

УТВОРЕННЯ ТА ЕМІСІЯ СТІЙКИХ ОРГАНІЧНИХ ЗАБРУДНЮВАЧІВ У ЧОРНІЙ ТА КОЛЬОРОВІЙ МЕТАЛУРГІЇ УКРАЇНИ

Бондар О.І.¹, Риженко Н.О.¹, Четвериков В.В.², Коваль С.М.², Россоха А.В.²

¹Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління
вул. Митрополита Василя Липківського, 35, корп. 2, 03035, м. Київ

²Інститут газу Національної академії наук України
вул. Дегтярівська, 39, 03113, м. Київ
chvvingas@gmail.com, alsko2011@ukr.net

За результатами інвентаризації, проведеної у 2003 році, та експертної оцінки у 2020 році, обсяги емісії стійких органічних забруднювачів (СОЗ) металургійним комплексом становлять близько 90% від загального обсягу емісії СОЗ в Україні. Відповідний внесок до цього обсягу емісії додали агломераційне виробництво та переплавлення металобрухту в електродугових печах.

У праці запропоновані як організаційні, так і технологічні заходи, що дозволять запобігти утворенню та забезпечать ефективне видалення СОЗ в металургійних процесах. Зниженню емісії СОЗ мають сприяти зміни в структурі виробництва сталі з поступовою заміною технологій агломерації залізної руди на технології пряме відновлення заліза. Під час електродугового переплавлення (ЕДП) брухту особлива увага має приділятися контролю за вмістом у металобрухті хлорвмісних компонентів.

Здійснені науково-практичні дослідження підтверджують висновки, що використання вторинної сировини у процесах виплавлення сталі, міді та алюмінію обумовлює значно більші коефіцієнти емісії СОЗ ніж використання вихідної сировини.

Технологічне вдосконалення існуючих виробництв агломерації залізної руди та переплавлення брухту в електродугових печах має здійснюватися з використанням таких ефективних заходів, як рециркуляція газів, здійснення їх внутрішнього або зовнішнього доопалення.

Значна кількість діоксинів може виходити з електродугового процесу разом з пилом в разі застосування сорбентів для його вловлювання. За подальшого перероблення пилу з метою рециклінгу металів, або в разі його додавання до сировини у виробництві будівельних матеріалів необхідно застосовувати технічні рішення, спрямовані на деструкцію/імобілізацію залишків діоксинів. *Ключові слова:* стійкі органічні забруднювачі, агломераційне виробництво, електродугове переплавлення, найкращі доступні методи та практики.

Formation and emission of POPs in ferrous and non-ferrous metallurgy of Ukraine. Bondar O., Ryzhenko N., Chetverykov V., Koval S., Rossokha A.

According to the results of an inventory conducted in 2003 and an expert assessment in 2019, the volumes of persistent organic pollutants (POPs) emissions by the metallurgical complex make up about 90% of the total volume of POPs emissions in Ukraine. Approximately the same contribution to this volume of emissions was made by agglomeration production and remelting of scrap metal in electric arc furnaces.

The article proposes both organizational and technological measures that will prevent the formation and ensure effective removal of POPs from metallurgical processes. Changes in the structure of steel production with the gradual replacement of iron ore agglomeration technologies with direct iron recovery technologies should contribute to the reduction of POP emissions. During electric arc remelting (EDP) of scrap, special attention should be paid to control the content of chlorine-containing components in the composition of scrap metal. The scientific and practical studies carried out confirm the conclusions, that the use of secondary raw materials in the processes of smelting steel, copper, and aluminum results in significantly higher POP emission factors than the use of fossil raw materials.

Technological improvement of the existing production of iron ore agglomeration and remelting of scrap in electric arc furnaces should be carried out using such effective measures as gas recirculation, their internal or external reheating.

A significant dioxin amount may come out of the electric arc process together with dust in the case of using sorbents for its removal. In the further processing of dust for the purpose of metal recycling or in the case of its addition to raw materials in the production of building materials, it is necessary to apply technical solutions aimed at the destruction/immobilization of dioxin. *Key words:* persistent organic pollutants, sinter production, electric arc melting, best available methods and practices.

Згідно з вимогами Стокгольмської конвенції про стійкі органічні забруднювачі кожна країна – сторона конвенції, має розробити та реалізувати план дій щодо запобігання або зменшення їх емісії антропогенними джерелами. В Україні за результа-

тами експертної оцінки у 2020 році найбільшими джерелами викидів ПХДД/ПХДФ у повітря були чорна і кольорова металургія – 882,5 г ТЕQ/рік та виробництво теплової та електричної енергії – 144,2 г ТЕQ/рік [1]. Огляд досліджень емісії СОЗ

в світі засвідчує, що в більшості промислово розвинутих країн світу металургія та енергетика також є найбільшими за обсягами джерелами емісії CO₂ [2]. Під час інвентаризації джерел емісії CO₂ за методикою UNEP [3] найбільші коефіцієнти емісії CO₂ зазначені для агломераційного виробництва та виробництва сталі з вторинних ресурсів.

Виробництво агломерату. Агломерація залізної руди визнана одним з головних джерел стійких органічних забруднювачів. Визначено два базових механізми утворення діоксинів в агломераційному виробництві: синтез з прекурсорів і синтез «de novo» [4]. Прекурсорами можуть бути органічні молекули подібні до діоксинів (хлорфеноли, хлордифеніли). Синтез de novo здійснюється у гомогенному середовищі (500 – 800 °C) або гетерогенному середовищі з каталізатором (200 – 400 °C) з макромолекулярного вуглецю або поліциклічних ароматичних вуглеводнів [5]. На кількість утворених діоксинів впливає склад шихти, зокрема, вміст органічних компонентів, сполук хлору та каталізаторів синтезу діоксинів.

У залізних рудах зазвичай містяться невеликі кількості органічних матеріалів. Значна їх кількість може з'явитися при додаванні в шихту металевої стружки, прокатної окалини з залишками мастильних матеріалів та емульсій. З рудою, коксом і флюсами до шихти можуть потрапляти неорганічні сполуки хлору (NaCl, KCl, CaCl) та сполуки міді, що є каталізаторами синтезу діоксинів [6]. З коксовим дріб'язком до шихти можуть потрапляти хлорфеноли і ПХД, які є власне прекурсорами утворення ПХДД/Ф.

Вивчення процесів формування CO₂ під час агломерації залізної руди свідчать, що утворення діоксинів здійснюється головним чином всередині шару агломерату, коли через нього проходять гарячі гази, а також в газоходах на дрібнодисперсних частинках пилу. Отже, щоб мінімізувати утворення ПХДД/ПХДФ процес агломерації має вестися максимально стабільно за такими параметрами як склад шару агломерату, швидкість його переміщення, висота шару; а також має забезпечуватися щільність газоходів та фільтрів.

Під час ідентифікації джерел емісії CO₂ [3] в агломераційному виробництві означені такі класи:

Перший клас передбачає установки з високим використанням відходів, зокрема, металевої стружки з емульсією для різання або іншим хлорованим забрудненням, з обмеженим контролем технологічного процесу, а також з відсутньою або обмеженою системою очищення газів. Для розрахунків використовується коефіцієнт емісії – 20 мг ТЕQ/т.

Другий клас передбачає установки з якісним контролем технологічного процесу, в якому мало використовують відходи, зокрема емульсії. Для розрахунків використовується коефіцієнт емісії – 5 мг ТЕQ/т.

Третій клас включає установки, на яких вжито комплексних заходів щодо контролю за ПХДД/

ПХДФ у відповідності до Керівних принципів з найефективніших доступних методів (НДМ)[4]. Для розрахунків встановлено коефіцієнт емісії 0,3 мг ТЕQ/т.

Щодо інших CO₂, то доведено, що існує висока кореляція між концентраціями в димових газах ПХДД/Ф та 12 діоксиноподібних поліхлорованих дифенілів і це дає підстави припускати, що механізми утворення ПХД і ПХДД/Ф взаємопов'язані [4]. ПХД можуть бути присутніми в агломераційній сировині. Концентрації ПХД в коксового дріб'язку і залізній руді може становити близько 1 – 1,6 мг/т. Більша частина вихідних ПХД руйнується в зоні спікання. Керівним документом щодо ідентифікації та оцінки емісії CO₂ [3] для розрахунків визначені такі коефіцієнти емісії ПХД: для забрудненої шихти 1 мг ТЕQ на тонну агломерату, а для незабрудненої шихти – 0,2 мг ТЕQ на тонну агломерату.

Агломераційне виробництво України. В 2005 році в Україні в експлуатації було 52 агломераційні машин загальною продуктивністю 43600 тис. тон агломерату на рік. У 2021 за даними Держстату України виробництво агломерованого концентрату залізної руди склало 53479300 т [7] Найширшого застосування в Україні набули агломераційні машини стрічкового типу. Аглофабрики України не мають сучасних засобів очищення агломерації газів від CO₂. Частина аглофабрик України використовує мокрі технології очищення аглогазів (труба Вентурі, скруббер-крапельловлювач). Інша частина аглофабрик використовують сухі методи (циклони та електрофільтри) Інколи сухі системи очищення газів вдосконалюються додаванням другої ступені очищення на рукавних фільтрах.

За останні роки спостерігається тенденція до скорочення агломераційних виробництв та їх заміни більш екологічно прийнятними виробництвами котунів та рудного концентрату. Можна прогнозувати, що при відновленні металургійної інфраструктури країни, зруйнованої під час військових дій, агломераційне виробництво замінюватиметься більш сучасними екологічно ефективними технологіями прямого відновлення заліза. Але, зважаючи на економічні чинники, такий перехід не завжди може бути здійсненим швидко. Тому вдосконалення старих виробництв залишається актуальним.

Перш за все, вдосконалення має здійснюватися завдяки більш ретельній підготовці шихти. Зокрема, до зниження утворення CO₂ може призвести заміна, наприклад, коксового дріб'язку антрацитом. Для мінімізації органічних речовин в шихті може застосовуватися сортування, прокалювання або знежирення вторинної сировини. Для придушення каталітичних реакцій на поверхні агломерату до складу шихти можуть додаватись сполуки азоту, зокрема карбамід. Використання карбаміду також мінімізує викиди хлористого та фтористого водню. Згідно з дослідженнями, проведеними у Великобританії [8], додавання сечовини дозволило скоротити утворення

ПХДД/ПХДФ приблизно на 50%. Однак слід врахувати, що такі заходи можуть призвести до збільшення пилу та NO_x в димових газах.

Наступними технологічними прийомами, що можуть призвести до скорочення емісії діоксинів, – це застосування рециркуляції відхідних газів [3] та/або зовнішнього доопалювання. Рециркуляція агломераційних газів знижує викиди діоксинів через їх деструкцію в агломераційному шарі. При цьому скорочуються обсяги димових газів та вміст в них твердих часток, що полегшує подальше очищення газів у системі очищення газів.

В Україні в деяких випадках об'єкти металургії та енергетики знаходяться в єдиному промисловому комплексі і в разі об'єднання систем обробки димових газів в один комплекс можна отримати синергетичний ефект. Зокрема, про це свідчать дослідження, що проводилися у Інституті газу НАН України на початку 80-х років минулого століття, як наслідок, були розроблені технічні пропозиції щодо знешкодження агломераційних газів шляхом подачі їх у топку котлів ТЕЦ, прилеглих до комбінатів «Міттал Стіл» та «Азовсталь». Результатами досліджень була доведена ефективність такого методу для зниження емісії CO , NO_x , SO_x та зменшення витрат на експлуатацію систем очищення газів. Дослідження емісії CO_2 промисловим комплексом на той час не проводилися. Введення аглогазів в топку котла є варіантом зовнішнього доопалювання, але при цьому відсутні капітальні витрати на доопалювач, а є лише незначні витрати на забезпечення транспортування аглогазів до ТЕЦ. Також може бути досягнута економія капітальних витрат на апаратах сіркоочищення через їх використання тільки апаратів за котлами ТЕЦ. Окрім зниження сумарних капітальних витрат забезпечується зниження експлуатаційних витрат: споживання атмосферного повітря котлами ТЕЦ зменшується на 30–40% та витрата палива на ТЕЦ внаслідок надходження додаткового тепла від аглогазів знизиться на 3–5%.

Дослідження підтвердили, що внаслідок введення аглогазів в топку котла в результаті баластування зони горіння інертними компонентами агло-

газів викид оксидів азоту від котлів ТЕЦ можна зменшити у 2 рази.

Основні показники ефективності застосування спалювання аглогазів в топці котла ТЕЦ наведені в таблиці 1.

Для підвищення ефективності видалення діоксинів з відхідних газів агломашин необхідно існуючі системи доповнити засобами сорбційного очищення, зокрема, перед рукавними або електрофільтрами необхідно організувати введення в газовий потік активованого вугілля, бурого вугілля або цеолітів. Системи селективного каталітичного відновлення, які, в деяких випадках, засвідчили високу ефективність видалення діоксинів, для аглогазів з високим вмістом пилу можуть не забезпечити належний каталітичний ефект.

Виробництво чорних та кольорових металів з вторинної сировини в Україні. Використання вторинної сировини для виплавлення сталі, міді та алюмінію обумовлює значно більші коефіцієнти емісії CO_2 ніж використання вихідної сировини.

Переплавлення сталевих брухту та інших залізовмісних вторинних матеріалів переважно здійснюється у електродугових печах. В Україні кількість сталі, що виробляється у електроплавильному виробництві складає понад 7%. Забруднення металобрухту регулюється ДСТУ 4121-2002. «Метали чорні вторинні. Загальні технічні умови». Кількість домішок та мастил в брухті за стандартом має не перевищувати 3–5%.

Під час виробництва вторинної сталі в електродугових печах ПХДД/Ф утворюються за двома механізмами: з прекурсорів, джерелом для яких є органічні сполуки, що присутні в шихті, а також шляхом синтезу de novo за каталітичної участі металів [4]. Для реалізації першого механізму до печі з металобрухтом надходять металева стружка із залишками змащувально-охолоджуючих рідин, лом електричного та гідравлічного обладнання із залишками оливої та інший лом, що був у контакті з хлорорганічними сполуками. Для синтезу de novo джерелом вуглецю можуть бути графітові електроди, слідові кількості хлору можуть бути присутніми в деяких завантажу-

Таблиця 1

Основні показники ефективності застосування спалювання аглогазів в топці котла ТЕЦ

№ п/п	Найменування величин	до подачі аглогазів у котли ТЕЦ	після подачі аглогазів у котли ТЕЦ
	Продуктивність аглофабрики, млн. т /рік	1,9	1,9
	Сумарний обсяг газів, що відходять, від аглофабрики й ТЕЦ, млрд. nm^3 /рік	15,0	9,5
	Сумарний викид від аглофабрики та ТЕЦ, тис. т/рік:		
	пил	4,5	3,0
	окис вуглецю	91,4	11,9
	сірчистий ангідрид	6,0	6,0
	окисли азоту	3,85	1,9

вальних матеріалах і флюсах. В якості каталізатору може виступати низка металів, що надходять з шихтою, а також безпосередньо залізо.

При ідентифікації джерел емісії CO₃ [3] в сталеплавильному виробництві для електродугових печей з попереднім підігрівом брукхту і недосконалою системою очищення газів встановлено коефіцієнт викидів діоксинів 10 мг ТЕQ/т сталі, а для комплексів, що мають системи доопалювання та рукавні фільтри він складає вже 3 мг ТЕQ/т сталі. Для електродугового переплавлення металобрукхту характерна висока кореляція між концентраціями ПХДД/Ф та 12 конгенерами ПХД [9]. Вірогідність надходження ПХД в процес плавлення разом з шихтою є високою за ймовірного попадання в шихту елементів електротехнічного та гідравлічного обладнання, контактуючого з ПХД.

Керівним документом щодо ідентифікації та оцінки емісії CO₃ [3] для розрахунків викидів ПХД при переплавленні брукхту в електродугових печах з доопалюванням та рукавними фільтрами в разі використання забрудненої шихти встановлений коефіцієнти емісії 0,2 мг ТЕQ на тону сталі.

Найліпші доступні методи запобігання емісії CO₃ в процесах плавлення металобрукхту можна поділити на такі, що впливають безпосередньо на базові технологічні операції та ті, що впливають на ефективність видалення CO₃ з продуктів технологічного процесу.

Першочерговими заходами для зменшення емісії діоксинів при електродуговому переплавленні є [10]:

- контроль за складом металобрукхту та, за необхідності, його попереднє очищення;
- здійснення внутрішнього або зовнішнього доопалювання відхідних газів.

Останнім часом все більше нових і існуючих електродугових печей обладнані системами попереднього нагрівання брукхту відхідними газами з метою підвищення ефективності використання енергії. Попереднє нагрівання брукхту призводить до переходу у газову фазу органічних забруднювачів без повного розкладання, які стають прекурсорами утворення ПХДД/Ф. Для запобігання утворенню прекурсорів організують доопалення газів після підігріву шихти, але додаткова енергія необхідна на доопалення може бути співставною з енергією, використаною на попереднє нагрівання шихти [4].

Для зниження концентрації ПХДД/ПХДФ у викидах до значень менш ніж 0,1 нг ТЕQ/нм³ наведені першочергові заходи мають передбачити й вдосконалення системи очищення газів. Для діоксинів ці заходи полягають у введенні сорбентів перед рукавним фільтром. В якості адсорбенту може використовуватися активоване вугілля, буровугільний кокс. Слід зауважити, що сорбенти не руйнують, а лише видаляють діоксини з димових газів, і проблема їх знешкодження у складі шлаків з систем газоочищення потребує окремого вирішення.

Виробництво вторинної міді в Україні здійснюється переважно у шахтних печах, а для виробництва вторинного алюмінію використовуються відбивні та обертові печі. Для очищення газів використовуються багатоступеневі система очищення газів, які складаються із скрубєрів, рукавних та електрофільтрів. Поточну емісію CO₃ під час виплавлення вторинної міді та алюмінію оцінити складно за відсутності даних щодо змін в структурі галузі та обсягах виробництва за останній час.

Джерелом прекурсорів для синтезу діоксинів при переплавленні брукхту міді та алюмінію є відходи електротехнічних виробів з залишками органічних матеріалів. Утворенню діоксинів сприяють каталітичні властивості міді.

Заходи щодо зменшення емісії діоксинів під час переплавлення вторинної міді та алюмінію такі ж як і у випадку з переплавленням брукхту чорних металів [11]:

- контроль за складом металобрукхту та, за необхідності, його попереднє очищення;
- здійснення зовнішнього доопалювання відхідних газів або подача кисню у вихідну зону печі.

Вторинними заходами можуть стати, зокрема, введення сорбентів (активоване вугілля) перед рукавними фільтрами та застосування засобів каталітичного розкладання діоксинів.

Феросплавне виробництво. Феросплавні підприємства України у 2021 році виготовили 858,7 тис. т феросплавів. Виробництво феросплавів – це багатостадійний процес, що може мати стадії агломерації та плавлення в електродугових печах. Відповідно під час визначення обсягів емісії діоксинів має бути окреслена можливість їх утворення за розглянутими вище механізмами. Системних досліджень викидів діоксинів у феросплавному виробництві небагато, тому керівні документи з ідентифікації та кількісної оцінки емісії рекомендують використовувати коефіцієнти емісії, визначені для більш досліджених виробництв (виплавка сталі в електродугових печах та спікання агломерату), але базовим чинником залишається ступінь забруднення шихти. Для розрахунку емісії процесів з використанням забрудненої шихти з нескладними системами очищення газів рекомендованим є досить високий коефіцієнт – 100 мкг ТЕQ/ т продукту, а згідно з висновками щодо найефективніших доступних технологій [12], затверджених рішенням Європейської комісії № 2016/1032 від викиди від 13.06.2016, викиди для печей, що виробляють феросплави, мають бути на рівні $\leq 0,05$ нг I-ТЕQ/нм³.

З трьох найбільших феросплавних заводів України, що використовують електропечі (Нікопольський, Запорізький, Побужський) тільки Запорізький використовує в шихті металеву стружку, що може стати джерелом прекурсорів для утворення діоксинів. Для інших заводів необхідно розглядати механізми синтезу de novo із сполук хлору, які може вмішувати руда.

Емісія CO₂ з продуктами очищення димових газів. Агломераційне виробництво та переплавлення брухту в дугових печах – це не тільки найпотужніші джерела викидів CO₂ в металургії, але й значні джерела емісії CO₂ з пилом та шламами, що видаляються з систем очищення газів. Для 2 та 3 класів агломераційних установок визначені доволі високі коефіцієнти емісії залишками 1 та 2 мг ТЕQ на тонну агломерату. Для електродугового переплавлення брухту коефіцієнт емісії з шламами становить 15 мг ТЕQ на тонну сталі. З огляду на це, внесок в емісію діоксинів з викидами та залишками в загальну емісію може бути співставним. Реальна емісія CO₂ із залишками залежить від того, яка частка пилу та шламів спрямовується на подальше перероблення з метою рециклінгу металів, а яка розміщується у шламонакопичувачах. Останнім часом набули розвитку технології, що забезпечують перероблення пилу та шламів з метою рециклінгу заліза та інших металів (цинк, свинець) та скорочення обсягів відходів [13]. Пил з установок електродугового переплаву може мати у своєму складі до 5 мас.% хлору переважно у формі хлоридів лужних металів [14], а також містити вловлені сорбентом діоксини, тому для здійснення таких процесів важливо проаналізувати умови для деструкції та синтезу de novo діоксинів. Технології рециклінгу металів побудовані головним чином на пірометалургійних процесах. У таблиці 2 наведені характеристики базових технологій перероблення пилу електродугових печей.

Головними чинниками, що впливають на можливість емісію діоксинів у наведених процесах, – це температурний режим обробки, спосіб заванта-

ження пилу в зону обробки та наявність холодних зон у робочому просторі печі. Можна припустити, що в процесах з твердим відновленням та більш низькими температурами обробки ефективність деструкції залишків діоксинів буде меншою, ніж у високотемпературних процесах, але нерівномірний розподіл температур у робочому просторі високотемпературної печі може знівелювати таку перевагу. У найбільш розповсюдженому Waelz-процесі є відносно холодні зони обертової печі, де діоксини можуть перейти у газову фазу і покинути піч не досягнувши температури їхньої деструкції. На можливість емісії діоксинів у Waelz-процесі зазначено у праці [15]. Забезпечити проходження газифікованих діоксинів зонами високих температур можна шляхом використання зануреної фурми (наприклад, Ausmelt-процес), або конструкцією самої печі, що не передбачає наявності «холодних» застійних зон, (наприклад, багатоподові печі). розробляючи заходи щодо запобігання емісії діоксинів, у процесах рециклінгу металів з пилу електродугових печей має приділятися особлива увага зазначеним вище чинникам. Для остаточно знешкодження шлаків та летючої золи з процесів рециклінгу металів застосовуються технології іммобілізації залишків шляхом додавання до спеціальних бетонів та оскловування, шляхом виплавлення склоподібних гранул та керамічних виробів [16, 17, 18]. Підвищення ефективності іммобілізації при виготовленні бетонів може досягатися шляхом додавання до вихідної суміші відходів пластику [17], а при вітрифікації – відходів склобою [19]. При оскловуванні летючої золи в суміші зі склобомом у співвідношенні 7:3 за температури 1450 °C було

Таблиця 2

Пірометалургійні процеси рециклінгу металів з пилу електродугових печей [13]

Процес	Тип печі	Температура, °C	Продукти	Масштаб	Енергоефективність	Режим відновлення
Waelz	Обертова піч	1150-1200	ОЦН*, ЗВШ**	Промисловий	Низька	Тверде відновлення
RHF	Піч з оберто-вим подом	1250-1300	ОЦН, ЗПВ***	Промисловий	Низька	Тверде відновлення
PRIMUS	Багатоподова піч	1000-1150	ОЦН, ЗПВ	промисловий	Високий	Тверде відновлення
PIZO	Індукційна піч	1300-1500	ОЦН, чавун, шлак	Промисловий	Високий	Відновлювальне плавлення
Занурена плазма	Плазмовий реактор	1400-1600	ОЦН, рідкий чавун і шлак	промисловий	Низька	Відновлювальне плавлення
OXYCUP	Вагранка	1450-1600	ОЦН, чавун і шлак	Промисловий	Низька	Відновлювальне плавлення
Ausmelt	Піч з зануреною фурмою	1250-1350	ОЦН, рідкий чавун і шлак	Промисловий	Висока	Відновлювальне плавлення
ESRF	Електро-плавильна піч	1400-1600	ОЦН, рідкий чавун і шлак	Промисловий	Низький	Відновлювальне плавлення

* ОЦН – оксид цинку неочищений

** ЗВШ – залізовмісний шлак

*** ЗПВ – залізо прямого відновлення

досягнуто ефективність видалення/деструкції ПХДД/Ф на рівні 91–92% [19].

Гранульовану летюча золу також доцільно додавати в шахту при застосуванні технологій деструкції/оскловування інших токсичних відходів. Зокрема, в Україні є технології та обладнання для знешкодження небезпечних відходів у розплавах з використання доменного шлаку шляхом іммобілізації токсичних компонентів відходів у склоподібної матриці [20]. Технологія продемонструвала високу ефективність у знешкодженні 20%-порошкових препаратів ДДТ та шлаків, що містять важкі метали. Варто очікувати, що додаючи до шихти летючої золи та шлаків така технологія забезпечить високу ефективність деструкції/іммобілізації стійких органічних забруднювачів.

Висновки

1. Експертна оцінка підтвердила, що найбільший внесок в емісію СО₂ металургійним комплексом України додають агломераційне виробництво та переплавлення металобрухту в електродугових печах.

2. Базовим організаційним засобом скорочення емісії СО₂ агломераційним виробництвом в Україні – це перехід на альтернативні процеси, зокрема, на пряме відновлення заліза.

3. Використовуючи метод електродугового переплавлення брухту, базовим організаційним заходом скорочення емісії СО₂ має стати контроль за складовою вмісту у металобрухті та, за не необхідності, його попереднє очищення від хлорвмісних компонентів.

4. Найбільш ефективними заходами з технологічного вдосконалення існуючих виробництв агломерації залізної руди та переплавлення брухту в електродугових печах будуть з використанням рециркуляції газів, здійснення їх внутрішнього або зовнішнього доопалення.

5. Для остаточного видалення СО₂ з димових газів металургійних установок доцільно оснастити системи очищення газів засобами сорбційного очищення в комбінації з рукавними фільтрами.

6. При проектуванні виробництв з утилізації компонентів пилу електродугових печей необхідно враховувати вимоги до технологічних та конструктивних параметрів установки, що витікають з необхідності максимальної деструкції діоксинів та створення умов для запобігання їх синтезу de novo.

7. Залишкові кількості діоксинів в летючій золі та шлаках можуть бути знешкоджені в технологіях вітифікації токсичних компонентів небезпечних відходів.

Література

1. Четвериков В.В., Россоха А.В., Сігал І.Я. Ідентифікація джерел емісії стійких органічних забруднювачів в Україні та шляхи скорочення викидів з найбільш проблемних джерел. Енерготехнології та ресурсозбереження, 2023 № 3, стор. 91–102. DOI: 10.33070/etars.3.2023.08
2. Khushbu Salian, Vladimir Strezov, Tim J. Evans, Mark Taylor, Peter F. Nelson. Application of national pollutant inventories for monitoring trends on dioxin emissions from stationary industrial sources in Australia, Canada and European Union. *PLOS ONE*. 2019. № 10. p. 224–328. DOI: 10.1371/journal.pone.0224328.
3. Toolkit for Identification and Quantification of Releases of Dioxins, Furans and Other Unintentional POPs. UNEP, 2013.
4. Reference Document on Best Available Techniques for the Production of Iron and Steel. BAT Reference Document (BREF). European IPPC Bureau, Seville, Spain. European Commission 2013. https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2019-11/IS_Adopted_03_2012.pdf
5. De novo synthesis in iron ore sintering. *International Journal of Environment and Pollution*. January 2016.
6. Kawaguchi et al., Promoter material and inhibitor material for dioxins formation in sintering process. *Tetsu-to-Hagané*, Vol. 88, No. 7, 2002, pp. 12–19.
7. Виробництво промислової продукції за видами за 2021 рік. Держстат України, 1998–2022.
8. Development of UK Cost Curves for Abatement of Dioxins Emissions to Air, Final Report. Draft for consultation, Entec UK Ltd. 2003.
9. Fisher et al., Effects of operational factors on the formation of toxic organic micropollutants in EAF steelmaking, European Commission. Technical Steel Rresearch. Final Report. 2005.
10. Guidelines on Best Available Techniques and Provisional Guidance on Best Environmental Practices Relevant to Article 5 and Annex C of the Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants, 2021.
11. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Non-Ferrous Metals Industries. Industrial Emissions Directive 2010/75/EU. European Commission, European IPPC Bureau, Joint Research Centre, 2017.
12. Commission Implementing Decision (EU) 2016/1032 of 13 June 2016 establishing best available techniques (BAT) conclusions, under Directive 2010/75/EU of the European Parliament and of the Council for the non-ferrous metals industries.
13. Thottempudi Kiran Kumar, Gour Gopal Roy. A Review on Processing of Electric Arc Furnace Dust (EAFD) by Pyro-Metallurgical Processes. *Transactions of the Indian Institute of Metals/ 2022 Volume 75*, pages1101–1112 DOI: 10.1007/s12666-021-02465-6
14. Pedro Jorge Walburgakeglevich De Buzin, N.C. Heck, C. Heck, Antônio Cezar Faria Vilela. 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, April–June 2017, Pages 194–202. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2016.10.002>
15. K. Mager, U. Meurer & J. Wirling Minimizing dioxin and furan emissions during zinc dust recycle by the waelz process. *JOM: the journal of the Minerals, Metals & Materials Society* 2003 volume 55, pages 20–25. DOI: 10.1007/s11837-003-0099-6
16. Carlos Mauricio Fontes Vieira, Rubén Sanchez, Sergio Neves Monteiro, Nicolás Lallac, Nancy Quarantac Recycling of electric arc furnace dust into red ceramic. *Journal of Materials Research and Technology*. Volume 2, Issue 2, April–June 2013, Pages 88–92. DOI: 10.1016/j.jmrt.2012.09.001

17. Utilization of Electric Arc Furnace Dust as Raw Material for the Production of Ceramic and Concrete Building Products. *Journal of Environmental Science and Health Part A Toxic/Hazardous Substances & Environmental Engineering* 2006, 41(9):1943-54. DOI: 10.1080/1093452060077924
18. Taisir Khedaywi¹, Tareq Al-Kattab, Mohammad A.T. Alsheyab International Effect of Electrical Arc Furnace Dust (EAFD) on the Properties of Asphalt Cement and Asphalt Concrete Mixtures: State of the Art *Journal of Engineering, Science, Technology and Innovation* Vol 3, Issue 1, 2023. <https://www.ijesti.com>
19. Yi-Ming Lin¹, Shao-Qi Zhou¹, Shun-I Shih, Sheng-Lun Lin, Lin-Chi Wang⁴, Zong-Sian Wu. Fate of Polychlorinated Dibenzo-p-dioxins and Dibenzofurans during the Thermal Treatment of Electric Arc Furnace Fly Ash. *Aerosol and Air Quality Research*, 11: 584–595, 2011. DOI: 10.4209/aaqr.2011.07.0099
20. Деклар. пат. на корисну модель 16042 Укр., МПК (2006) F 23 G 7/00. Плавильна піч для знешкодження токсичних речовини. В. М. Олабін, О. Б. Максимук, В. В. Четвериков. Заявл. 16.02.2006 № u200601625. Опубл. 17.07.2006, Бюл. № 7.