки, які не можна ігнорувати, такі як більша складність, більша кількість технологічних операцій та вищі інвестиційні витрати.

На основі аналізу літературних даних, а також даних, отриманих з практики цих методів, можна зробити висновок, що переробка сталеплавильного пилу з акцентом на відновлення цинку є досить складною, і існує значний вплив як хімічного складу пилу, так і інших фізичних і мінеральних його характеристик [53 - 67].

Пірометалургійні процеси можуть легше впоратися з широким діапазоном хімічного та мінерального складу пилу, але мають вищу вартість впровадження (через необхідний масштаб роботи та складність обладнання); вони також демонструють обмеження для відновлення заліза, коли це є частиною цілі процесу [54, 55].

З іншого боку, гідрометалургійні процеси є більш універсальними [52], коли йдеться про відновлення інших металів, крім цинку, наприклад, міді; однак на них більше впливає присутність цинку в мінеральних видах франклініту та такі домішки, як хлориди. Ці процеси можуть утворювати

відходи та стоки з високими витратами на очищення та утилізацію, що часто перешкоджає їх реалізації.

Що стосується включення сталеплавильного пилу в інші матеріали, наявність таких елементів, як свинець, кадмій, сполуки цинку та хлору, може вплинути як на обробку, так і на якість продукції. З цієї причини існує потреба в постійному нагляді як за процесом, так і за продуктами, виготовленими з додаванням сталеплавильного пилу.

На підставі вищезазначених тверджень можна зробити висновок, що переробка або утилізація пилу не може бути класифікована як легке завдання, яке вимагає від розробника проекту обережного обмірковування багатьох факторів, які можуть вплинути на результати, а від технологів – ретельного контролю за всім циклом процесу.

Хімічний та мінералогічний склад пилу електросталеплавильного виробництва

При виплавці сталі в ДСП близько 10...20 кг/т шихти металу (при погано організованому процесі до 30 кг/т) видаляється з агрегату у вигляді дисперсних частинок та парів, які конденсуються та накопичуються у вигляді пилу у фільтрах газоочищення. Зважаючи на те, що склад шихтових матеріалів непостійний і різноманітний, пил, що утворюється, містить у своєму складі велику кількість різних хімічних елементів. Крім того, формування частинок пилу відбувається при контакті твердих дисперсних частинок та високотемпературних відгонів, що зумовлює її складний мінералогічний склад.

Проведено велику кількість досліджень хімічного елементного та компонентного складу електросталеплавильного пилу цехів, що працюють у різних країнах. У таблиці 7.6 наведено дані щодо хімічного складу пилу ЕДП при виробництві вуглецевих та низьколегованих сталей та високолегованих та нержавіючих сталей авторів досліджень [5, 6, 18 - 26].

Зазвичай, основними мінералогічними компонентами пилу є ферит цинку ($\text{ZnO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$) (або, інакше, ZnFe_2O_4), магнетит (Fe_3O_4), цинкіт (ZnO) і вапно (CaO), у той час як свинець виявляється у відносно малих кількостях у вигляді оксиду

(PbO). Приведено хіміко-структурну характеристики пилу ДСП з різним вмістом Zn [56, 57, 60]. Ідентифіковано фази: $ZnFe_2O_4$, Fe_3O_4 , $MgFe_2O_4$, $FeCr_2O_4$, $Ca_{0,15}Fe_{2,85}O_4$, MgO , Mn_3O_4 , SiO_2 та ZnO . Фази, виявлені мессбауерівською спектроскопією, були: $ZnFe_2O_4$, Fe_3O_4 , і $FeCr_2O_4$. Ферит магнію ($MgFe_2O_4$), який спостерігався на рентгенограмах XRD як піки, що перекриваються, не був ідентифікований у спектроскопічному аналізі Мессбауера [54-60].

Таблица 5

Середній хімічний склад пилу ЕДП

Компонент	Пил виробництва вуглецевих та низьколегованих сталей, % мас.	Пил виробництва високолегованих та нержавіючих сталей, % мас.
Fe _{заг.}	25...50	30...40
SiO ₂	1,5...5	7...10
CaO	4...15	5...17
Al ₂ O ₃	0,3...0,7	1...4
MgO	1...5	2...5
P ₂ O ₅	0,2...0,6	0,01...0,1
MnO	2,5...5,5	3...6
Cr ₂ O ₃	0,2...1	10...20
Na ₂ O	1,5...1,9	н/в
K ₂ O	1,2...1,5	н/в
Zn	10...35	2...10
Pb	0,8...6	0,5...2
Cd	0,02...0,1	0,01...0,08
Cu	0,15...0,4	0,01...0,3
Ni	0,02...0,04	2...4
V	0,02...0,05	0,1...0,3
Co	0,001...0,002	н/в
As	0,003...0,08	н/в
Hg	0,0001...0,001	н/в
Cl	1,5...4	н/в
F	0,02...0,9	0,01...0,05
S	0,5...1	0,1...0,3
C	0,5...2	0,5...1
Основність	2,0...6,5	н/в
Вологість	6...16	н/в

Визначено [61] склад пилу електрофільтрів газоочисних споруд ДСП під час тривалого зберігання у відвалах з метою отримання інформації щодо віднесення пилу до небезпечних відходів. Визначення вмісту важких металів у відходах проводили методом атомно-абсорбційної полум'яної спектрофотометрії на спектрофотометрі ААС-1Н. Вміст суми загального заліза та визначення різних ступенів його окиснення проводили методом окисно-відновного титрування біхроматом калію в кислому середовищі.

Хімічний аналіз проб пилу показав, що суттєвих відмінностей у вмісті загального заліза в представлених пробах пилу немає, хоча спостерігається деяке зменшення по глибині відвалу. Більш сильне зниження при переході від поверхні відвалу до глибини відзначається за вмістом Fe_3O_4 . Всі зразки є магнітними, що свідчить про значний вміст у пилу магнітного закису-оксиду заліза, швидше за все, у незв'язаному стані.

Наявність у плавильній шихті домішок цинку і свинцю, що випаровуються при робочих температурах печі, призводить до їх окислення потоком повітря, внаслідок чого вони можуть перебувати в кінцевому пилу як у вигляді вільних оксидів, так і у вигляді композиційних структур з оксидами заліза. Встановлено, що результати хімічного аналізу проб пилу електрофільтрів, їх якісний склад та вміст токсичних важких металів в цілому (за середнім значенням 10 визначень) відповідають заданим технічним умовам підприємства для цього виду відходів, отримано перевищення за вмістом цинку в усіх розглянутих залізовмісних відходах. Відмінною особливістю важких металів, що містяться у відходах, є надзвичайно низька рухливість у буферних середовищах і практична нерозчинність у воді.

За даними дослідників [62] цинк у пилу ЕДП присутній у вигляді франклініту ZnFe_2O_4 або франклініту з ізоморфно замінними металами $(\text{Zn}_x, \text{Me}_y)\text{-Fe}_2\text{O}_4$, де $\text{Me} = \text{Mn}, \text{Co}, \text{Ni}, \text{Cr}, \text{Ca}$, та ін., і цинкіту ZnO . Залізо в пилу, за винятком франклініту, переважно знаходиться у вигляді магнетиту Fe_3O_4 . Мінералогічний склад пилу ДСП, дослідженого методом рентгеноструктурного аналізу, також показав наявність магнетиту, франклініту, цинкіту та кварцу. В роботі авторів [62] зроблено докладний

аналіз складу пилу ДСП за результатами різних дослідників. Цікавим є наведені дані щодо співвідношення вмісту цинку та заліза (табл.6).

Таблиця 6

Співвідношення вмісту цинку і заліза в пилу ДСП
за даними різних дослідників (цитується по [62])

Вміст елементів, % мас.			
Zn	Fe	Zn	Fe
18,54	45	21,1	31,25
19,4	24,6	20	30
23	30	15–25	31–40
13–22	11–45	13,6	29,8
2–46	10–45	21,8–32	19,3–25,5
34,6	42,5	18,5	29,1
20	30	15–25	30–45
22,3–24,35	30,37–35,3	21,3	21,3
39	22,1		
15,9–26,7	32,3–37,7	22,14	30,8

Слід зазначити, що діапазон коливання вмісту обох елементів досить великий. Максимальна концентрація, про яку повідомляється, становить для цинку 46% і для заліза 45%. Однак, оскільки середній вміст заліза вищий, можна вважати, що такий високий вміст цинку обумовлено переробкою оцинкованого металевих брухту. Показано, що крім звичайно визначених компонентів у пилу містяться лужні метали та галогеніди (табл. 7), що є шкідливими домішками як у процесі утилізації пилу, так і при його похованні у відвалах.

Таблиця 7

Вміст елементів у пилу ДСП [63, 64]

Елемент	Pb	Cd	Ca	Cu	Al	Mg	Na	Si	Cl	F
Вміст, % мас.	0,5–2	0,1–0,3	1–7	0,01–0,2	0,1–1	0,1–3	0,1–1	0,1–2	0,5–3	0,05–0,1

Рентгеноструктурний аналіз пилу ДСП був виконаний і дослідниками [65], які виявили, що пил має досить складний склад, проте практично 100% піків було ідентифіковано. Компоненти, що містять залізо, були представлені

ZnFe_2O_4 , Fe_2O_3 і FeF_3 , цинк – ZnO , ZnF_2 і ZnCl_2 , свинець – PbCl_2 , PbF_2 і марганець був присутній у вигляді MnO_2 . Кількість хромвмісних сполук виявилася меншою, ніж можна виявити рентгеноструктурним аналізом. У пилу можуть бути невеликі кількості сульфатів, сульфідів і хлоридів, проте зазвичай 90% пилу представлено оксидами.

Оксиди цинку і свинцю в пилу менш стабільні, ніж оксид заліза, крім того, металевий цинк і свинець мають нижчу температуру плавлення порівняно з металевим залізом та іншими оксидами, що містяться в пилу. Тому в пірометалургійних процесах загальним підходом є селективне відновлення та відділення цих металів від заліза. Однак, оскільки пари цинку знову окислюються, технічно складно сконденсувати кольорові метали в металевому вигляді і тому продуктом зазвичай є сирий оксид цинку, який потрібно рафінувати [10].

Досвід відновлення електросталеплавильного пилу та визначення способу переробки з вилученням цинку

Пил газоочищення електрофільтрів може бути поточного утворення та з відвалів (табл. 9). В число залізовмісних відходів входить окалина цеху. Складування та поховання цих відходів не раціональне з технічної точки зору (високий вміст цинку та свинцю в пилу та високий вміст заліза у всіх відходах робить їх цінною сировиною) і в перспективі супроводжуватиметься зростаючими екологічними платежами.

Найбільш складним з погляду рециклінгу є пил газоочищення електрофільтрів ЕСПЦ. Як вже згадувалося, більшість дослідників сходяться в тому, що основним компонентом пилу є ферит цинку і складність його утилізації визначається саме тим, що залізо та цинк пов'язані в сполуку, яку необхідно розкласти хімічним або термічним методом. У зв'язку з цим були розраховані величини зміни вільної енергії Гіббса реакцій розкладання фериту цинку та його відновлення найбільш поширеними відновниками (вуглець, монооксид вуглецю, водень, метан).

Таблиця 8

Вміст компонентів у залізовмісних відходах електromеталургійного підприємства

Залізовмісні матеріали	Масова частка компонентів, %										
	Fe _{заг.}	FeO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	MnO	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	C	Zn _{заг.}	Pb _{заг.}
Пил газоочистки електрофільтрів	31,0	3,4	40,0	10,0	3,1	8,0	1,9	1,0	1,5	15,0	3,5
Пил газоочистки електрофільтрів свіжий		5,75	36,6	6,4	1,9	5,7	9,5			ZnO 25,7	PbO 3,3
Пил газоочистки електрофільтрів (з відвалів)		4,3	29,5	6,0	1,68	9,7	10,5			ZnO 29,0	PbO 5,0
Окалина ЕСПЦ	≥70	≥45,	35,0 -50,0	0,4 -1,5	0,4 - 0,8	-	-	-	0,06 - 0,8	-	-
Окалина СПЦ	≥65	≥45	40,0 -50,0	0,4 -1,5	0,4 - 0,8	-	-	-	0,06 - 0,8	-	-
Окалиновмісний шлам	≥65	≥20	≥60	0,5 -0,9	0,4 - 0,8	0,2 -0,6	0,1 - 0,4	0,1 - 0,3	-	-	-

Експериментальне визначення ефективних умов видалення цинку та свинцю з пилу ЕДП

Виконано експериментальне визначення ефективних умов видалення цинку та свинцю з пилу ЕДП стосовно умов організації відомих процесів з урахуванням рекомендованої підготовки шихти та умов відновлення. Найчастіше для організації процесу утилізації дисперсних залізовмісних відходів необхідне їх окомкування. Відомо, що визначальний вплив на комкування дисперсних матеріалів надає розмір частинок, співвідношення тонких і зернистих фракцій і гідрофільність матеріалу. Розсіванням окалини та пилу ЕДП показано, що вміст дрібних частинок (- 0,1 мм) становить 30...40% і 70%, відповідно.

Для оцінки комкуємості шихт, складених із застосуванням найбільш складного для окомкування виду залізовмісних відходів – окалини досліджували її гідрофільні властивості у чистому вигляді та з добавками

вуглецевого відновника (кокового дріб'язку, графіту). Визначали швидкість капілярного всмоктування води ($V_{вс}$) та максимальну капілярну вологоємність (МКВ). Матеріали попередньо просушували до вологості, що забезпечує їхню сипкість, подрібнювали і просіювали. Результати досліджень представлені у таблиці 9.

Всі випробувані матеріали та шихти здатні всмоктувати та утримувати воду, за винятком графіту, що є повністю гідрофобним. Невисока гідрофільна здатність і у кокового дріб'язку. Пил електрофільтрів і окалина мають високі значення МКВ (для порівняння МКВ гематитової руди і магнетитового концентрату становлять 7,9 і 14,3, відповідно). Природно, добавка вуглецевого відновника зменшує вологоємність шихти.

Таблиця 9

Показники гідрофільних властивостей досліджуваних матеріалів

№ з/ п	Матеріал	МКВ, %	Висота шару, см									
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
			$V_{вс}, 10^{-3} \text{м/с}$									
1	Окалина	25,5	1,2 5	0,64 5	0,31 5	0,16 6	0,07 4	0,03 4	0,02 3	0,01 7	0,01	-
2	Пил ЕДП	29,4	2,5 2	2,00 8	1,25	0,5	0,47	0,37	0,25	0,15	0,10 5	0,06
3	Коксовий дріб'язок	5,2	0,3 3	0,25	0,04	0,00 8	0,00 4	Процес припинився				
4	Окалина + графіт	16,5	0,8 1	0,11	0,02	0,00 5	-	-	-	-	-	-
5	Окалина + кокс	20,8	1,1 2	0,73	0,40 5	0,21	0,05	0,00 8	-	-	-	-

Проведено серію дослідів щодо дослідження процесу відновлення пилу ЕДП. Експериментальні дослідження проведені на термогравіметричній установці з контролем втрати маси вихідної наважки досліджуваного матеріалу у струмі аргону. Використовували закриті алундові тиглі. Дослідження кінетики видалення цинку при термічній обробці провели на обох видах пилу ЕДП (свіжий – 1 та після зберігання – 2), хімічний склад (% мас.) яких представлений у таблиці 10.

Таблиця 10

Склад пилу в експериментах по відновленню

Зразок	SiO ₂	CaO	MgO	MnO	Fe ₂ O ₃	FeO	ZnO	PbO
1 – свіжий пил	6,4	5,7	9,5	1,9	26,6	5,75	25,7	3,3
2 – після зберігання	6,0	9,7	10,5	1,62	29,5	4,3	29	5

Вихідний матеріал був магнітним, що, можливо, пов'язано з наявністю у складі магнітного закису-окису заліза (Fe₃O₄). При ізотермічній витримці зразків при 250°C протягом 3-х годин кількість видаленої вологи для свіжого пилу і після зберігання становила 2,5% і 5,2%, відповідно. Повільний нагрів (20...30°C на хвилину) в інтервалі температур 200°C...1100°C без вуглецевого відновника призвів до отримання немагнітного спеченого продукту. Максимальна втрата ваги відзначена для температури 700°C, що, очевидно, пов'язане з дисоціацією магнетиту.

Основна серія експериментів з теплової обробки пилу ДСП проведена у відновлювальних умовах при використанні як відновник антрациту (80% вуглецю). Досліди проводили в струмі аргону (витрата 7,5 л/год.) у закритому алундовому тиглі. Температура ізотермічних витримок становила 900°C, 1000°C, 1100°C. Час витримки – 2,5 години. Продукти відновлення після ізотермічних витримок при високих температурах виявилися сильно спеченими, особливо за температури 1100°C, і залишалися магнітними.

Хімічний аналіз продуктів відновлення показав, що після високотемпературної відновлювально-теплової обробки пилу ДСП вміст цинку у продуктах відновлення знижується (табл. 11).

Таблиця 11

Вміст цинку в продуктах відновлення пилу ЕДП за різних температур процесу

Вид матеріалу	Вміст Zn в продуктах при обробці при температурах, °C			
	Вихідний матеріал	900	1000	1100
1 – свіжий пил	11,6	11,2	1,87	1,13
2 – після зберігання	14,3	14,1	1,53	1,15

Результати відновлювально-теплової обробки показують, що при температурах порядку 1000...1100°C залізовмісний пил і шлам зазнають змін, що призводить до зменшення вмісту Zn в обробленому матеріалі, переходу вихідних пиловатих матеріалів в компактну, досить міцну масу. Вплив температури на втрату маси вихідних матеріалів показано на рисунку 1.

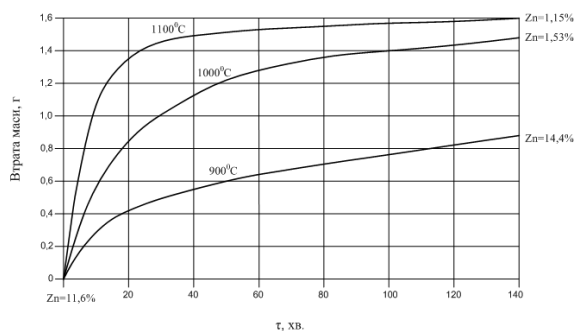


Рисунок 1 - Вплив температури на втрату маси в струмі аргону зразків пилу ЕДП з додаванням в шихту антрациту (15% від маси пилу)

Показано, що при використанні як вуглецьвмісного реагенту антрациту і графіту кінетика втрати маси зразка не змінюється. На рисунку 2 наведено результати відновлення графітом та антрацитом пилу після зберігання, а крапками відзначено втрату маси свіжого пилу в присутності антрациту. Близькість кривих та точок свідчить про відсутність значного впливу виду вуглецевого відновника на кінетику видалення цинку. У кінцевому продукті вміст цинку був на рівні 1,15...1,5%.

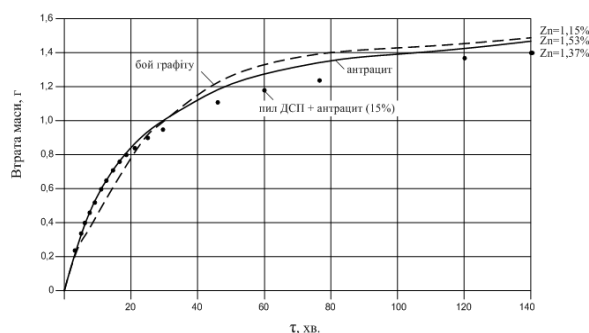


Рисунок 2 - Кінетика втрати маси наважки пилу 1 та 2 у присутності антрациту і графіту

Висновок. Таким чином, проведеними експериментами показано, що ефективне видалення цинку з пилу ДСП можливе вже при помірних

температурах 1000...1100°C, у тому числі при використанні як вуглецевого відновника некондиційних вуглецевих матеріалів. Для отримання рідкого продукту слід передбачити надмірну кількість вуглецю на навуглецювання з тим, щоб знизити температуру одержуваного розплаву.

ЛІТЕРАТУРА\REFERENCES

1. European Union. EUR-Lex: Access to European Union Law [Electronic resource] / European Union. — Access mode: <http://eur-lex.europa.eu>
2. Jordan Daci. EU Law on waste management and shipment: some main legal issues for metal industry in the European Union. 2011. “Education in ‘turbulent times’; the Albanian case in European and global context” 6th International Conference of the Albanian Institute of Sociology (Proceedings, I) See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/326625660>
3. Techno-economic study on the reduction measures, Best Available Technologies, of water discharges and waste generation from the primary and secondary iron and steel industry. Final report: 09.1993.
4. Jaakko Pöyry. Techno-economic study on the reduction measures, based on best available techniques of emissions (water, wastes, air) from the paper and board manufacturing industry. 1996. Luxembourg : Off. for Official Publ. of the Europ. Communities
5. Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC). Best Available Techniques Reference Document on the Production of Iron and Steel. European Commision. December 2001. <http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/pages/FActivities.htm>.
6. Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC). Draft reference Document on Best Available Techniques for the Production of Iron and Steel. European Commision. Draft February 2008. https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2019-11/IS_Adopted_03_2012.pdf
7. Найкращі доступні технології та методи управління (НДТМ) Довідковий документ для виробництва чавуну та сталі Директива 2010/75/ЄС «Про промислове забруднення (інтегроване запобігання та контроль забруднення)» Автори: Райнер Ремус, Мігель А. Агуадо-Монсоне, Серж Рудьє, Луїс Дельгадо Санчо. 2013. [https://mepr.gov.ua/files/docs/Atmosferne_povitria/NDTN/21.12.2022/IS_Adopted_03_2012_ukr_ed\(2\).pdf](https://mepr.gov.ua/files/docs/Atmosferne_povitria/NDTN/21.12.2022/IS_Adopted_03_2012_ukr_ed(2).pdf)
8. European Commission. BAT Note – Ferrous Metal Processing – Final Draft – August 2012 [Electronic resource] / European Commission. — Access mode: <https://www.epa.ie/publications/licensing--permitting/industrial/ied/BAT-Note---Ferrous-Metal-Processing---Final-Draft---August-2012---SH.pdf>.
9. European Union. Management of Waste from Extractive Industries [Electronic resource] / European Union. — Access mode: <https://eur-lex.europa.eu/EN/legal-content/summary/management-of-waste-from-extractive-industries.html>.
10. WeCoop. EU Policies and Regulations [Electronic resource] / WeCoop. — Access mode: <https://wecoop.eu/regional-knowledge-centre/eu-policies-regulations/>.
11. European Union. European Union Publication Detail [Electronic resource] / European Union. — Access mode: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/ea047e8-644c-4149-bdc6-9dde79c64a12>.

12. European Commission. EIPPCB - European Integrated Pollution Prevention and Control Bureau [Electronic resource] / European Commission. — Access mode: <http://eippcb.jrc.ec.europa.eu>.
13. Kiran Kumar, T., Roy, G.G. A Review on Processing of Electric Arc Furnace Dust (EAFD) by Pyro-Metallurgical Processes. *Trans Indian Inst Met* 75, 1101–1112 (2022). <https://doi.org/10.1007/s12666-021-02465-6>.
14. World steel Association, 2019. World Steel Association, *SteelStatistical Yearbook 2019*; Available on Internet: <http://www.worldsteel.org/statistics/statistics-archive/yearbook-archive.html>
15. Machado J. M. da Silva, Brehm F. Andrade, Carlos A.M. Moraes, Carlos A. dos Santos. Characterization study of electric arc furnace dust phases // *Materials Reserch*. 2006. N 9 (1). P.25-36. <https://doi.org/10.1590/S1516-14392006000100009>
16. Jalkanen H., Oghbasilasie H., Raipala K. Recycling of steelmaking dust – the RADUST concept // *Journal of Mining and Metallurgy*. 2005. N 41. P.1-16. <https://doi.org/10.2298/JMMB0501001J>.
17. Xiaolong Lin, Zhiwei Peng, Jiaxing Yan, Zhizhong Li, Jiann-Yang Hwang, Yuanbo Zhang, Guanghui Li, Tao Jiang. Pyrometallurgical recycling of electric arc furnace dust. *Journal of Cleaner Production*. Volume 149, 15 April 2017, Pages 1079-1100. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.128>.
18. R.L. Nyirenda. The processing of steelmaking flue-dust: A review. // *Minerals Engineering*. Volume 4, Issues 7–11, 1991, Pages 1003-1025. [https://doi.org/10.1016/0892-6875\(91\)90080-F](https://doi.org/10.1016/0892-6875(91)90080-F)
19. Mamdouh Omrana, Timo Fabritiusa. Utilization of blast furnace sludge for the removal of zinc from steelmaking dusts using microwave heating. // *Separation and Purification Technology*. Volume 210, 8 February 2019, Pages 867-884. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.09.010>.
20. Zhengqi Guo, Ruoning Zhan, Yue Shi, Deqing Zhu, Jian Pan, Congcong Yang, Yige Wang, Jin Wang. Innovative and green utilization of zinc-bearing dust by hydrogen reduction: Recovery of zinc and lead, and synergetic preparation of Fe/C micro-electrolysis materials. // *Chemical Engineering Journal*. Volume 456, 15 January 2023, P. 141-157. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.141157>
21. Yang Xue, Xiansheng Hao, Xiaoming Liu, Na Zhang. Recovery of Zinc and Iron from Steel Mill Dust—An Overview of Available Technologies. *Materials*, 2022, 15, 4127. <https://doi.org/10.3390/ma15124127>
22. R. O. McElroy, Murray McLaren. Processing of electric arc furnace dust via chloride hydrometallurgy. 1994. (pp.993-1010). *Hydrometallurgy*. https://doi.org/10.1007/978-94-011-1214-7_68
23. José Alencastro de Araújo, Valdir Schalh. Recycling of electric arc furnace (EAF) dust for use in steel making process. // *Journal of Materials Research and Technology*. 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmrt.2014.06.003>.
24. Manuel Leuchtenmüller, Ulrich Brandner. The catalytic effect of the metal bath on the zinc oxide reduction. // *Results in Engineering*. Volume 16, December 2022. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100514>
25. J.R.Donald, C.A.Pickles. Reduction of electric arc furnace dust with solid iron powder. // *Canadian Metallurgical Quarterly*. Volume 35, Issue 3, July–September 1996, Pages 255-267. [https://doi.org/10.1016/0008-4433\(96\)00009-2](https://doi.org/10.1016/0008-4433(96)00009-2).
26. D.Colbert, G.A. Irons. Electric arc furnace dust injection into iron and steel melts. // *Canadian Metallurgical Quarterly*. 2006. 45(1):1-8. <https://doi.org/10.1179/000844306794409057>.
27. Mamdouh Omran, Timo Fabritius, Yaowei Yu, Eetu-Pekka Heikkinen, Guo Chen, Yilmaz Kacar. Improving Zinc Recovery from Steelmaking Dust by Switching from Conventional Heating to

- Microwave Heating. // *Journal of Sustainable Metallurgy*, volume 7, p.15–26. 2021. <https://doi.org/10.1007/s40831-020-00319-x>
28. M.C. Mantovani, C. Takano, P.M. Büchler. EAF and secondary dust characterisation. // *Ironmaking & Steelmaking. Processes, Products and Applications*. Volume 31, 2004 - Issue 4. Pages 325–332. <https://doi.org/10.1179/030192304225018163>
29. Xue Bing Li, Wei Wang, Dong Hai Zhang, Li Xiong. Basic Properties of Iron and Steel Making Dust. // *Advanced Materials Research*. 2014. Volume 937. 187–190. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.937.187>.
30. Ashraf Bakkar. Recycling of electric arc furnace dust through dissolution in deep eutectic ionic liquids and electrowinning. // *Journal of Hazardous Materials*. 2014. 280(9–10):191–199. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.07.066/>
31. D. Mombelli, C. Di Cecca, C. Barella, E. Bondi. Experimental analysis on the use of BF-sludge for the reduction of BOF-powders to direct reduced iron (DRI) production. // *Process Safety and Environmental Protection*. Volume 102, 2016, P. 410–420. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2016.04.017>
32. Machado J. M. da Silva, Brehm F. Andrade, Carlos A.M. Moraes, Carlos A. dos Santos. Characterization study of electric arc furnace dust phases // *Materials Research*. 2006. N 9 (1). P.25–36. <https://doi.org/10.1590/S1516-14392006000100009>
33. Pan Hengyu, Xiaohong Zhang, Jun Wu, Yanzong Zhang, Lili Lin, GangYang, Shihuai Deng, LiLi, Xiaoyu Yu, Hui Qi, Hong Peng. Sustainability evaluation of a steel production system in China based on emergy. // *Journal of Cleaner Production*. Volume 112, Part 2, 2016, Pages 1498–1509. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.019>
34. Stewart, D.J.; Barron, A.R. Pyrometallurgical removal of zinc from basic oxygen steelmaking dust. // *A review of best available technology. Resour. Conserv. Recycl.* 2020, 157, 104746. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104746>
35. Yu-liang Wu, Ze-yi Jiang, Xin-xin Zhang, Peng Wang, Xue-feng She. Numerical simulation of the direct reduction of pellets in a rotary hearth furnace for zinc-containing metallurgical dust treatment. // *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials* volume 20, pages 636–644 (2013). <https://doi.org/10.1007/s12613-013-0777-5>.
36. Holtzer M., Kmita A., Roczniak A. The recycling of materials containing iron and zinc in the OxyCup Process. // *Arch. Foundry Eng.* 2015, 15, 126–130.
37. Hillmann C., Sassen K.J. Processing of zinc-bearing BOF dusts in a blast furnace. // *World Iron Steel* 2013, 5, 8–9. <https://www.dk-duisburg.de/wp-content/uploads/Artikel-Steelmaking-2014.pdf>
38. Yamada S., Itaya H., Hara Y. Simultaneous recovery of zinc and iron from electric arc furnace dust with a coke-packed bed smelting-reduction process. // *Iron Steel Eng.* 1998, 75, 64–67.
39. Felix A. López, Aurora López-Delgado. Enhancement of Electric Arc Furnace Dust by Recycling to Electric Arc Furnace. // *Journal of Environmental Engineering*. 2002. 128(12). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(2002\)128:12\(1169\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(2002)128:12(1169))
40. N. Antuñano, J.F. Cambra, P.L. Arias. Hydrometallurgical processes for Waelz oxide valorization. // *An overview. Process Saf. Environ. Prot.* 2019, 129, 308–320. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.06.028>
41. Coronado M., Andres A., Cheeseman C.R. Acid gas emissions from structural clay products containing secondary resources: Foundry sand dust and Waelz slag. // *J. Clean. Prod.* 2016, 115, 191–202. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.11.083>
42. Suetens T., Klaasen B., Van Acker K., Blanpain B. Comparison of electric arc furnace dust treatment technologies using exergy efficiency. // *J. Clean. Prod.* 2014, 65, 152–167. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.09.053>

43. A. Magdziarz, M. Kuźnia, M. Bembenek, P. Gara, M. Hryniewicz Briquetting of EAF Dust for its Utilisation in Metallurgical Processes. // Chem. Process Eng., 2015, 36 (2), 263-271. <https://doi.org/10.1515/cpe-2015-0018>
44. Chunbao Xu, Shengli Wu, Daqiang Cang. Numerical Modeling of NO Formation during Packed-bed Combustion of Coke Granules. // J. Univ. Sci. Technol. Beijing, 7(2000), No. 4, pp. 261-268.
45. Xu T., Ning Xj., Wang Gw. et al. Combustion characteristics and kinetic analysis of co-combustion between bag dust and pulverized coal. // Int J Miner Metall Mater 25, 2018, 1412–1422. <https://doi.org/10.1007/s12613-018-1695-3>
46. Wang M., Liu X. Applications of red mud as an environmental remediation material: A review. // J. Hazard. Mater. 2021, 408, 124-420. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124420>
47. Yang Xue, Xiaoming Liua. Detoxification, solidification and recycling of municipal solid waste incineration fly ash: A review. // Chemical Engineering Journal. Volume 420, Part 3, 2021, 130-349. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.130349>
48. Hui-ning Zhang, Jian-li Li, An-jun Xu, Qi-xing Yang, Dong-feng He, Nai-yuan Tian. Carbothermic Reduction of Zinc and Iron Oxides in Electric Arc Furnace Dust. // Journal of Iron and Steel Research International. Volume 21, 2014, pages 427–432. [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(14\)60066-2](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(14)60066-2)
49. Wei Zhang, Xiaoming Liu, Yaguang Wang, Zepeng Li, Yong Li, Yongyu Ren. Binary reaction behaviors of red mud based cementitious material : Hydration characteristics and Na⁺ utilization. // Journal of hazardous materials, 410, 124-592. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124592>
50. C.A. Pickles, Omid Marzoughi. Thermodynamic analysis of metal speciation during the chlorosulphation of electric arc furnace dust. // Minerals Engineering. 2019. 140:105874. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.105874>
51. Pickles C.A. Thermodynamic analysis of the selective chlorination of electric arc furnace dust. // Journal of Hazardous Materials. 2009. 166(2-3):1030-42. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.11.110>.
52. Havlík T., Souza B.V., Bernardes A.M., Schneider I.A.H., Mišková A. Hydrometallurgical processing of carbon steel EAF dust. // J. Hazard. Mater. 2006, 135, 311–318. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.11.067>
53. Peng Wei, Wenzhou Yu, Hao Chen, Weiyan Jiang. A New Strategy for Collaborative Utilization of Red Mud and Coal Fly Ash via Vacuum Reduction Technology. // Journal of Sustainable Metallurgy. 2022. 8(3) <https://doi.org/10.1007/s40831-022-00578-w>.
54. J. Buzin. EAF dust: an overview on the influences of physical, chemical and mineral features in its recycling and waste incorporation routes. // Journal of Materials Research and Technology. Volume 6, Issue 2, 2017, Pages 194-202. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2016.10.002>
55. Sylwia Oleszeka, Mariusz Grabda, Etsuro Shibata, Takashi Nakamura. Fate of lead oxide during thermal treatment with tetrabromobisphenol. // Journal of Hazardous Materials. Volume 261, 2013, Pages 163-171. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.07.028>
56. Tahir Sofilić, V. Novosel-Radovi, S. Cerjan-Stefanovic, A. Rastovcan-Mioc. The mineralogical composition of dust from an electric arc furnace. // Materials and Technologies. 2005. 39(5):149-154.
57. Tahir Sofilić, Alenka Rastovcan-Mioc, Stefica Cerjan-Stefanović, Vjera Novosel-Radović, Monika Jenko. Characterization of steel mill electric-arc furnace dust. // J Hazard Mater. 2004 Jun 18;109(1-3):59-70. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2004.02.032>.

58. Man-made materials in the production processes of metals and alloys. Monograph. Kamkina Lyudmila, Myanovska Yana, Proydak Yuriy, Proydak Andriy. Under the author's editorship. Dnipro: PBP "Economica", 2022. 352 p. ISBN 978-966-2637-73-1.
59. A. A. Khil'ko, L. M. Simonyan, A. A. Lysenko, O. V. Astashkina, A. A. Mikhalchan. Morphology of steel electrofurnace dust. // Steel Transl. 2013, 43, 254–257. <https://doi.org/10.3103/S0967091213050070>.
60. Laura M. Simonyan, Anna A. Alpatova, Nadezhda V. Demidova. The EAF dust chemical and phase composition research techniques. // Journal of Materials Research and Technology. Volume 8, Issue 2, April 2019, Pages 1601–1607. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2018.11.005>
61. Y. Proydak, L. Kamkina, Y. Mianovska. Micro-X-ray spectral determination of the chipboard dust samples elemental composition. // System technologies. Vol. 3. No. 140 (2022). P. 181–192. <https://doi.org/10.34185/1562-9945-3-140-2022-15>.
62. Tsubouchi N, Hashimoto H, Ohtaka N, Ohtsuka Y. Chemical characterization of dust particles recovered from bag filters of electric arc furnaces for steelmaking: some factors influencing the formation of hexachlorobenzene. // J Hazard Mater. 2010. Nov 15; 183(1-3):116–24. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.06.122>.
63. Suetens T., Guo M., Van Acker K., Blanpain B. Formation of the $ZnFe_2O_4$ phase in an electric arc furnace off-gas treatment system. // J Hazard Mater. 2015. Apr 28; 287:180–7. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.01.050>.
64. Suetens T., Guo M., Acker K.V. et al. Zn Loss into $ZnFe_2O_4$ in an Open Type Electric Arc Furnace: An In-Process Separation Performance Model. // J. Sustain. Metall. 1, 297–303 (2015). <https://doi.org/10.1007/s40831-015-0033-5>.
65. Касимов А.М., Тошинский В.И., Романовский А.А. Основные физико-химические свойства цинксодержащих отходов газоочисток металлургических агрегатов // Вісник МСУ /Vestnik MSU/. Технічні науки. – 2006. - Т. IX. - № 1. - С. 9–13.
66. Kashiwaya Y., Tsubone A., Ishii K., Sasamoto H. Thermodynamic Analysis on the Dust Generation from EAF for the Recycling of Dust. // ISIJ International, Vol. 44 (2004), No. 10, pp. 1774–1779. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.44.1774>
67. Jensen J.T. Reduction of EAF dust emissions by injecting it into furnace. // Metallurgical plant and technology international. - 1997. - №3. - P. 58–62. Reprint from "MPT-Metallurgical Plant and rechnology International" issue No. g/1997, p. 58–62.

Received 08.04.2025.

Accepted 20.05.2025.

THE CURRENT STATE OF SAWDUST PROCESSING OF CHIPBOARD AND IRON-CONTAINING METALLURGY WASTE

L.V. Kamkina, G.P. Stovpchenko, Ya.V. Mianovska, V.Yu. Seliverstov,
D.V. Avtonomov

Abstract. *The object of the study is the metallurgical technology of chipboard dust processing and iron-containing waste from metallurgical production.*

The purpose of the work is the analysis of physical and chemical processes, experimental research and the development of innovative technological solutions and recommendations for chipboard dust and iron-containing metallurgical waste.

Research methods – theoretical research is based on the basic principles of physical chemistry and the theory of metallurgical processes. Calculations of the thermodynamic equilibrium of oxide systems are based on the Gibbs theory and implemented using the computer program "FASTSage 6.0"; the chemical composition of the phase components of manganese ferroalloys was studied using a scanning electron microscope YSM-6300LA from JEOL, Japan.

Scientific novelty. Effective removal of zinc from chipboard dust is already possible at moderate temperatures of 1000...1100°C, including when using substandard carbon materials as a carbon reducer. To obtain a liquid product, it is necessary to provide an excess amount of carburizing carbon to lower the temperature of the resulting melt.

At temperatures of the order of 1000...1100°C, iron-containing dust and sludge undergo changes, which leads to a decrease in the content of Zn in the processed material, the transition of the original dust-like materials into a compact mass.

Practical meaning. The joint processing of chipboard slag and dust by dosing in different proportions is not rational, because in this case the concentration of zinc collected in the gas cleaning processing unit is reduced. It will be more effective to organize alternate processing of chipboard dust and slag at different time periods (for example, monthly).

Keywords: *electric arc furnace, dust, zinc, carbon, technology, thermodynamics*

Камкіна Людмила Володимирівна д.т.н., проф., декан факультету металургійних процесів і хімічних технологій, Український державний університет науки і технологій

Стовпченко Ганна Петрівна, д.т.н., проф., старший науковий співробітник НДЧ Український державний університет науки і технологій

Мяновська Яна Валеріївна д.т.н., проф., професор кафедри теоретичних основ металургійних процесів, Український державний університет науки і технологій

Селівьорстов Вадим Юрійович, д.т.н., проф., декан факультету електромеханіки та електрометалургії, Український державний університет науки і технологій

Автономов Дмитро Вікторович, аспірант кафедри теоретичних основ металургійних процесів, Український державний університет науки і технологій

Kamkina Lyudmila, Doctor of Technical Sciences, Professor, Dean of the Faculty of Metallurgical Processes and Chemical Technologies, Ukrainian state university of science and technologies.

Stovchenko Hanna, Doctor of Technical Sciences, Professor, Senior Researcher of the Research Center, Ukrainian state university of science and technologies.

Myanovska Yana, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Theoretical Foundations of Metallurgical Processes, Ukrainian state university of science and technologies.

Seliverstov Vadim, Doctor of Technical Sciences, Professor, Dean of the Faculty of Electromechanics and Electrometallurgy, Ukrainian state university of science and technologies.

Avtonomov Dmitry, Postgraduate Student of the Department of Theoretical Foundations of Metallurgical Processes, Ukrainian state university of science and technologies.