ISSN 2077-1304. Met. lit'e Ukr., vol. 34, 2026, № 2 (345), 37-45

https://doi.org/10.15407/steelcast2026.02.037

УДК 621.74 + 583.3

С.М. Мезенцев, аспірант кафедри «Ливарне виробництво»,

e-mail: Serhii.Mezentsev@mit.khpi.edu.ua, https://orcid.org/0009-0004-4914-6614

О.І. Пономаренко, д-р техн. наук, проф., зав. кафедри «Ливарне виробництво»,

e-mail: 21ponomarenko@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-3043-4497

І.О. Мезенцева, канд. техн. наук, доц., проф. кафедри «Безпека праці та навколишнього середовища»,

e-mail: mezencevairen@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-7695-7982

Н.С. Євтушенко, канд. техн. наук, доц., проф. кафедри «Безпека праці та навколишнього середовища»,

e-mail: natalya0899@ukr.net, https://orcid.org/0000-0003-0217-3450

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» (Харків, Україна)

Отримання комплексних легуючих добавок металургійним способом із відходів машинобудування

В статті наведено детальний аналіз твердих окислених відходів, що утворилися після електроерозійної обробки деталей із нікелевих сплавів. Розглянуто основні різновиди (електроіскрова, електроімпульсна, електроконтактна та анодно-механічна) та характеристики електроерозійної обробки. Вказано, що всі різновиди електроерозійної обробки металів засновані на використанні явища електричної ерозії.

Показано хімічний, а також фазовий склад відходів. Рентгенофлуоресцентний аналіз відходів показав, що до складу відходів входять такі кольорові метали, як нікель, хром, молібден, алюміній, вольфрам і титан. Електронно-мікроскопічні і петрографічні дослідження дозволили встановити, що відходи складаються із двох фаз: металевої і оксидної. Задля найбільш повного вилучення металів із відходів запропоновано високотемпературний процес відновлення.

Проведено термодинамічні розрахунки, на підставі яких визначено, що найбільша ймовірність відновлення оксидів металів відбувається твердим вуглецем. Описано, що процес відновлення твердим вуглецем протікає з утворенням не тільки чистих металів, а й карбідів металів. Надано обґрунтування утворення карбідів металів поряд із чистими металами при проведенні процесу відновлення. Визначено температури початку відновлення оксидів металів вуглецем на підставі хімічної спорідненості металу, що відновлюється, та твердого вуглецю до кисню.

Запропоновано проведення дробного факторного експерименту із змінними параметрами. У якості змінних параметрів обрано температуру та час проведення процесу відновлення, кількість відновника і товщину шару відходів. Розглянуто припущений механізм утворення металевої основи при різних значеннях вихідних параметрів. Представлено висновки щодо необхідності переробки твердих відходів електроерозійної обробки.

Ключові слова: *відходи, процес відновлення, оксиди металів, твердий вуглець, термодинамічні розрахунки, легуючі добавки.*

Вступ. Відомо, що найбільш ефективним методом комплексного покращення експлуатаційних характеристик залізовуглецевих сплавів є легування. Для отримання якісних чавунів та сталей використовують різні легуючі добавки та лігатури. Оскільки в Україні практично немає сировинної бази багатьох кольорових металів, стає актуальним питання використання відходів сплавів кольорових металів у якості вторинної сировини. Метали, що можуть входити до

Стаття опублікована на умовах відкритого доступу за ліцензією CC BY license
(https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

складу відходів, такі як нікель, хром, молібден, титан, алюміній, вольфрам, ніобій є основними легуючими елементами в сталях і чавунах [1–5].

На підприємствах машинобудівного комплексу одним із методів обробки деталей зі складнолегованих сталей та сплавів є електроерозійна обробка. Цей вид обробки заснований на використанні перетворюваної в тепло енергії електричних розрядів, що виникають між інструментом (електродом) і заготовкою. Залежно від виду електричного розряду (іскри, дуги), параметрів імпульсу струму, напруги та інших умов електроерозійна обробка включає чотири основні різновиди: електроіскрову, електроімпульсну, електроконтактну та анодно-механічну. Кожна з цих обробок відрізняється вихідними технологічними характеристиками, обладнанням та має свою галузь промислового застосування. Проте, всі різновиди електроерозійної обробки металів засновані на використанні явища електричної ерозії. Електроерозійний метод застосовують при обробці порожнин кувальних, вирубних, формувальних та інших штампів, прес-форм, ливарних форм, висадкового та фасонного металорізального інструменту, деталей паливної апаратури, газотурбінних двигунів, різних приладів та виробів тощо [6, 7].

Проведення технологічних процесів з використанням електроерозійної обробки неминуче призводить до утворення відходів (продуктів ерозії), що містять значну кількість легуючих елементів. До складу відходів входять сполуки таких елементів, як нікель, вольфрам, молібден, алюміній, хром, титан та інші. Хімічний склад продуктів ерозії визначається матеріалом заготовки та матеріалом електрода. Більшість сполук зазначених елементів є токсичними й чинять шкідливий вплив у разі потрапляння в ґрунт на територіях, прилеглих до промислових підприємств [8, 9]. Продукти ерозії накопичуються на підприємствах та забруднюють територію. Підприємства змушені відшкодовувати збитки від забруднення ґрунтів.

Представляло інтерес дослідити відходи, що містять сполуки кольорових металів, які утворились після електроерозійної обробки деталей із нікелевих сплавів. Переробка даних відходів є дуже актуальним завданням: по-перше, це дозволить здійснити повернення цінних елементів у виробництво, по-друге, знизити екологічне навантаження на довкілля.

Мета даної роботи є дослідження відходів, що містять сполуки кольорових металів, з подальшим наданням пропозицій щодо способу їх переробки.

Методи дослідження. Для визначення хімічного складу відходів використовували рентгенофлуоресцентний аналіз, який полягає у неруйнівному елементному аналізі матеріалів за спектрами рентгенівської флуоресценції.

Фазовий склад відходів, що формуються в процесі електроерозійної обробки деталей зі складнолегованих сталей, мають вигляд гранул і були досліджені із застосуванням електронно-мікроскопічного та петрографічного методів.

Електронно-мікроскопічний аналіз є одним із сучасних методів вивчення мікроструктури твердих тіл, їх електричних і магнітних полів, а також локального хімічного складу з використанням комплексу електронно-зондових методик.

Петрографічний метод ґрунтується на порівняльному аналізі речовинного складу, структурних і текстурних особливостей, кольору та наявності характерних мінералів. Фазовий склад продуктів ерозії досліджували на полірованих шліфах за допомогою металографічного мікроскопа. Для цього відбирали різні ділянки відходів та готували відповідні поліровані зразки. У результаті проведених досліджень були отримані мікрофотографії відходів, які згодом проаналізовано та описано з використанням спеціалізованих довідкових даних.

Для підвищення точності та зменшення обсягу експериментальних досліджень було застосовано математичне планування експерименту. Був використаний метод найменших квадратів, який є основним математичним апаратом визначення моделей.

Під час створення математичної моделі задавались вхідними змінними (факторами), які впливають на досліджуваний об'єкт. Для вибору факторів були виконані такі вимоги: фактор має бути регульованим, точність вимірювання та управління факторів має бути відома та досить висока. Окрім цього, фактори повинні мати області визначення, задані технологічними або принциповими обмеженнями.

Експериментальні результати. На першому етапі проведено детальне вивчення відходів. Вони представляють собою неоднорідну пористу масу з частинок сірого кольору із включенням металевого блиску. При розгляді зламу видно частинки коричнево-рудого кольору, імовірно, оксиди заліза.

Хімічний склад відходів був виконаний за допомогою рентгенофлуоресцентного аналізатора «СПРУТ». Відсотковий розподіл кольорових металів, що входять у відходи, наведено в табл. 1.

З табл. 1 видно, що до складу відходів входять

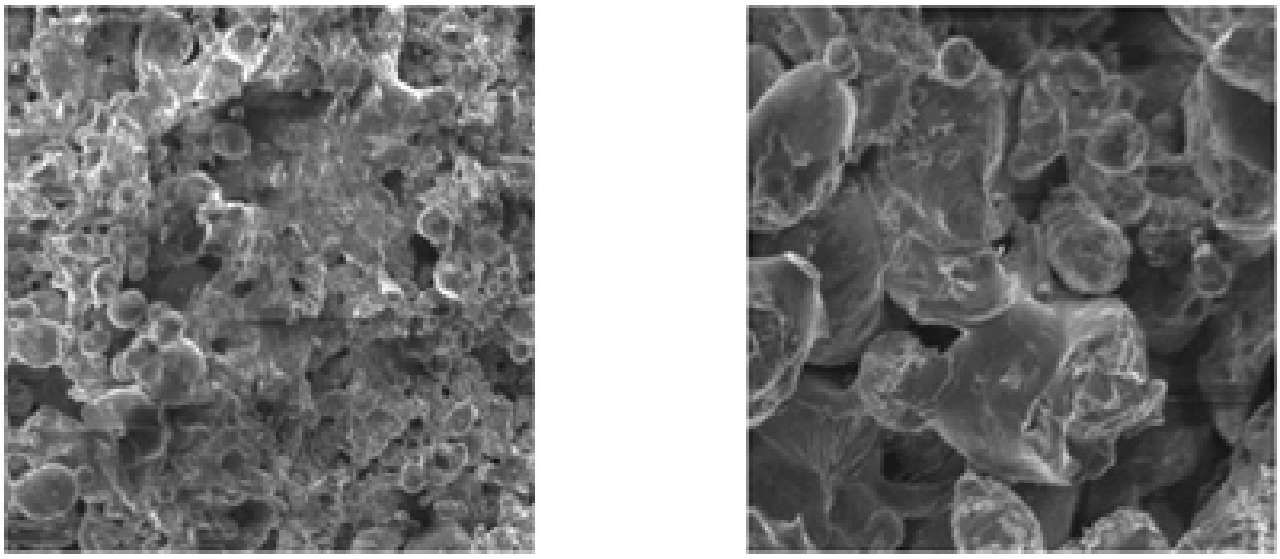
Таблиця 1

Хімічний склад відходів

Елементи	Ni	Cr	Fe	Mo	Al	Ti	W	Nb
Хімічний склад, %	62,35	17,56	6,34	5,27	3,07	2,87	1,35	1,16

елементи, які мають розповсюджене використання у якості легуючих добавок до чавунів і сталей.

В результаті електронно-мікроскопічних досліджень було встановлено, що у відходах містяться частинки, які мають кулясту або близьку до неї форму (рис. 1). На рис. 1 спостерігається



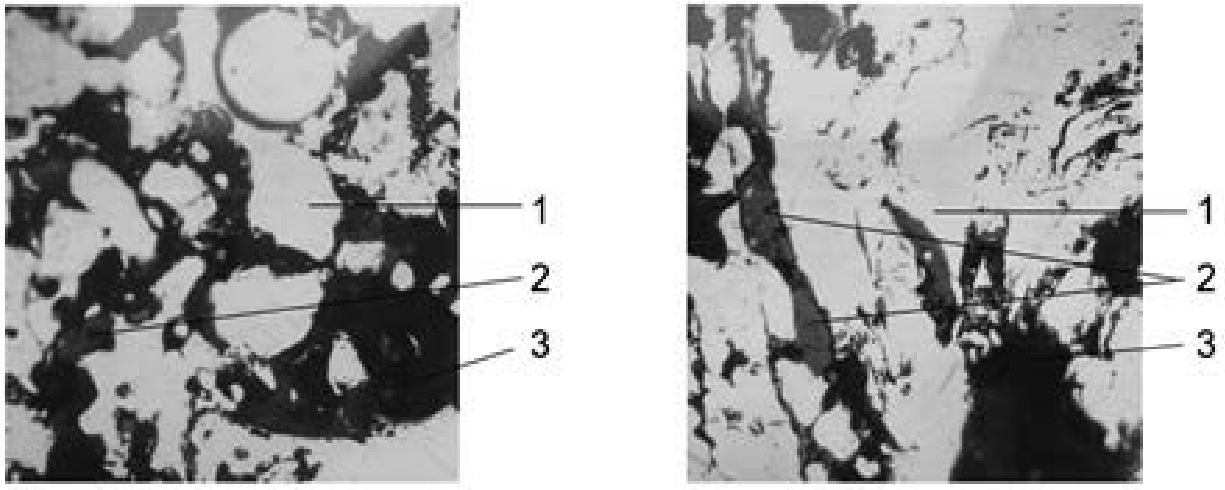
а *б*

Рис. 1. Знімок частинок у відходах, що утворені після електроерозійної обробки нікелевих сплавів: *а* — збільшення 200; *б* — збільшення 50

чітко виражена межа переходу від однієї ділянки до іншої. Зустрічаються частинки великих розмірів 10^{-2} – 10^{-1} см, переважно частинки 10^{-4} – 10^{-3} см і дуже дрібні частинки (10^{-6} – 10^{-5} см), які утворюють як би пухку пористу масу.

Наявність оксидної фази у відходах, утворених при електроерозійній обробці нікелевого сплаву, а також встановлення кількісного вмісту оксидів було проведено за допомогою петрографічних досліджень. Фазовий склад відходів (продуктів ерозії) вивчали на полірованих шліфах за допомогою металографічного мікроскопа NU – 2E. Зразки для аналізу готували наступним чином: вибирали різні ділянки відходів та готували полірований шліф. Дослідження проводилось на зразках відходів із хімічним складом, зазначеним у табл. 1. Петрографічні дослідження під мікроскопом наведено на рис. 2.

Після проведення петрографічних досліджень було визначено, що відходи складаються із металевої фази, оксидної фази, пор та тріщин. На рис. 2*а* металева фаза представлена різними за розмірами і формою частинами світлого кольору. Оксидні утворення спостерігаються як по краях округлої металевої фази, так і у вигляді включень неправильної форми. У деяких місцях частинки металевої фази щільно прилягають одна до одної. Розподіл оксидної фази нерівномірний: у більш щільних ділянках зразка — 5–7 %, менш щільних (пористих) — 15–20 %. Металеву фазу на рис. 2*б* найбільше видно у правій частині рисунка і спостерігається у вигляді округлих,



а *б*

Рис. 2. Петрографічні дослідження окислених відходів під мікроскопом (×80): *1* — металева фаза; *2* — неметалоподібна (оксидна) фаза; *3* — пори, тріщини

витягнутих, неправильної форми утворень. Оксидну фазу чітко видно в лівій частині знімка та по краях металевої фази. Темні ділянки малюнка це є пори і тріщини, розміри яких сягають 300 мкм. Оксидна фаза розташована за межами металевої фази. Розмір частинок металевої фази становить від 20 до 200 мкм, максимально — 500 мкм.

Оксидна фаза у відходах представлена оксидами, зазначеними у табл. 2.

Перерахунок оксидів у твердих відходах на 100 % представлено на рис. 3.

Встановлено, що у відходах знаходяться пере-

Таблиця 2

Вміст оксидів у відходах, %

Оксиди металів	NiO	Cr_2O_3	FeO	MoO_2	Al_2O_3	TiO_2	WO_2	Nb_2O_5
Вміст у твердих відходах, %	9,4	4,6	4,8	0,5	0,28	0,2	0,1	0,12

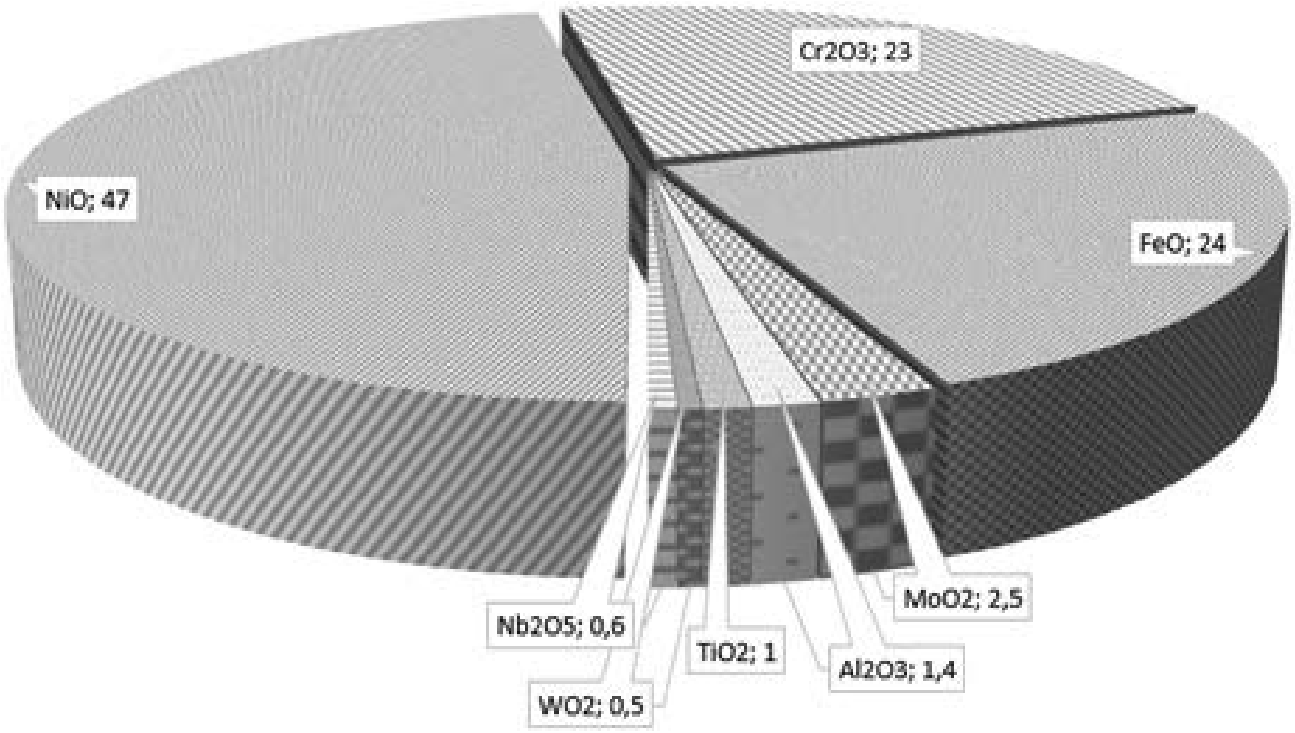


Рис. 3. Розподіл оксидів у твердих відходах на 100 %

важно фази твердих металевих сполук, а саме близько 80 % і оксидні сполуки у кількості 20 %. Поверхні утворених частинок покриті оксидною плівкою різної товщини.

Обговорення результатів. На підставі проведених досліджень відходів можна зробити висновок, що переважна більшість гладких оплавлених форм свідчить про значну роль теплових факторів у процесі електроерозійної обробки. Ймовірно, великі частинки та частинки середніх розмірів утворені з рідкого стану, а дрібні частинки найімовірніше сформовані з пароподібного стану, які здебільшого складаються з оксидів металів. У деяких місцях відбулося спікання частинок внаслідок особливостей обробки, що призвело до утворення конгломератів [6].

Основне завдання переробки полягає у найбільш повному відновленні оксидів металів, що містяться у твердих відходах. Відповідно до цього можна запропонувати високотемпературний процес відновлення [10, 11]. Були розглянуті відновлювальні процеси з такими відновниками: оксид вуглецю, водень та твердий вуглець. Термодинамічна ймовірність відновлення оксидів металів, які містяться у твердих відходах, газами менше, ніж твердим вуглецем. Необхідно більш досконало розглянути процес вуглетермічного відновлення оксидів металів. Автори робіт [12—14] вказують на те, що процес відновлення твердим вуглецем протікає з утворенням не тільки чистих металів, а і карбідів металів. Реакції відновлення оксидів, кількість яких більша у відходах, твердим вуглецем та його термодинамічні характеристики представлено у табл. 3.

На підставі термодинамічних характеристик, що представлені у табл. 3, видно, що у процесі відновлення оксидів металів, що містяться у твердих відходах, твердим вуглецем утворюються не тільки чисті метали, а й карбіди металів.

Зокрема автор роботи [12] вказує на те, що при

Таблиця 3

Реакції відновлення оксидів твердим вуглецем та їх термодинамічні характеристики

Реакції відновлення оксидів	$\Delta G^0_T = \Delta(T)$, Дж/моль	$lgK = a/T + b$		ΔG^0_{1773}, кДж/моль
		a	*b*	
NiO + C = Ni + CO	129180 – 183,71*T*	-6743,93	9,59	-196,53
FeO + C = Fe + CO	154280 – 158,2*T*	-8054,29	8,26	-126,21
3FeO + 4C = Fe_3C + 3CO	162660 – 165,95*T*	-8491,78	8,66	-131,57
Cr_2O_3 + 3C = 2Cr + 3CO	809000 – 541,5*T*	-42234,4	28,26	-151,07
$3Cr_2O_3$ + 13C = $2Cr_3C_2$ + 9CO	735800 – 543,63*T*	-38412,95	28,38	-228,06
MoO_2 + 2C = Mo + 2CO	368060 – 365,72*T*	-19214,83	19,09	-280,36
WO_2 + 2C = W + 2CO	367060 – 413,52*T*	-19162,62	21,59	-366,11
WO_2 + 3C = WC + 2CO	328960 – 369,12*T*	-17173,58	19,27	-373,36
TiO_2 + 2C = Ti + 2CO	723710 – 363,7*T*	-37781,78	18,98	78,87

використанні у якості відновника твердого вуглецю (разом із газом CO, який є супутнім продуктом хімічних реакцій з використанням твердого вуглецю) відновлене із вюститу залізо завжди є високовуглецевим, тобто відновлюється до стану чавуну (карбіду заліза Fe_3C). Відновлення магнетиту відбувається з утворенням вюститу, а потім відновлення вюститу може йти за двома напрямками — з утворенням карбіду заліза (Fe_3C) і з утворенням чистого заліза, але константа рівноваги карбіду заліза більша, ніж заліза $K_{pFe3C} > K_{pFe}$, тому розрахунки підтверджують ймовірність утворення карбіду заліза.

При відновленні Cr_2O_3 термодинамічні розрахунки показують, що більш ймовірно утворення Cr_3C_2 ніж Cr, оскільки $K_{pCr3C2} > K_{pCr}$. В роботі [13] також надається термодинамічне обґрунтування комплексного відновлення хроммістких матеріалів в області помірних температур з утворенням карбідів хрому.

Можна зробити висновок, що і оксид вольфраму (WO_2) буде відновлюватися з утворенням карбіду вольфраму (WC), тому що константи рівноваги карбіду вольфраму і чистого вольфраму перебувають у співвідношенні $K_{pWC} > K_{pW}$.

Для проведення високотемпературного процесу відновлення необхідно визначити температуру проведення процесу, яка повинна бути у межах, що дозволить провести відновлення оксидів.

Температури початку відновлення оксидів металів вуглецем визначені за методом, який заснований на тому, що температура початку відновлення оксиду металу твердим вуглецем відповідає температурі, при якій хімічна спорідненість металу, що відновлюється, до кисню і хімічна спорідненість вуглецю до кисню будуть однаковими [12, 15]. Поруч із процесом відновлення оксидів відбувається процес сплавлення твердих сполук металів. Оскільки у відходах нікель основний елемент, то для досягнення в процесі відновлення рідкої фази вибирається температура 1773 К.

Для збільшення площі контакту твердих відходів з відновлювачем відходи бажано подрібнити. У якості відновника можна використати вуглець у вигляді подрібненого електродного бою. Процес відновлення твердих відходів можна провести при температурах 1773 К та 1823 К протягом 30—120 хвилин з інтервалом в 30 хвилин. Товщина шару твердих відходів у зразку — від 6 до 12 мм.

Для підвищення точності та зменшення обсягу експериментальних досліджень застосуємо математичне планування експерименту. Проведено дробний факторний експеримент. План моделі описаний поліномами першого порядку. Лінійна модель процесу відновлення у загальному випадку має вигляд, що представлений у формулі 1:

$$y(x, a) = a_0 + a_1x_1 + \ldots + a_n x_n, \qquad (1)$$

де y — вихідна функція процесу відновлення; a_i — оцінки коефіцієнтів моделі; x_i — фактори, що впливають на процес відновлення.

У плані кожен чинник значимий лише з двох рівнів, які можна позначити +1 і –1.

Безліч точок, розташованих у n-вимірному просторі з координатами +1 (+) або –1 (–), називається повним факторним планом типу 2^n. Число точок у плані $N = 2^n$.

Зі збільшенням факторного простору n зростає кількість дослідів $N = 2^n$ повних факторних планів. Відповідно, при великих значеннях n ці плани виявляються практично неприйнятними. Дробний факторний план (ДФП) відрізняється від повного факторного плану (ПФП) тим, що дозволяє суттєво скоротити кількість дослідів. ДФП становить частину ПФП 2^n. Як фактори в ДФП обрані: температура, час, кількість відновника і товщина шару твердих відходів у зразку.

Побудова математичної моделі проводилась шляхом найменших квадратів. У якості незалежних змінних обрані: температура, К (x_1), кількість відновника, % (x_2), товщина шару твердих відходів у зразку, мм (x_3). Загальний вигляд моделі — лінійний:

$$y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3x_3, \qquad (2)$$

де a_i — оцінка коефіцієнтів моделі, що розраховуються на підставі реалізації плану дробного факторного експерименту 2^{3-1}; y — вихід продукту реакції протягом часу, %.

Можна припустити можливі механізми утворення

металу у відновлювальній атмосфері за різних температур. При температурі 1620 К процесу відновлення рідка фаза не буде утворюватися. Відбувається взаємодія твердого вуглецю, що знаходиться на дні тигля, із твердими відходами. Йде часткове відновлення оксидної плівки на поверхні частинок металу. Вуглець створює відновлювальну атмосферу та перешкоджає подальшому окисленню металу.

При 1770 К утворюється рідка фаза (температура плавлення нікелю — 1720 К, системи нікель-хром — 1445 К, системи нікель-залізо — 1708 К [15]). Відбувається руйнування оксидної плівки, що покриває частинки металу, і метал починає плавитися. Крапельки металу укрупнюються та стікають у нижню частину тигля. У верхній частині тигля залишається шлак, що не розплавився.

Можливо, за даної температури метал, що знаходиться в оксидній плівці, починає плавитися, збільшується в об'ємі і руйнує оксидну плівку. Твердий вуглець реагує з киснем оксидів твердих відходів та з киснем зовнішнього середовища (атмосфери). Оксид вуглецю, що утворюється, бере участь у процесі газового відновлення. Поруч із процесом відновлення йде процес навуглецювання металу, що підтверджується термодинамічними розрахунками.

За підвищених температур 1920—1970 К шлак спікається та закриває тверді відходи від контакту з газовою фазою. Ускладняється доступ кисню, і в невеликому обсязі тигля під спеклим шаром оксидів починає працювати вуглець, при цьому швидкість процесу збільшується. Підвищення температури обмежується технологічними можливостями устаткування.

Математична модель дозволила визначити оптимальні умови отримання легуючої добавки, що містить переважно Ni (54—64 %), а також Cr (13—17 %), Mo (3—5 %), AL (2—3 %), Ti (2—3 %), W (~1 %), Nb (0,5—1 %), інше — залізо. Дану добавку можна використовувати при легуванні чавуну та сталі [16].

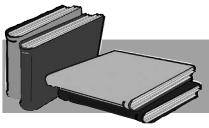
Висновки

Використання відходів як вторинної сировини має важливе значення для подальшого розвитку народного господарства України. Переробка твердих відходів електроерозійної обробки дозволить:

— отримати комплексну легуючу добавку, яку можна використовувати при легуванні чавуну;

— виключити зберігання токсичних відходів на територіях промислових підприємств;

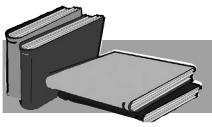
— знизити собівартість чавуну завдяки застосуванню отриманої легуючої добавки замість феросплавів, що традиційно використовуються.



ЛІТЕРАТУРА

1. Руденко Л.Ф., Говорун Т.П. Леговані сталі та сплави: навч. посіб. Суми: СумДУ, 2012. 171 с. URL: https://essuir.sumdu.edu.ua/items/e6da141f-6087-4e34-ac46-9dbb11942689 (дата звернення: 20.04.2026).
2. Куцова В.З., Ковзель М.А., Носко О.А. Леговані сталі та сплави з особливими властивостями. Підручник. Дніпропетровськ: НметАУ, 2008. 348 с.
3. Бубликов В.Б., Ясинський О.О., Ясинська О.О., Берчук Д.М., Бачинський Ю.Д. Особливості впливу легування на структуроутворення і механічні властивості високоміцного чавуну у виливках. *Процеси лиття*. 2024. № 158(4). С. 25—35. https://doi.org/10.15407/plit2024.04.025
4. Пахаренко В.Л., Марчук М.М., Пахаренко О.В. Технологія конструкційних матеріалів та матеріалознавство (обробка металів різанням). Навчальний посібник. 2-е вид., перероб. і доповн. Рівне: Національний університет водного господарства та природокористування (НУВГП), 2018. 252 с.
5. Ящук С.М., Люльченко В.Г. Виробництво та обробка конструкційних матеріалів (технологія виробництва конструкційних матеріалів): навч. посіб. Умань: Візаві, 2020. 199 с.
6. Мезенцева І.О., Мезенцев С.М. Вплив на продукти ерозії фізичних процесів електроерозійної обробки деталей із складнолегованих сталей. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні*. 2025. № 1 (11). С. 83—88. https://doi.org/10.20998/2079-004X.2025.1(11).10
7. Носуленко В.І., Шмельов В.М., Пащенко А.А. Вплив характеру течії робочої рідини на якість обробки в умовах розмірної обробки металів електричною дугою. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії*. 2019. № 11 (1336). С. 53—57. URL: https://repository.kpi.kharkov.ua/items/c194876c-2fcb-42a8-8868-22e9ebd97990 (дата звернення: 20.04.2026).
8. Постанова від 20.10.2023 № 1102 Про затвердження Порядку класифікації відходів та Національного переліку відходів. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=105393 (дата звернення: 20.04.2026).
9. Зеркалов Д.В. Екологічна безпека: управління, моніторинг, контроль: посібник. Київ: КНТ: Дакор: Основа, 2007. 412 с.
10. Мезенцев С.М., Пономаренко О.І., Мезенцева І.О. Доцільність пірометалургійного способу переробки окисленої вторинної сировини. *Теоретичні та практичні дослідження молодих вчених: зб. тез доп. 19-ї Міжнар. наук.-практ. конф. магістрантів та аспірантів*, 19—21 листопада 2025 р. / гол. Є.І. Сокол; оргком.: Р.П. Мигущенко, О.С. Кулик, М.Д. Годлевський [та ін.]; Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т» [та ін.]. Харків: НТУ «ХПІ», 2025. С. 714—715. URL: https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/96400 (дата звернення: 20.04.2026).

11. Sokolov V.M., Gorbenko V.V., Vinnik I.A., Mekhed O.M. Processing the Ni- And Cr-bearing oxidized scarfing granulates with liquid cast iron. *TMS Fall Extraction and Processing Division: Sohn International Symposium*. 2006. № 1. P. 453—462.
12. Солдаткіна Л.М. Хімічна термодинаміка в схемах, таблицях, формулах, рисунках. Одеса: «Одеський національний університет», 2012. 101 с.
13. Пантейков С.П. Термодинамічний аналіз процесів відновлення заліза з вюститу твердим вуглецем. *Science, Technology and Global Challenges: Proceedings of 7-th International Scientific and Practical Conference (March 05–07, 2026, Tokyo, Japan)*. Tokyo: CPN Publishing Group. 2026. P. 203—212.
14. Дзюзюра Р.О., Селівьорстова Т.В. Розробка ПЗ для визначення енергії Гіббса та дослідження термодинаміки реакцій відновлення хрому. *Молодий вчений*. 2018. № 5 (57). С. 369—372.
15. Охотський В.Б., Костьолов О.Л., Симонов В.К. та ін. Теорія металургійних процесів. Київ: ІЗМН, 1997. 512 с.
16. Мезенцев С.М., Пономаренко О.І., Мезенцева І.О., Євтушенко Н.С. Шляхи отримання феросплавів із відходів машинобудівних підприємств. *Литво. Металургія. 2024: матеріали 20-ї Ювілейної Міжнар. наук.-практ. конф.*, 28—30 травня 2024 р. Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т» [та ін.]; заг. ред. О.І. Пономаренко. Харків; Київ, 2024. С. 160—162. URL: https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/78067 (дата звернення: 20.04.2026).



REFERENCES

1. Rudenko, L. F., & Govorun, T. P. (2012). Lehovani stali ta splavy: navch. posib. [Alloy steels and alloys: tutorial]. SumDU. https://essuir.sumdu.edu.ua/items/e6da141f-6087-4e34-ac46-9dbb11942689 [in Ukrainian].
2. Kutsova, V. Z., Kovzel, M. A., & Nosko, O. A. (2008). Lehovani stali ta splavy z osoblyvymy vlastyvostiamy. Pidruchnyk [Alloy steels and alloys with special properties: Textbook]. NmetAU [in Ukrainian].
3. Bublikov, V. B., Yasynskyi, O. O., Yasynska, O. O., Berchuk, D. M., & Bachynskyi, Yu. D. (2024). Features of alloying influence on ductile cast iron structure formation and mechanical properties in castings. *Casting Processes, 158*(4), 25-35. https://doi.org/10.15407/plit2024.04.025 [in Ukrainian].
4. Pakharenko, V. L., Marchuk, M. M., & Pakharenko, O. V. (2018). Tekhnolohiia konstruktsiinykh materialiv ta materialoznavstvo (obrobka metaliv rizanniam). Navchalnyi posibnyk. 2-e vyd., pererob. i dopovn. [Technology of structural materials and materials science (metalworking by cutting). Preliminary work. 2nd ed., revised and supplemented]. National University of Water Management and Natural Resources [in Ukrainian].
5. Yashchuk, S. M., & Lyulchenko, V. G. (2020). Vyrobnytstvo ta obrobka konstruktsiinykh materialiv (tekhnolohiia vyrobnytstva konstruktsiinykh materialiv): navch. posib. [Production and processing of structural materials (technology of production of structural materials): textbook]. Vizavi [in Ukrainian].
6. Mezentseva, I. O., & Mezentsev, S. M. (2025). The influence of physical processes of electric erosion machining of complex alloyed steels on erosion products. *Bulletin of the National technical university "Kharkiv Polytechnic Institute". Series: Techniques in a machine industry, 1*(11), 83-88. https://doi.org/10.20998/2079-004X.2025.1(11).10 [in Ukrainian].
7. Nosulenko, V. I., Shmelev, V. M., & Pashchenko, A. A. (2019). Vplyv kharakteru techii robochoi ridyny na yakist obrobky v umovakh rozmirnoi obrobky metaliv elektrychnoiu duhoiu [Influence of the character of the flow of the working liquid on the quality of processing in the conditions of dimensional processing of metals by an electric arc]. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy, 11*(1336), 53-57. https://repository.kpi.kharkov.ua/items/c194876c-2fcb-42a8-8868-22e9ebd97990 [in Ukrainian].
8. Postanova vid 20.10.2023 № 1102 Pro zatverdzhennia Poriadku klasyfikatsii vidkhodiv ta Natsionalnoho pereliku vidkhodiv [Resolution No. 1102 of October 20, 2023, on the Approval of the Waste Classification Procedure and the National Waste List]. https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=105393 [in Ukrainian].
9. Zerkalov, D. V. (2007). Ekolohichna bezpeka: upravlinnia, monitorynh, kontrol: posibnyk [Environmental safety: management, monitoring, control: manual]. KST: Dakor: Osnova [in Ukrainian].
10. Mezentsev, S. M., Ponomarenko, O. I., & Mezentseva, I. O. (2025). Dotsilnist pirometalurhiinoho sposobu pererobky okyslenoi vtorynnoi syrovyny [The feasibility of the pyrometallurgical method of processing oxidized secondary raw materials]. *Theoretical and practical research of young scientists: collection of abstracts of the 19th International Scientific and Practical Conference of Masters and PhD Students*, 714-715. https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/96400 [in Ukrainian].
11. Sokolov, V. M., Gorbenko, V. V., Vinnik, I. A., & Mekhed, O. M. (2006). Processing the Ni- And Cr-bearing oxidized scarfing granulates with liquid cast iron. *TMS Fall Extraction and Processing Division: Sohn International Symposium*, (1), 453-462.
12. Soldatkina, L. M. (2012). Khimichna termodynamika v skhemakh, tablytsiakh, formulakh, rysunkakh [Chemical thermodynamics in diagrams, tables, formulas, figures]. Odesa National University [in Ukrainian].
13. Panteykov, S. P. (2026). Termodynamichnyi analiz protsesiv vidnovlennia zaliza z viustytu tverdym vuhletsem [Thermodynamic analysis of the processes of iron reduction from wüstite with solid carbon]. *Science, Technology and Global Challenges: Proceedings of 7-th International Scientific and Practical Conference*, 203-212 [in Ukrainian].

14. Dzyuzyura, R. O., & Seliverstova, T. V. (2018). Rozrobka PZ dlia vyznachennia enerhii Hibbsa ta doslidzhennia termodynamiky reaktsii vidnovlennia khromu [Development of software for determining the Gibbs energy and studying the thermodynamics of chromium reduction reactions]. *Young Scientist, 5*(57), 369-372 [in Ukrainian].

15. Okhotsky, V. B., Kostyolov, O. L., Symonov, V. K., Kovalyov, D. A., & Taranov, A. K. (1997). Teoriia metalurhiinykh protsesiv [Theory of metallurgical processes]. IZMN [in Ukrainian].

16. Mezentsev, S. M., Ponomarenko, O. I., Mezentseva, I. O., & Yevtushenko N. S. (2024). Shliakhy otrymannia ferosplaviv iz vidkhodiv mashynobudivnykh pidpryiemstv [Ways of obtaining ferroalloys from waste of machine-building enterprises]. *Foundry. Metallurgy*. 2024, 160-162. https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/78067 [in Ukrainian].

Надійшла/Received 23.04.2026

Прийнята/Accepted 22.05.2026

Опублікована/Published 29.05.2026

S.M. Mezentsev, Graduate Student of the Department of Foundry, e-mail: Serhii.Mezentsev@mit.khpi.edu.ua, https://orcid.org/0009-0004-4914-6614
O.I. Ponomarenko, Dr. Sci. (Engin.), Professor, Head of the Department of Foundry, e-mail: 21ponomarenko@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-3043-4497
I.O. Mezentseva, PhD (Engin.), Associate Professor, Professor of the Department of Occupational and Environmental Safety, e-mail: mezencevairen@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-7695-7982
N.S. Yevtushenko, PhD (Engin.), Associate Professor, Professor of the Department of Occupational and Environmental Safety, e-mail: natalya0899@ukr.net, https://orcid.org/0000-0003-0217-3450

National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute" (Kharkiv, Ukraine)

Obtaining Complex Alloying Additives by Metallurgical Method from Engineering Waste

Summary

The paper presents a detailed analysis of solid oxidized waste formed after electroerosion processing of nickel alloy parts. The main types (electrospark, electro-pulse, electrocontact and anodic-mechanical) and characteristics of electroerosion processing are considered. It is indicated that all types of electroerosion processing of metals are based on the use of the phenomenon of electrical erosion.

The chemical and phase composition of the waste is shown. X-ray fluorescence analysis of the waste showed that the waste contains such non-ferrous metals as nickel, chromium, molybdenum, aluminum, tungsten and titanium. Electron microscopic and petrographic studies have allowed us to establish that the waste consists of two phases: metallic and oxide. For the most complete extraction of metals from the waste, a high-temperature reduction process is proposed.

Thermodynamic calculations were performed, based on which it was determined that the greatest probability of reduction of metal oxides occurs with solid carbon. It was described that the process of reduction with solid carbon proceeds with the formation of not only pure metals, but also metal carbides. The justification for the formation of metal carbides along with pure metals during the reduction process was provided. The temperatures of the beginning of reduction of metal oxides with carbon were determined based on the chemical affinity of the metal being reduced and solid carbon to oxygen.

It was proposed to conduct a fractional factorial experiment with variable parameters. The temperature and time of the reduction process, the amount of reducing agent and the thickness of the waste layer were selected as variable parameters. The proposed mechanism of metal base formation at different values of the initial parameters is considered. Conclusions were presented regarding the need to process solid waste from electrical discharge machining.

Keywords

Waste, reduction process, metal oxides, solid carbon, thermodynamic calculations, alloying additives.