

Ю.С. Пройдак, Л.В. Камкіна, Я.В. Мянoвська

МІКРОРЕНТГЕНОСПЕКТРАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ЕЛЕМЕНТНОГО СКЛАДУ ПРОБ ПИЛУ ДСП

Анотація. В роботі визначено склад пилу електрофільтрів газоочисток ДСП при довготривалому зберіганні у відвалах з метою одержання інформації про віднесення пилу до небезпечних відходів. Визначення вмісту важких металів у відходах виконували методом атомно-абсорбційної по-лум'яної спектрофотометрії на спектрофотометрі ААS-1N.] Вміст заліза загального та встановлення кількості його різного ступеня окиснення здійснювали методом окиснювально-відновного титрування біхроматом калію в кислому середовищі [6]. Комплексне металографічне дослідження проб пилу включав макроаналіз (при збільшенні $\times 16$), мікроаналіз структури торцевого зрізу котунів зі свіжого пилу електрофільтрів ДСП за допомогою оптичної мікроскопії ($\times 50$, $\times 500$). Детальний аналіз мікроструктури відібраних проб проводили за допомогою растрового мікроскопа електронного JSM-6490 в режимі вторинних упругорозсіяних електронів. Рентгеноспектральний аналіз відібраних проб проводили за допомогою енергетичного та хвильового спектрометрів – приставок до растрового електронного мікроскопа JSM-6490. Хімічний аналіз проб пилу показав, що значних відмінностей у вмісті заліза загального в представлених пробах пилу не спостерігається, хоча є деяке його зниження по глибині відвалу. Більш сильне зменшення при переході від поверхні відвалу в глибину відзначено вмісту Fe_3O_4 . Всі проби є магнітними, що свідчить про значні вмісти в пилу магнітного закису-окису заліза, найімовірніше в незв'язаному стані. Наявність у плавильній шихті домішок цинку і свинцю, що випаровуються при робочих температурах печі, призводить до їх окиснення повітряним потоком в результаті чого в кінцевому пилу вони можуть бути як у вигляді вільних оксидів, так і у вигляді композиційних структур з оксидами заліза.

Ключові слова: пилі ДСП, хімічний склад, мікрорентгеноспектральний аналіз, екологія, рециклінг, цинк, свинець, залізо

Вступ. При виплавці сталі в ДСП близько 10-20 кг/т шихти виноситься з плавильного агрегату у вигляді дисперсних частинок та пари, що накопичуються у вигляді пилу в електрофільтрах газоочищення. Відомо, що пил газоочисток сталеплавильного виробництва (як ДСП, так і конвертерів) підприємств чорної

металургії переважно складається з оксидів заліза і після окускування може бути повернуто у виробничий цикл.

Проте, висока дисперсність та вміст важких металів (в основному цинку) пилів ДСП у багатьох країнах (країни Євросоюзу, США, Канада та ін.) призводить до того, що їх класифікують як небезпечні відходи, які неприпустимо вивозити у відвали без попередньої обробки, яка включає окомкування і стабілізацію хімічного складу для гарантованої відсутності вилуговування шкідливих домішок при контакті з атмосферними опадами і підґрунтовими водами [1, 2].

Крім того, накопичення у відходах лугів та важких металів (в основному цинку та свинцю), не дає можливості використовувати пряме повернення пилу в агрегат, що призведе до погіршення умов його роботи. Слід зазначити і те, що цинк, що міститься в пилу металургійних агрегатів, є дуже цінним елементом, що широко використовується в сучасній промисловості. Вміст цинку в пилу ДСП може досягати 20% і навіть більше.

Зростання виробництва оцинкованого листа для автомобілебудування та використання конструкційних матеріалів із захистом від корозії покриттями цинком призводить до збільшення відходів, що повертаються в переплав у вигляді скрапу, що різко ускладнить у найближчому майбутньому проблему утилізації сталеплавильних пилів.

Існуючі технологічні схеми утилізації пилу ДСП із вилученням цінних продуктів, розроблені в різних країнах, відрізняються використанням апаратурним оформленням процесу і засновані на різних фізико-хімічних закономірностях переробки. Аналіз представлених технологій показав, що вони вирішують проблему переробки обсягів пилу поточного виробництва, але відсутні детальні дослідження складу заскладованих пилів та визначення їх класу небезпеки для навколишнього середовища.

Вирішення цього завдання є актуальним і нагальними для сучасного підприємства з передовою технологією електросталеплавильного виробництва. На майданчику зберігання шламів і пилів електрофільтрів газоочищення накопичилася значна кількість відходів, що містять цінні метали. Їх витяг при переробці забезпечує повернення у виробництво цінних металів і одночасно сприяють зниженню забруднення навколишнього середовища, так як при цьому скорочуються викиди в відвали і запобігає шкоди навколишньому середовищу та здоров'ю людей.

Методика досліджень. Відбір проб промислових відходів проводився у місцях їх тимчасового складування та вилежування на території підприємства згідно [3]. Визначення вмісту важких металів у відходах виконували методом атомно-абсорбційної полум'яної спектрофотометрії на спектрофотометрі AAS-1N згідно з методикою [4] з подальшою обробкою результатів на ПЕОМ IBM Pentium IV. Зміст миш'яку та ртуті - методом інверсійної вольтамперметрії на приладі АВА-2.

Вивчення розчинності та рухливості важких металів у відходах проводили згідно з додатком № 6 до «Методики визначення складу та властивостей промислових відходів» [5]. Вміст заліза загального та встановлення кількості його різного ступеня окиснення здійснювали методом окиснювально-відновного титрування біхроматом калію в кислому середовищі [6]. Комплексне металографічне дослідження проб пилу включав макроаналіз (при збільшенні $\times 16$), мікроаналіз структури торцевого зрізу котунів зі свіжого пилу електрофільтрів ДСП за допомогою оптичної мікроскопії ($\times 50$, $\times 500$). Макроаналіз виконаний за допомогою стереометричного мікроскопа МБС-10. Мікроаналіз структури торцевого зрізу котунів проводили за допомогою світлового мікроскопа AXIO Observer m 1A фірми Карл Цейсс. Детальний аналіз мікроструктури відібраних проб проводили за допомогою растрового мікроскопа електронного JSM-6490 в режимі вторинних упругорозсіяних електронів. Рентгеноспектральний аналіз відібраних проб проводили за допомогою енергетичного та хвильового спектрометрів – приставок до растрового електронного мікроскопа JSM-6490. Досліджені проби (№№1-5) були відібрані з поверхні заскладованих на майданчику накопичення та вилежування залізовмісних пилів. Проба №6 відібрано з глибини відвалу на відстані 0,75 м від поверхні землі, проба № 7 – на 1,5 м від поверхні землі. Зразки котунів із залізовмісного пилу були відібрані на ділянці їх виробництва.

Результати комплексного металографічного дослідження. При візуальному огляді зовнішнього вигляду проб пилу встановлено, що є неоднорідність кольору проб (зразки № 3, 4, 6). У зразках присутні частки як яскраво-бурого, так і темно-бурого кольору, що може бути пов'язано з наявністю заліза різної валентності. Відбувається мимовільне конгломерування дрібнодисперсних частинок порошку в освіті розміром від 2 до 13 мм (зразки № 2, 3, 4, 5, 6, 7). Максимальні за розміром конгломерати спостерігаються у зразках № 3, 4, а максимальна кількість (%) конгломератів спостерігається у зразку № 3.

Пил газоочищення ЕСПЦ (свіжий) на відміну від лежачих проб являє собою дрібнодисперсний порошок яскраво-бурого кольору однорідного забарвлення за досліджуваним полем, в якому не відзначено поява конгломератів з частинок вихідного пилу. Цей пил використовується безпосередньо для отримання окомкованого матеріалу і не викликає складнощів в організації процесу отримання котунів.

Окомкований матеріал являє собою утворення сферичної форми, розмір яких становить в середньому 15-20 мм, має високу міцність.

Хімічний аналіз проб пилу показав (табл.1), що значних відмінностей у вмісті заліза загального в представлених пробах пилу не спостерігається, хоча є деяке його зниження по глибині відвалу. Більш сильне зменшення при переході від поверхні відвалу в глибину відзначено вмісту Fe_3O_4 . Всі проби є магнітними, що свідчить про значні вмісти в пилу магнітного закису-окису заліза, найімовірніше в незв'язаному стані. Наявність у плавильній шихті домішок цинку і свинцю, що випаровуються при робочих температурах печі, призводить до їх окислення повітряним потоком в результаті чого в кінцевому пилу вони можуть бути як у вигляді вільних оксидів, так і у вигляді композиційних структур з оксидами заліза. Такі відомості наводять автори [7].

Таблиця 1

Вміст заліза різної степені окисленості в пробах пилу

№ проби	$Fe_{\text{заг.}}$	FeO	Fe_3O_4
1	32,95	6,0	39,03
2	30,7	6,45	35,44
3	31,85	7,0	36,43
4	27,35	5,9	30,47
5	25,7	8,6	26,23
6	25,8	6,3	30,22
7	27,95	5,45	31,64
Окатиш	31,3	5,45	32,27

Металографічний аналіз торцевого зрізу окатишу показав, що поверхня зрізу має рельєфний характер, що, мабуть, пов'язано з наявністю структурних складових з різними фізико-хімічними властивостями. У загальній структурі торцевого зрізу окатишу простежується витягнутість зерен перпендикулярно площині тиску при злежуванні порошку. Чітко виражених меж немає, присутні

у структурі включення міцно з'єднані між собою. Сам окатиш є досить міцним з'єднанням, яке не руйнується при механічному впливі.

При детальному вивченні структури зрізу виявлено, що матриця є оксиди заліза (за кольором), у якій рівномірно розподілені кілька типів включень. Включення мають кулясту, кляксоподібну, пластинчасту форми, розмір яких коливається від 10 до 15560 мкм. Включення неоднорідні за структурою і розрізняються за кольором. Можливо, що кляксоподібну форму набувають частинки, які потрапляють в пил після випаровування при відносно невисоких температурах, тривалий час знаходяться в повітряному потоці і мають здатність до стирання.

Якісний та кількісний аналіз мікроструктури відібраних проб. Детальний аналіз мікроструктури відібраних проб проводили за допомогою растрового мікроскопа електронного JSM-6490 в режимі вторинних пружнорозсіяних електронів. Мікроструктури відібраних проб представлені дрібнодисперсним порошком переважно сферичної форми, отриманих при різному збільшенні.

У порошках (пробах) присутні частки неправильного огранювання світлосірого кольору. Однорідність за формою спостерігається як у окремих частках, так і у конгломератах. Конгломерати являють собою злиплу механічну суміш частинок розмірами від 0,1 мкм. Більшість частинок має округлу форму, утворення якої пов'язано з кристалізацією з рідкого стану присутніх легкоплавких сполук. Усі відібрані проби мають яскраво виражені магнітні властивості.

Рентгеноспектральний аналіз відібраних проб. Рентгеноспектральний аналіз відібраних проб проводили за допомогою енергетичного та хвильового спектрометрів – приставок до растрового електронного мікроскопа JSM-6490. Проба порошку піддавалася рентгеноспектральному аналізу в характерних точках по полю зразка (позначені на електронному зображенні світлою точкою або контуром у вигляді окремої області).

Рентгеноспектральним аналізом у порошку №1 було виявлено 16 хімічних елементів (табл. 2), відзначається хімічна неоднорідність по окремих частинках порошку. У структурі порошку спостерігаються конгломерати сферичної форми розмір яких від 35 до 86 мкм (рис. 1); конгломерати розміром 43 мкм та форми близької до неправильно ограненої, в яких є дві області, різні за хімічним складом (світла та темна); частинки сферичної форми розміром 31 мкм; частинки, що мають металічний блиск, розмір яких коливається від 7 до 11 мкм.

Узагальнені результати хімічного складу поверхневої проби порошку

п/п	Хімічний елемент	Вміст елемента, % по масі	Середній вміст елемента, % по масі
1	O	5,33 – 39,29	27,79
2	Mg	0,22 – 1,57	0,56
3	Al	0,12 – 1,67	0,39
4	Si	0,88 – 20,72	6,44
5	P	0,17 – 0,63	0,12
6	S	0,11 – 12,26	4,27
7	Cl	0,16 – 1,33	0,28
8	K	0,22 – 19,01	8,98
9	Ca	0,52 – 10,39	6,34
10	Cr	0,10 – 0,29	0,13
11	Mn	0,36 – 63,03	16,29
12	Fe	7,4 – 29,02	14,82
13	Cu	0,16 – 0,43	0,17
14	Zn	1,94 – 21,86	10,18
15	Pb	0,52 – 16,84	3,18
16	Ti	0,16 – 0,29	0,06
17	As	н/о	н/о
18	Cd	н/о	н/о
19	Na	н/о	н/о

Максимальна кількість кисню (39,29 % за масою), сірки (12,26 % за масою) та калію (19,01 % за масою) міститься в конгломератах частинок рис. 1. У той же час максимальна кількість кремнію (20,72 % за масою) і марганцю (63,03 % за масою) міститься в конгломератах за формою близькою до ограненої, при цьому світла область містить максимальну кількість кремнію, темна - марганцю. Максимальна кількість алюмінію (1,67 % за масою), фосфору (0,63 % за масою), кальцію (10,39 % за масою), хрому (0,29 % за масою), цинку (21,86 % за масою), заліза (29,02 % за масою), міді (0,43 % за масою) та титану (0,29 % за масою) міститься в частках сферичної форми. Частинки, що мають металевий блиск, містять у собі максимальну кількість магнію (1,57 % за масою), хлору (0,63 % за масою) та свинцю (16,84 % за масою).

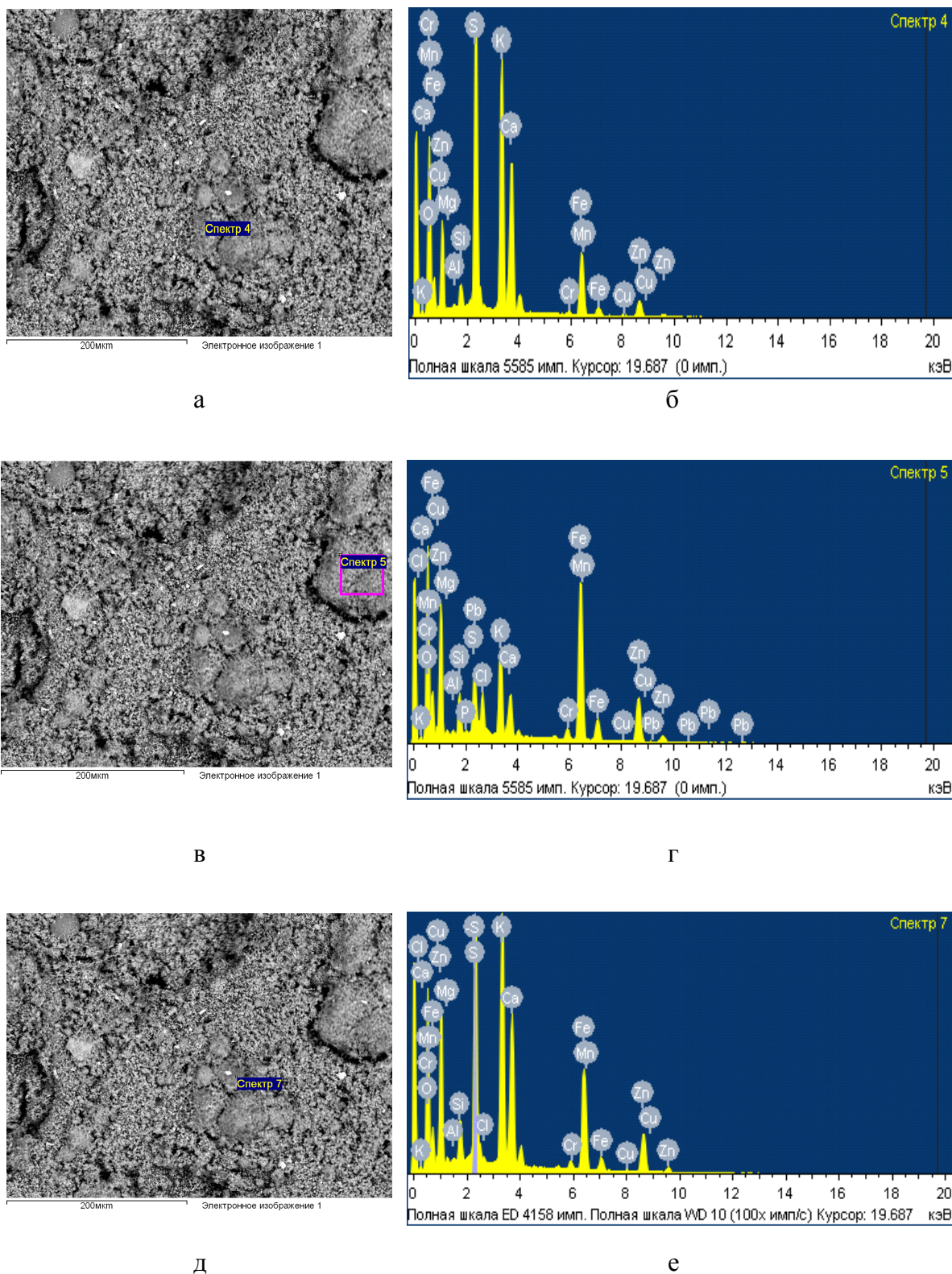


Рисунок 1 - Мікроструктура (а, в, д) та спектрограми (б, г, е) конгломератів сферичної форми

Зведена таблиця хімічного складу за елементами та зразками

№п/п	Хим. ел-т	Обр1.	обр.2	обр.3	обр.4	обр.5	обр.6	обр.7	Свежая пыль	Окат
1	O	27,79	21,67	30,84	31,60	23,98	26,35	33,66	25,32	22,03
2	Mg	0,56	1,50	1,43	1,10	0,80	0,82	1,24	0,91	0,32
3	Al	0,39	0,53	1,31	0,78	0,39	0,37	0,36	0,61	1,26
4	Si	6,44	2,57	3,08	5,88	2,32	1,80	2,36	3,96	2,06
5	P	0,12	0,14	0,28	0,21	0,10	0,12	0,12	0,20	-
6	S	4,27	0,63	0,06	0,17	0,01	0,60	0,54	0,57	1,67
7	Cl	0,28	6,31	1,77	0,64	1,11	1,01	1,04	1,37	13,92
8	K	8,98	1,81	0,90	1,22	1,54	2,59	3,40	2,17	3,64
9	Ca	6,34	7,77	4,66	7,88	6,17	5,91	10,85	2,35	2,89
10	Cr	0,13	0,18	0,07	0,14	0,17	0,21	0,16	0,31	0,16
11	Mn	16,29	2,54	0,95	8,29	1,85	1,97	1,74	2,44	0,60
12	Fe	14,82	28,52	19,20	18,98	34,53	24,22	18,93	30,59	15,26
13	Cu	0,17	-	0,35	0,04	0,40	0,17	0,07	0,05	0,01
14	Zn	10,18	20,77	18,06	18,48	19,19	30,95	20,58	26,69	7,33
15	Pb	3,18	1,70	15,22	4,20	7,13	2,90	4,11	2,25	0,17
16	Ti	0,06	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	0,03	0,19
17	As	н/о	0,002	н/о	0,02	н/о	н/о	н/о	0,01	н/о
18	Cd	н/о	н/о	1,69	н/о	0,32	н/о	н/о	н/о	н/о
19	Na	н/о	3,42	0,35	0,36	н/о	н/о	н/о	н/о	13,98

Вміст у зазначених пробах свіжого пилу, лежачого пилу та котуни наступних елементів: Hg, Ni, Sn, Co, Mo, W, V мікро рентгеноспектральним аналізом не виявлено

Отримані дані рентгеноспектрального аналізу зразків пилу з поверхні відвалу (проби №1-5), по висоті відвалу (проби №6-7), свіжого пилу електрофільтрів ДСП та котуни показують, що значних коливань у їх складі не виявлено. Особливо відзначимо, що присутності таких елементів, як кадмій, шестивалентний хром і свинець, які класифікуються в США як небезпечні відходи, у значних кількостях у складі пилу ДСП не виявлено. Так, As, Cd, Ti та Na були виявлені лише у 2-3 пробах пилу.

В окатишах присутній хлор і натрій у значних порівняно з іншими пробами кількостях та у порівняннях між собою концентраціях – на рівні ~13%. Є відомості [7], що пилі також містять значні обсяги хлоридів, хоча автори не вказують, чи виконувався цей аналіз на свіжому пилу або на лежачому. Відмінним у порівнянні з іншими пробами пилу є те, що у складі котуни концентрація цинку в 2 рази менше, ніж в інших пробах пилу.

У всіх досліджених пробах виявлено підвищений вміст у порівнянні з іншими елементами заліза і цинку, в деяких пробах кальцію. Можна припустити, що можлива взаємодія між оксидами з утворенням $ZnFe_2O_4$, ZnO , CaO , Fe_3O_4 , для чого необхідно виконати дослідження порошків методами рентгенівської дифрактометрії. Слід зазначити, що в процесі зберігання та вилежування у відвалах не виключено взаємодію між собою окремих фаз пилу при тривалому спільному знаходженні під дією факторів навколишнього середовища, у тому числі вплив вологи та теплоти, що зажадало проведення додаткових досліджень.

Насамперед викликала інтерес поведінка проб пилу у водних середовищах для оцінки їх водорозчинності та можливого забруднення ґрунту. Для цього проби пилу витримували певній кількості дистилату подвійної перегонки при $25^\circ C$ і нагріванні до $60^\circ C$ протягом 4 годин. Зміни кислотності розчинів у такому експерименті не виявлено.

Висновки. Виконано мікрорентгеноспектральне визначення елементного складу проб пилу ВАТ «ММЗ» та показано відмінність у вмісті компонентів у досліджуваних пробах та в межах однієї проби при вибраних точках контролю на поверхні проби.

Виходячи з отриманих результатів хімічного аналізу проб пилу електрофільтрів їх якісний склад і вміст токсичних важких металів, в цілому (за середнім значенням з 10 визначень) відповідають даним технічних умов підприємства на цей вид відходів, перевищення отримано за вмістом цинку у всіх розглянутих залізовмісних відходах. Відмінною властивістю присутніх у відходах важких металів є їхня вкрай незначна рухливість у буферних середовищах та практична нерозчинність у воді.

ЛІТЕРАТУРА

1. Pyrometallurgical recycling of electric arc furnace dust. Xiaolong Lin, Zhiwei Peng, Yan Jiaying, L. Zhizhong, Jiann-Yang Hwang, Yuanbo Zhang, Guanghui Li. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.128>. ID: 99077452. Journal of Cleaner Production. Volume 149, 15 April 2017, Pages 1079-1100.

2. The Enviroplas process for the treatment of steel-plant dusts. E. C. Schoukens, Shaw, F. Chemaly. Published 1993. Materials Science. Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy. vol.93, no1, pp.1-7.
3. Методические указания для органов и учреждений санитарно-эпидемиологической службы по контролю за реализацией мероприятий, направленных на санитарную охрану окружающей среды от загрязнения твердыми и жидкими токсичными отходами промышленных предприятий» от 12.07.1985 года № 3912-85.
4. Симонова В.И. Атомно-абсорбционные методы определения элементов в породах и минералах. – Новосибирск: Наука, 1986.
5. ДСанПіН 2.2.7.029-99 Гігієнічні вимоги щодо поводження з промисловими відходами та ви-значення їх класу небезпеки для здоров'я населення. <http://normativ.ua/types/tdoc3041.php>
6. Беляевская Т.А. Сборник методик по титрометрическому анализу. Под ред. Акад. И.П.Алимарина. М., 1972. (МГУ, ЛФОР).
7. Fekete, F., Lázár, K., Keszler, A.M. et al. Recycling the industrial waste ZnFe₂O₄ from hot-dip galvanization sludge. J Therm Anal Calorim 134, 1863–1872 (2018). <https://doi.org/10.1007/s10973-018-7849-8>

REFERENCES

1. Pyrometallurgical recycling of electric arc furnace dust. Xiaolong Lin, Zhiwei Peng, Yan Jiaying, L. Zhizhong, Jiann-Yang Hwang, Yuanbo Zhang, Guanghui Li. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.128>. ID: 99077452. Journal of Cleaner Production. Volume 149, 15 April 2017, Pages 1079-1100.
2. The Enviroplas process for the treatment of steel-plant dusts. E. C. Schoukens, Shaw, F. Chemaly. Published 1993. Materials Science. Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy. vol.93, no1, pp.1-7.
3. Metodicheskiye ukazaniya dlya organov i uchrezhdeniy sanitarno-epidemiologicheskoy sluzhby po kontrolyu za realizatsiyey meropriyatiy, napravlennykh na sanitarnuyu okhranu okruzhayushchey sredy ot zagryazneniya tverdymi i zhidkimi toksichnymi otkhodami promyshlennykh predpriyatiy» ot 12.07.1985 goda № 3912-85.
4. Simonova V.I. Atomno-absorbtsionnyye metody opredeleniya elementov v porodakh i mine-ralakh. – Novosibirsk: Nauka, 1986.
5. DСанПіН 2.2.7.029-99 Гігієнічні вимоги щодо поводження з промисловими відходами та ви-значення їх класу небезпеки для здоров'я населення. <http://normativ.ua/types/tdoc3041.php>

6. Belyayevskaya T.A. Sbornik metodik po titrometriceskomu analizu. Pod red. Akad. I.P.Alimarina. M., 1972. (MGU, LFOP).
7. Fekete, F., Lázár, K., Keszler, A.M. et al. Recycling the industrial waste ZnFe₂O₄ from hot-dip galvanization sludge. J Therm Anal Calorim 134, 1863–1872 (2018). <https://doi.org/10.1007/s10973-018-7849-8>

Received 02.04.2022.

Accepted 04.04.2022.

Micro-X-ray spectral determination of the chipboard dust samples elemental composition

The paper determines the composition of dust from electrostatic precipitators of EAF gas cleaners during long-term storage in dumps in order to obtain information on classifying dust as hazardous waste. Determination of the heavy metals content in waste was performed by atomic absorption flame spectrophotometry on an AAS-1N spectrophotometer. The content of the amount total iron and the determination of its various oxidation states was carried out by redox titration with potassium bichromate in an acidic medium. A comprehensive metallographic study of dust samples included macroanalysis (at x16 magnification), microanalysis of the structure of the end section of pellets from fresh dust from EAF electrostatic precipitators using optical microscopy (x 50, x 500). A detailed analysis of the microstructure of the selected samples was carried out using a JSM-6490 scanning electron microscope in the mode of secondary elastically scattered electrons. The X-ray spectral analysis of the selected samples was carried out using energy and wave spectrometers attached to a JSM-6490 scanning electron microscope. Chemical analysis of dust samples showed that there are no significant differences in the content of total iron in the presented dust samples, although there is some decrease in the depth of the dump. A stronger decrease in the transition from the surface of the dump to the depth is noted by the content of Fe₃O₄. All samples are magnetic, which indicates a significant content of magnetic nitrous oxide-iron oxide in the dust, most likely in an unbound state. The presence of zinc and lead impurities in the melting charge, evaporating at the operating temperatures of the furnace, leads to their oxidation by the air flow, as a result of which they can be in the final dust both in the form of free oxides and in the form of composite structures with iron oxides. It has been established that the results of the chemical analysis of electrostatic precipitator dust samples, their qualitative composition and the content of toxic heavy metals, in general (according to the average value of 10 determinations) correspond to the given technical conditions of the enterprise for this type of waste, the excess was obtained in terms of the zinc content in all considered iron-containing wastes. A distinctive feature of heavy metals present in the waste is extremely low mobility in buffer media and practical insolubility in water.

Пройдак Юрій Сергійович – доктор технічних наук, професор, проректор з наукової роботи, Інститут промислових та бізнес технологій, Український державний університет науки і технологій.

Камкіна Людмила Володимирівна – доктор технічних наук, професор, декан факультету металургійних процесів та хімічних технологій, Інститут промислових та бізнес технологій, Український державний університет науки і технологій.

Мяновська Яна Валеріївна – доктор технічних наук, доцент, кафедра теоретичних основ металургійних процесів, Інститут промислових та бізнес технологій, Український державний університет науки і технологій.

Projdak Yuri - doctor of technical sciences, professor, vice-rector for scientific work, Institute of industrial and business technologies, Ukrainian state university of science and technologies.

Kamkina Lyudmila - doctor of technical sciences, professor, dean of the faculty of metallurgical processes and chemical technologies, Institute of industrial and business technologies, Ukrainian state university of science and technologies.

Mianovska Yana - doctor of technical sciences, assistant professor, department of theoretical foundations of metallurgical processes, Institute of industrial and business technologies, Ukrainian state university of science and technologies.