

УДК 621.9.048:533.9

Мохаммед Алтагер Албаршеши, директор інституту,
Алкіб Ахмед М. Мохаммед Алджалі, PhD, викладач кафедри оптики

ПЛАЗМОВІ ТЕХНОЛОГІЇ ПЕРЕРОБЛЕННЯ ШЛАКІВ

Вищий інститут науки і техніки (Тріполі, Лівія)

Ключові слова: плазмове перероблення шлаків, плазмова піч, електродуговий плазмотрон, газифікація твердих побутових відходів, система очищення газів.

Вступ. Утворення шлаків – неминучий наслідок усіх існуючих пірометалургійних процесів. До теперішнього часу основним засобом утилізації металургійних шлаків залишається складування. Такий спосіб становить загрозу для навколишнього середовища – більшість шлаків містить значну кількість важких металів, які можуть вилугуватися дощами. Іншим джерелом небезпечних для навколишнього середовища шлаків є сміттєспалювальні заводи. Технології спалювання сміття з виробництвом електроенергії деякий час розглядалися як найбільш перспективний напрямок у переробленні муніципальних відходів [1]. Однак досвід експлуатації таких заводів виявив фундаментальні недоліки такої технології.

У газах сміттєспалювальних заводів утворюються вкрай токсичні речовини – діоксини, високомолекулярні смоли, пари металів, що потребує використання дорогих систем газоочищення. Не менш небезпечними для навколишнього середовища є шлаки від спалювання відходів.

Виходячи з економічних показників, для видалення механічних частинок з потоку синтез-газу або вихідного газу, що викидається в атмосферу, найчастіше використовуються різного роду інерційні пиловловлювачі (одиначні, групові та батарейні циклонни, жалюзійні пиловловлювачі, акустичні коагулятори, ротоклони та ін.), серед яких найчастіше використовуються сепаратори циклонного типу.

Мета роботи. Акцентувати увагу, що незважаючи на те, що рівень шкідливих речовин, які утворюються в процесі плазмового перероблення і газифікації відходів, є значно меншим, ніж у традиційних технологічних процесах, наявність систем очищення вихідних газів для такого устаткування є обов'язковою. Такі системи включають як обладнання для видалення твердих частинок (інерційні й вологі пиловловлювачі, механічні й електростатичні фільтри і т. п.), так і обладнання для видалення з газів різного роду хімічних сполук (абсорбційні й адсорбційні установки, лужневі й кислотні скрубери та ін.). Вартість таких систем може бути основною складовою комплексу обладнання для плазмової переробки і газифікації

Основна частина. Наведемо деякі дані, що дозволяють свідчити про масштаби проблеми. У табл. 1 наведена оцінка щорічного світового виробництва деяких видів великотоннажних шлаків. Оцінювання зроблено на підставі опублікованих даних або на

підставі даних про обсяги виробництва металу і множення їх на відомі коефіцієнти відношення обсягів шлаку і металу [1].

За даними Агентства із захисту навколишнього середовища США (USEPA) станом на 2000 рік [2] на одного мешканця в США утворювалося більше 400 кг муніципальних відходів на рік, а всього – понад 120 млн т.

Таблиця 1 – Річні світові обсяги утворення деяких видів шлаків

Тип шлаку	Щорічне світове виробництво, млн. т
Шлаки виробництва сталі та чавуну	300
Феронікелеві шлаки	15
Шлаки виробництва міді	14
Ферохромові шлаки	4,4
Феромарганцеві шлаки	19
Шлаки виробництва свинцю і цинку	9,0
Платиновміщувальні шлаки	2,4
Шлаки виробництва титану	2,4

З цієї кількості відходів на 102 сміттєспалювальних заводах США було перероблено тільки 35 млн т (29 % від загального обсягу), що призвело до утворення 8,75 млн т. шлаку і попелу (25 % від початкового обсягу перероблених відходів). Всього в розвинених країнах на рік утворюється понад 550 млн т муніципальних відходів. Найбільш гострою проблема перероблення шлаків від їх спалювання є в Японії, де на сміттєспалювальних заводах утилізується понад 70 % муніципальних відходів. Таким чином, створення ефективних технологій перероблення шлаків є гостро актуальною світовою проблемою. Ключовим елементом таких технологій має стати вилучення з шлаків небезпечних елементів, які часто є цінною сировиною. Отримані екологічно безпечні матеріали можуть мати найширше застосування. А реалізація речовин, що містяться в шлаках (в першу чергу – металів), може зробити цей процес не тільки екологічним, а й економічно вигідним [3]. Для створення таких процесів найбільш перспективним є застосування плазмових технологій, що підтверджується цілим рядом відомих на сьогодні прикладів.

Одним зі світових лідерів в області створення технологій перероблення металургійних шлаків є фірма Mintek (ПАР). З цією метою з кінця 70-х років фірма використовує електропечі постійного струму з перенесеними плазмовими дугами [4]. Як катод використовується графітовий електрод з центральною подачею плазмоутворювального газу, як анод – ванна рідкого металу. Піч (рис. 1) складається з облицьованої вогнетривом сталевий циліндричної оболонки і кришки. Кришка містить центральний отвір для графітового електрода. Металоприймач викладено графіто-магнезитною цеглою, поверх якої для забезпечення електро-провідності покладено шар броньованої цегли. Особливістю джерела живлення є високе значення напруги (1200 В), спричинене високим опором шлаку.

Описані плазмово-дугові печі використовуються в розробленому фірмою Mintek

процесі Enviroplas, який успішно застосовується для перероблення різних металургійних шлаків. В цьому процесі для відновлення металу в дроблений шлак додається вуглець. Це дозволяє організувати процес таким чином, щоби отримувати задані значення відновлення цільового металу в ході плавки. При відпрацюванні технологічного процесу було досягнуто ступінь відновлення кобальту понад 80 % [5, 6].

У липні 1999 р фірма Anglovaal Mining Limited (ПАР) оголосила про плани вкладення 100 млн доларів у завод для перероблення шлаку, маючи на меті виробництво 4000 т кобальту і 3500 т міді за рік. Завод почав роботу в 2001 році і до теперішнього часу працює успішно.

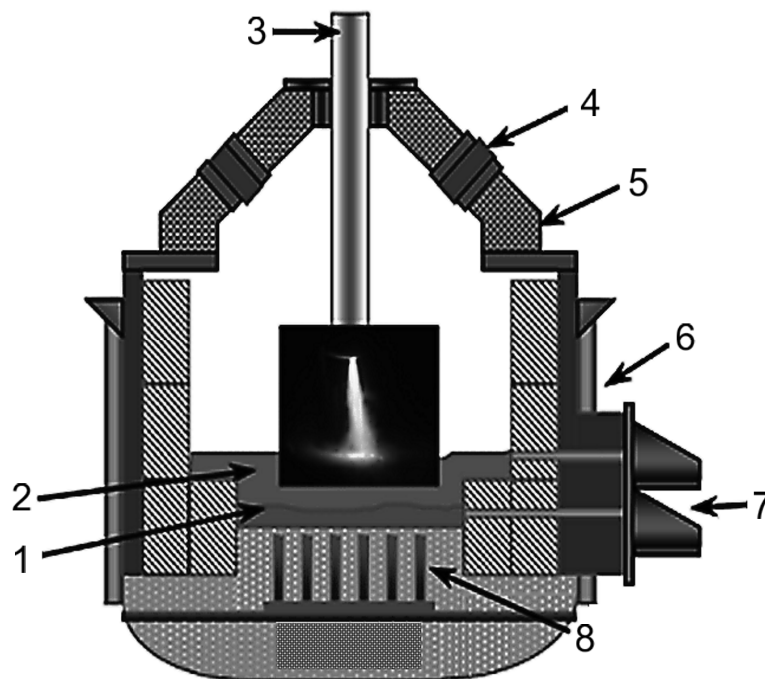


Рисунок 1 – Схема плазмово-дугової печі фірми Mintek:

1 – метал; 2 –шлак; 3 – графітовий катод; 4 – отвір для завантаження;
5 – кришка; 6 – охолоджувальний корпус; 7 – зливні жолоби; 8 – анодна плита

На основі процесу Enviroplas розроблено технології вилучення цинку і свинцю зі шлаків виробництва свинцю і пилу дугових сталеплавильних печей (ДСП) [7, 8]. Процес дозволяє досягти рівня вилучення цинку понад 85 % при обробленні свинцевих шлаків і 95 % при обробленні пилу ДСП. Тести підтвердили, що шлак після такої обробки відповідає нормам USEPA. Таким чином, в результаті перероблення вкрай токсичних матеріалів вдається отримати два безпечні продукти – інертний шлак і гранульований цинк. Для забезпечення екологічної чистоти процес потребує застосування сучасного обладнання для очищення відхідних газів.

При переробленні цинковміслювальних шлаків і пилу (рис. 2) використовується додаткове оброблення в печі попередньої плавки. Її проводять зі зниженою температурі (1200...1250 °С при обробленні свинцевого шлаку і 1300...1400 °С – пилу ДСП). Основна мета попередньої обробки – видалення зайвої вологи, а також таких елементів, як

хлор, фтор, сірка, кадмій, які можуть ускладнити виділення цинку. Як відновлювач використовується кокс або вугілля. При плавці забезпечується перемішування розплаву з метою усунення місцевого перегрівання в зоні прив'язки дуги. Для цього використовується продування розплаву азотом, що підвищує рівень вилучення цинку до 90 ... 91 %.

На мідно-нікелевих комбінатах утворений шлак у цей час зазвичай переробляють з використанням флотації для відновлення міді, що залишається в шлаку. Потім шлак зсипають в ями і засипають ґрунтом. Деякі комбінати просто накопичують шлак у котлованах, облицьованих пластиком. Це спричинено необхідністю запобігання дренажу шкідливих речовин у підземні води.

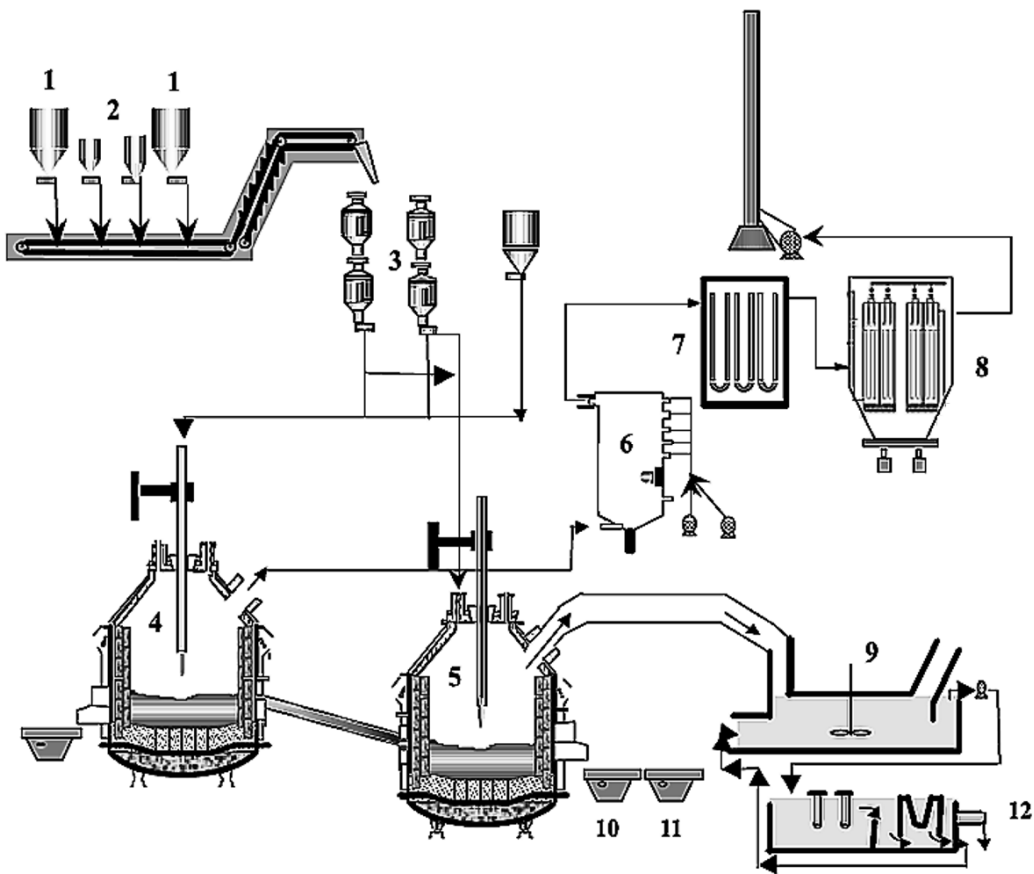


Рисунок 2 – Схема процесу Enviroplas перероблення цинковміщувальних шлаків:

- 1 – подача шлаку; 2 – подача флюсу і коксу; 3 – змішувачі;
- 4 – плазмова піч попередньої плавки; 5 – основна плазмова піч; 6 – камера допалення газів; 7 – теплообмінник; 8 – газоочищення; 9 – конденсатор;
- 10 – метал; 11 – шлак; 12 – цинк

На мідно-нікелевих комбінатах утворений шлак у цей час зазвичай переробляють з використанням флотації для відновлення міді, що залишається в шлаку. Потім шлак зсипають в ями і засипають ґрунтом. Деякі комбінати просто накопичують шлак у котлованах, облицьованих пластиком. Це спричинено необхідністю запобігання дренажу шкідливих речовин у підземні води.

У той же час, при переробленні мідно-нікельових шлаків у плазмово-дугових

печах з відновними умовами є реальна можливість вилучення практично всього нікелю і кобальту. У роботах [9, 10] описано результати такого перероблення шлаків мідеплавильного заводу. Шлак мав такий склад: кобальт – 0,45 %; мідь – 3 %; залізо – 47 %; нікель – 3,5 % і сірка – 3 %. В ході випробувань було досліджено чотири різних методи в спробі оптимізувати виборче відновлення металів зі шлаку. Вони включали плавлення дробленого шлаку і графіту, добавку певної кількості дробленого вугілля до вже розплавленого шлаку, спільну подачу дробленого холодного шлаку і вугілля і пневматичну інжекцію пилоподібного вугілля в розплавлений шлак. В результаті 91 % заліза було збережено в шлаковій фазі, в той час як 50 % кобальту, 63 % міді і 83 % нікелю було відновлено в сплаві. Встановлено, що інжекція пилоподібного вугілля дає найкраще відновлення нікелю і оксиду кобальту зі шлаку. При оптимальних параметрах, з 7 %-ною добавкою вуглецю, на 100 кВт печах було відновлено: кобальту – 81 %; міді – 78 % і нікелю – 97 %, в той час як 80 % заліза залишилося в шлаку.

На аналогічних засадах для вилучення зі шлаку металів платинової групи (МПП) створено процес ConRoast [11]. Існуючі технології виробництва МПП ґрунтуються на традиційному процесі виплавки, де МПП сконцентровано в сульфідній фазі та пов'язано із сульфідами основного металу. Плавка супроводжується високими викидами SO_2 . Процес ConRoast вирішує завдання викиду SO_2 повним окислювальним випаленням сульфідного концентрату до виплавки в дуговій печі постійного струму.

Плавка окисленої шихти виконується в плазмово-дуговій печі постійного струму при відновлювальних умовах. Досліди показали, що після обробки шлак має настільки низький вміст МПП, що може скидатися на звалище або використовуватися для інших цілей. Інший тип сировини з низьким вмістом сірки (наприклад, низькосортні високочромисті концентрати або поворотні хвости) може вводитися в дугову електропеч постійного струму без попереднього випалення.

Таким чином, плазмові технології можуть бути основою для економічно ефективних технологій перероблення металургійних шлаків з практично повним вилученням металу і утворенням нейтрального осклового шлаку. При цьому навіть за умови знижених порівняно з традиційними технологіями викидах, в склад комплексу обладнання для плазмової обробки є обов'язковим включення різного роду систем газоочищення.

У всіх описаних вище процесах вартість металів, отриманих в ході перероблення шлаків, перевищувала витрати на переробку. У разі перероблення шлаків і попелу сміттєспалювальних заводів така мета ніколи не ставилася. Необхідність такої переробки визначається екологічними вимогами. Тому зазвичай вважається, що якщо в результаті оброблення плазмою шлаки і попіл будуть оскловані, а отриманий матеріал буде безпечним з точки зору діючих норм, поставлена мета досягнеться. Таке формулювання завдань переробки є досить обмеженим і спочатку занижує можливий ефект процесу.

Основною вимогою до технологічного процесу перероблення шлаків сміттєспалювальних заводів (ССЗ) є знищення всього діоксину і фурану і запобігання їхньому повторному синтезу при подальшому охолодженні газів, що відходять у атмосферу. Для цього гази швидко охолоджуються в інтервалі температур від 600 до 200 °С. Крім того, потрібно, щоби процес плавлення шлаку проходив в окислювальному середовищі. Ця вимога зумовлена тим, що мікрочастинки вуглецю є каталізаторами синтезу діоксинів. Тому вважається, що відновлення потенційно цінних металів зі шлаків ССЗ не-

справджене, тому що цей процес пов'язаний з додаванням в шихту вуглецю як відновлювача [12]. Такий висновок переконливо спростовується описаними вище результатами робіт з плазмового відновлення цинку, в яких проблему було вирішено введенням попереднього оброблення шихти.

Розробленню плазмових технологій нейтралізації відходів ССЗ присвячено велику кількість досліджень. Ці технології вже перейшли в область індустріальних застосувань головним чином в Японії, в якій проблема перероблення таких шлаків стоїть найгостріше. При переробці використовуються як металеві водоохолоджувані плазмові пальники [13], так і порожнисті графітові електроди [14]. В індустріальних застосуваннях прихильником водоохолоджуваних пальників є, наприклад, фірми Westinghouse Plasma (США), SKF (Швеція) і Europlasma (Франція). Фірма Tetronics (Великобританія) вважає за краще використовувати для цих цілей графітові електроди.

У роботі [12] проведено порівняння результатів плазмового перероблення шлаків ССЗ при використанні водоохолоджувальних і графітованих електродів. У табл. 2 наведено результати досліджень початкового складу шлаку і його складу після плазмової обробки. Склад шлаку в експериментах дещо відрізнявся. В обох випадках процес приводили при надлишку повітря, а шихта не містила будь-якого відновлювача. Як видно з таблиці 2, в обох випадках після плазмової обробки зі шлаку було видалено хлор і фосфор. Однак разом з ними було вилучено і цинк, а в шлаку залишено велику кількість цінних металів (алюміній, магній).

Таблиця 2 – Склад шлаку ССЗ до і після плазмової переробки із застосуванням плазмоденераторів різного типу [12]

Складові	Склад шлаку до обробки, % маси		Склад шлаку після обробки, % маси	
	Охолоджуваний пальник	Графітовий електрод	Охолоджуваний пальник	Графітовий електрод
Al ₂ O ₃	8,3	12,9	24,6	17
CaO	14,0	17,2	20,9	23
SiO ₂	17,1	27,5	26,8	35
MgO	1,8	2,0	2,6	5
TiO ₂	1,3	1,2	2,7	-
Fe ₂ O ₃	2,1	4,4	4,1	11
Na ₂ O	9,2	2,2	1,48	1,6
K ₂ O	10,5	2,5	0,37	< 1
ZnO	7,1	3,8	0,68	0,1
PbO	1,9	0,9	0,03	< 0,1
P ₂ O ₅	1,4	0,9	0,87	-
C	0,2	3,3	-	-
Cl	12,0	4,0	-	-
F	0,12	0,3	-	-
SO ₂	10,4	4,5	0,005	< 0,3

Отриманий після плазмової переробки шлак охолоджувався у воді. В результаті утворювався склоподібний матеріал, який після дроблення випробовувався на вилугування за методикою USEPA. Випробування підтвердили безпеку отриманого матеріалу і можливість його використання в будівництві. Автори роботи [12] роблять висновок про те, що принципових відмінностей у результатах плазмового перероблення шлаків ССЗ водоохолоджуваними і графітовими електродами немає. Обидва процеси застосовні для окисної плавки таких відходів, а вибір між ними можливий тільки на основі економічного аналізу.

Такий висновок виглядає дещо несправданим з урахуванням можливостей підвищення ресурсу плазмових генераторів. У роботах [15, 16] досить детально розглянуто це питання і показано, що недостатній рівень ресурсу і надійності плазмових генераторів є основною причиною, яка стримує широке впровадження вже розроблених плазмових технологій у промисловість.

У роботі [1], зокрема, показано, що значною мірою проблеми створення надійного та високоресурсного обладнання для плазмового перероблення шлаків можуть бути вирішені при використанні плазмових печей з магнітогідродинамічним (МГД) перемішуванням. Ефект МГД перемішування досягається за рахунок розтікання струму від опорного плями дуги до розташованих на периферії ванни подовим електродів (рис. 3). Взаємодія горизонтальної й вертикальної складових струму з електромагнітним полем спричиняє торіодальне перемішування розплаву у вертикальному перерізі й обертальний рух – у горизонтальному.

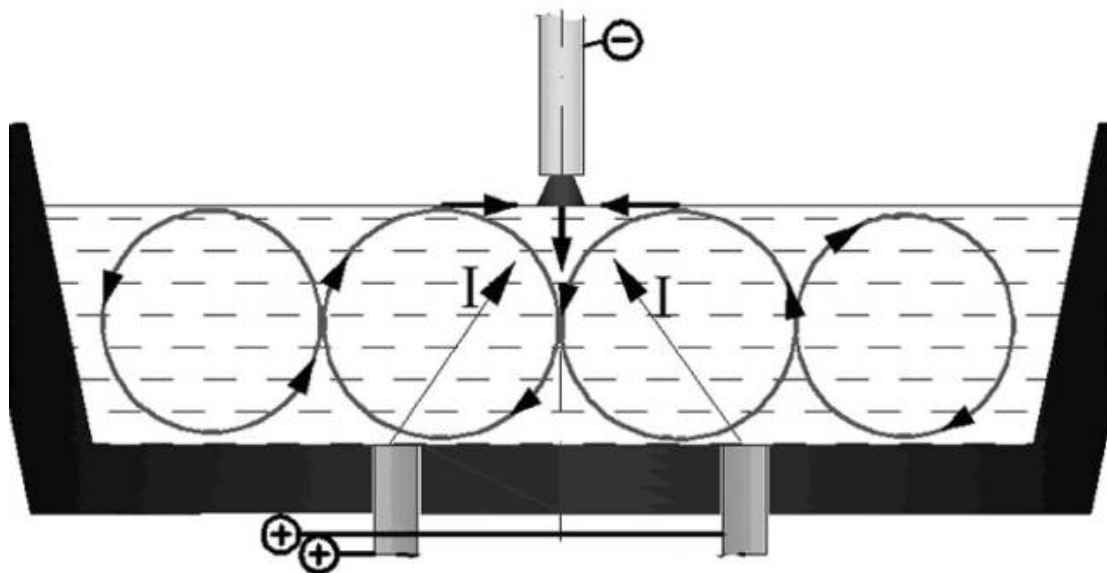


Рисунок 3 – Схема роботи плазмової печі з МГД перемішуванням розплаву

Використання МГД перемішування може дозволити відмовитися від використання азоту, необхідного для перемішування розплаву в плазмових процесах фірми Mintek, а використання плазмових пальників комбінованого типу має дозволити знизити робочу напруги струму, що знизить вірогідність пробою по ізолюючих вставках плазмогенератора. Склад атмосфери в плазмовому реакторі з МГД перемішуванням може

бути контрольованим, що має забезпечити умови високого ресурсу для електродугових плазмотронів з термоемісійними катодами. При цьому, як і у випадку плазмового обладнання для газифікації сировини, режими подачі захисного і плазмоутворювального газу мають бути узгодженими з умовами, необхідними для надійної роботи обладнання для очищення газів, наявність якого в установках для плазмового перероблення шлаків є обов'язковою.

Висновки. Таким чином, незважаючи на те, що рівень шкідливих речовин, які утворюються в процесі плазмового перероблення і газифікації відходів, є значно меншим, ніж у традиційних технологічних процесах, наявність систем очищення вихідних газів для такого устаткування є обов'язковою. Такі системи включають як обладнання для видалення твердих частинок (інерційні й вологі пиловловлювачі, механічні й електростатичні фільтри і т. п.), так і обладнання для видалення з газів різного роду хімічних сполук (абсорбційні й адсорбційні установки, лужневі й кислотні скрубери та ін.). Вартість таких систем може бути основною складовою комплексу обладнання для плазмової переробки і газифікації [17, 18].

Виходячи з економічних показників, для видалення механічних частинок з потоку синтез-газу або вихідного газу, що викидається в атмосферу, найчастіше використовуються різного роду інерційні пиловловлювачі (одиначні, групові та батарейні циклонни, жалюзійні пиловловлювачі, акустичні коагулятори, ротоклони та ін.), серед яких найпоширеніші - сепаратори циклонного типу.

Література

1. Анализ методов плазменной переработки металлургических шлаков в электропечах постоянного тока / С.И. Планковский, Д.А. Брега, Е. В. Цегельник, А.М. Алкиб // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. / Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». Харьков, 2016. Вып. 72. С. 68–76.
2. City of Honolulu Review of Plasma Arc Gasification and Vitrification Technology for Waste Disposal: Final Report / R.W. Beck Inc. Honolulu, 2003. 159 p.
3. Изменения микроструктуры стали при обработке в плазмотроне с жидким катодом / В.В. Мурга, И.И. Антропов, Д.К. Гамазин, А.М. Алкиб // Збірник наукових праць Донбаського державного технічного університету. 2014. Вип. 1 (42). С. 152–156.
4. Jones R.T., Barcza N.A., Curr T.R. Plasma Developments in Africa [Electronic resource] // World progress in plasma applications: proc. of Second Intern. Plasma Symp. (Palo Alto, Feb. 9–11, 1993). Palo Alto, 1993. URL: <https://www.pyrometallurgy.co.za/Mintek/Plasma/Plasma.htm>. (last accessed: 07.08.2019).
5. Jones R.T., Hayman D.A., Denton G.M. Recovery of cobalt, nickel, and copper from slags, using DC-arc furnace technology // International Symposium on Challenges of Process Intensification: proc. of 35th Annu. Conf. of Metallurgists (Montreal, Aug. 24–29,

1996). Montreal, 1996. P. 451–466.

6. Jones R.T., Deneys A.C. Using a Direct-Current Arc Furnace to recover cobalt from slags // *Journal of Minerals, Metals and Materials Society*. 1998. Vol. 50, no. 10. P. 57–61.

7. Abdel-latif M.A. Fundamentals of zinc recovery from metallurgical wastes in the Enviroplas process // *Minerals Engineering*. 2002. Vol. 15, iss. 11. P. 945–952.

8. Schoukens A. F.S., Denton G.M., Jones R.T. Pilot-plant production of Prime Western grade zinc from lead blast-furnace slags using the Enviroplas process // *Recycling of Metals and Engineered Materials: proc. of the Third Intern. Symposium (Point Clear, Nov. 12–15, 1995)*. Point Clear, 1995. P. 857–868.

9. Jones R.T. Economic and environmentally beneficial treatment of slags in DC arc furnaces // *Molten Slags, Fluxes and Salts: proc. of the VII Intern. Conf. (Cape Town, Jan. 25–28, 2004)*. Johannesburg, 2004. P. 363–376.

10. Jones R.T., Hayman D.A., Denton G.M. Recovery of cobalt, nickel, and copper from slags, using DC-arc furnace technology // *International Symposium on Challenges of Process Intensification: proc. of 35th Annu. Conf. of Metallurgists (Montreal, Aug. 24–29, 1996)*. Montreal, 1996. P. 451–466.

11. Jones R.T., Kotzé I.J. DC arc smelting of difficult PGM-containing feed materials // *Platinum Adding Value: proc. of the Intern. Platinum Conf. (Johannesburg. Oct. 3–7, 2004)*. Johannesburg, 2004. P. 33–36.

12. Neuschütz D. Plasma processing of dusts and residues // *Pure and Applied Chemistry*. 1996. Vol. 68, no. 5. P. 1159–1165.

13. Stüber A., Hauck A., Neuschütz D. Processing tests of filter dusts from a waste incineration plant in a 600 kW plasma melting furnace. *Thermal Plasma Processes / ed. by D. Neuschütz*. Düsseldorf: VDI Verlag, 1995. P. 583–590.

14. Oberlin C. Plasma processes for industrial applications. State of research and development activities undertaken by EDF // *Journal of high temperature chemical processes*. 1994. Vol. 3, no. 6. P. 719–732.

15. Кривцов В.С., Планковский С.И. Проблемы создания высокоресурсных сильноточных электродуговых плазмотронов // *Авиационно-космическая техника и технология*. 2005. № 7 (23). С. 7–21.

16. Кривцов В.С., Планковский С.И. Современное состояние и перспективы создания мощных высокоресурсных плазменных генераторов // *Технологические системы*. 2004. № 1. С. 11–15.

17. Исхаков А.Р. Повышение эффективности процессов очистки газов от дисперсной фазы и вредных примесей в комбинированных аппаратах: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.08 / Казан. гос. энергет. ун-т. Казань, 2016. 131 с.

18. Ляховко А.Д. Снижение уровня экологической опасности пылевых выбросов агломерационной фабрики металлургического комбината: дис. ... канд. техн. наук.: 21.06.01 / Гос. выс. учеб. заведение «Нац. горный ун-т». Днепр, 2016. 180 с.

Bibliography (transliterated)

1. Analiz metodov plazmennoy pererabotki metallurgicheskikh shlakov v elektropetchah postoyannogo toka / S.I. Plankovskiy, D.A. Brega, E.V. Tsegelnik, A.M. Alkib // Otkryitiye informatsionnyie i kompyuternyye integrirovannyye tehnologii: sb. nauch. tr. / Nats. aerokosm. un-t im. N. E. Zhukovskogo «HAI». Harkov, 2016. #. 72. P. 68–76.
2. City of Honolulu Review of Plasma Arc Gasification and Vitrification Technology for Waste Disposal: Final Report / R.W. Beck Inc. Honolulu, 2003. 159 p.
3. Izmeneniya mikrostrukturyi stali pri obrabotke v plazmotrone s zhidkim katodom / V.V. Murga, I.I. Antropov, D.K. Gamazin, A.M. Alkib // Zbİrnik naukovih prats Donbaskogo derzhavnogo tehnİchnogo unİversitetu. 2014. # 1 (42). P. 152–156.
4. Jones R.T., Barcza N.A., Curr T.R. Plasma Developments in Africa [Electronic resource] // World progress in plasma applications: proc. of Second Intern. Plasma Symp. (Palo Alto, Feb. 9–11, 1993). Palo Alto, 1993. URL: <https://www.pyrometallurgy.co.za/Mintek/Plasma/Plasma.htm>. (last accessed: 07.08.2019).
5. Jones R.T., Hayman D.A., Denton G.M. Recovery of cobalt, nickel, and copper from slags, using DC-arc furnace technology // International Symposium on Challenges of Process Intensification: proc. of 35th Annu. Conf. of Metallurgists (Montreal, Aug. 24–29, 1996). Montreal, 1996. P. 451–466.
6. Jones R.T., Deneys A.C. Using a Direct-Current Arc Furnace to recover cobalt from slags // Journal of Minerals, Metals and Materials Society. 1998. Vol. 50, no. 10. P. 57–61.
7. Abdel-latif M.A. Fundamentals of zinc recovery from metallurgical wastes in the Enviroplas process // Minerals Engineering. 2002. Vol. 15, iss. 11. P. 945–952.
8. Schoukens A.F.S., Denton G.M., Jones R.T. Pilot-plant production of Prime Western grade zinc from lead blast-furnace slags using the Enviroplas process // Recycling of Metals and Engineered Materials: proc. of the Third Intern. Symposium (Point Clear, Nov. 12–15, 1995). Point Clear, 1995. P. 857–868.
9. Jones R.T. Economic and environmentally beneficial treatment of slags in DC arc furnaces // Molten Slags, Fluxes and Salts: proc. of the VII Intern. Conf. (Cape Town, Jan. 25–28, 2004). Johannesburg, 2004. P. 363–376.
10. Jones R.T., Hayman D.A., Denton G.M. Recovery of cobalt, nickel, and copper from slags, using DC-arc furnace technology // International Symposium on Challenges of Process Intensification: proc. of 35th Annu. Conf. of Metallurgists (Montreal, Aug. 24–29, 1996). Montreal, 1996. P. 451–466.
11. Jones R.T., Kotzé I.J. DC arc smelting of difficult PGM-containing feed materials // Platinum Adding Value : proc. of the Intern. Platinum Conf. (Johannesburg. Oct. 3–7, 2004). Johannesburg, 2004. P. 33–36.
12. Neuschütz D. Plasma processing of dusts and residues // Pure and Applied Chemistry. 1996. Vol. 68, no. 5. P. 1159–1165.

13. Stüber A., Hauck A., Neuschütz D. Processing tests of filter dusts from a waste incineration plant in a 600 kW plasma melting furnace. Thermal Plasma Processes / ed. by D. Neuschütz. Düsseldorf: VDI Verlag, 1995. P. 583–590.

14. Oberlin C. Plasma processes for industrial applications. State of research and development activities undertaken by EDF // Journal of high temperature chemical processes. 1994. Vol. 3, no. 6. P. 719–732.

15. Krivtsov V.S., Plankovskiy S.I. Problemyi sozdaniya vyisokoresursnyih silnotochnyih elektrodugovyih plazmotronov // Aviatsionno-kosmicheskaya tehnika i tehnologiya. 2005. # 7 (23). P. 7–21.

16. Krivtsov V.S., Plankovskiy S.I. Sovremennoe sostoyanie i perspektivy sozdaniya moschnyih vyisokoresursnyih plazmennyyh generatorov // Tehnologicheskie sistemyi. 2004. # 1. P. 11–15.

17. Ishakov A.R. Povyishenie effektivnosti protsessov ochistki gazov ot dispersnoy fazyi i vrednyih primesey v kombinirovannyih apparatah: dis. ... kand. tehn. nauk: 05.17.08 / Kazan. gos. energet. un-t. Kazan, 2016. 131 p.

18. Lyahovko A.D. Snizhenie urovnya ekologicheskoy opasnosti pyilevyih vyibrosov aglomeratsionnoy fabriki metallurgicheskogo kombinata: dis. ... kand. tehn. nauk: 21.06.01 / Gos. vyis. ucheb. zavedenie «Nats. gornyy un-t». Dnepr, 2016. 180 p.

УДК 621.9.048:533.9

Мохаммед Алтагер Албаршеши, директор інституту,
Алкіб Ахмед М. Мохаммед Алджалі, PhD, викладач кафедри оптики

ПЛАЗМОВІ ТЕХНОЛОГІЇ ПЕРЕРОБЛЕННЯ ШЛАКІВ

Вищий інститут науки і техніки (Тріполі, Лівія)

В роботі розглянуто актуальний стан технологій плазмового перероблення відходів, зокрема шлаків. Акцентується увага, що хоча рівень шкідливих речовин, які утворюються в процесі плазмового перероблення і газифікації відходів, є значно меншим, ніж у традиційних технологічних процесах, наявність систем очищення вихідних газів для такого устаткування є обов'язковою. Вартість таких систем може бути основною складовою комплексу обладнання для плазмової переробки і газифікації.

Ключові слова: плазмове перероблення шлаків, плазмова піч, електродуговий плазмотрон, газифікація твердих побутових відходів, система очищення газів.

Мохаммед Алтагер Албаршеши, директор института,
Алкиб Ахмед М. Мохаммед Алджали, PhD, преподаватель кафедры оптики

ПЛАЗМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ ШЛАКОВ

Высший институт науки и техники (Триполи, Ливия)

В работе рассмотрено актуальное состояние технологий плазменной переработки отходов, в частности шлаков. Акцентируется внимание, что, хотя уровень вредных веществ, которые образуются в процессе плазменной переработки и газификации отходов, значительно меньше, чем в традиционных технологических процессах, наличие систем очистки отходящих газов для такого оборудования является обязательным. Стоимость таких систем может быть основной составляющей комплекса оборудования для плазменной переработки и газификации.

Ключевые слова: плазменная переработка шлаков, плазменная печь, электродуговой плазматрон, газификация твердых бытовых отходов, система очистки газов.

Mohammed Taher Isse Barshushi, Director institute administrator,
Alkeeb Ahmed M. Mohammed Aljali, PhD, Department of Optics Lecturer

PLASMA TECHNOLOGIES FOR SLAG PROCESSING

Higher Institute of Science and Technology (Tripoli, Libya)

The current state of the technology for plasma processing of waste, in particular slag, is considered in the work. It is emphasized that, although the level of harmful substances that are formed in the process of plasma processing and gasification of waste is much lower than in traditional technological processes, the presence of exhaust gas purification systems for such equipment is mandatory. The cost of such systems may be the main component of the complex of equipment for plasma processing and gasification.

Keywords: plasma slag processing, plasma furnace, electric arc plasmatron, gasification of municipal solid waste, gas treatment system.