

УДК 628.4

Dmitry N. Samchenko¹, PhD, Senior Researcher
ORCID ID: 0000-0003-3305-8180 *e-mail*: sama30071988@gmail.com

Gennadii M. Kochetov¹, D. S. (Engineering), Professor
ORCID ID: 0000-0003-0041-7335 *e-mail*: gkochetov@gmail.com

Aleksey Vasiliev², Dr., Professor
ORCID ID: 0000-0003-2687-0672 *e-mail*: vasiliev@etsu.edu

Dmitry A. Derecha³, PhD, Senior Researcher
ORCID ID: 0000-0002-2442-3759 *e-mail*: dderecha@gmail.com

Yurii B. Skirta^{3,4}, PhD, Senior Researcher
ORCID ID: 0000-0002-6881-2983 *e-mail*: skirtayuri@ukr.net

Oles V. Lastivka¹, PhD, Associate Professor
ORCID ID: 0000-0002-3670-0020 *e-mail*: oles.lastivka@gmail.com

¹ Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine

² East Tennessee State University, Johnson City, USA

³ Institute of Magnetism, Kyiv, Ukraine

⁴ National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine

ENERGY-SAVING TECHNOLOGY FOR PROCESSING OF EXHAUSTED ETCHING SOLUTIONS WITH OBTAINING OF FERROMAGNETIC COMPOUNDS

***Abstract.** Exhausted etching solutions are the waste of industrial enterprises and contain toxic pollutants that have a detrimental effect on the environment. Currently, the processing of these solutions to obtain marketable products is important. The paper presents the results of research on the application of the ferritization method for processing of exhausted etching solutions of steel surfaces. Energy-saving activation of the process by alternating magnetic fields was used, which has undeniable advantages compared to traditional thermal activation. The influence of the initial concentration of iron ions in the reaction mixture of ferritization process and the methods of its activation on the treatment quality of exhausted etching solutions was studied. It was established that the best degree of extraction of heavy metal ions from exhausted etching solutions by ferritization is achieved when the reaction mixture is activated by alternating magnetic fields at an initial concentration of iron ions of 6.6 g/dm³. At the same time, the residual concentration of iron ions in purified solutions does not exceed 0.03 mg/dm³, that corresponds to degree of purification of solutions of 99.999%. Those solutions can be reused in situ. The qualitative and quantitative composition of ferritization sediments was studied. Phases of ferroxycite δ -FeOOH, magnetite Fe₃O₄ and maghemite γ -Fe₂O₃ were detected by X-ray phase analysis in the sediments. It was established that at the initial concentration of iron ions of 26.6 g/dm³ with thermal activation of the reaction mixture and 16.6 g/dm³ with alternating magnetic fields activation, the sediment exclusively contains the magnetite phase. The results of the study indicate the possibility of further use of sediments for the production of*

© Д.М. Самченко, Г.М. Кочетов, О. Васильєв, Д.О. Дереча, Ю.Б. Скірта, О.В. Ластівка, 2022

important industrial products and materials containing ferromagnetic compounds. The implamitation of improved ferritization process in industrial enterprises will allow to achieve decrease of energy consumption compared to known technologies of exhausted etching solutions processing.

Keywords: *exhausted etching solutions; waste processing; ferritization; alternating magnetic fields; magnetite*

Д.М. Самченко¹, Г.М. Кочетов¹, О. Васильєв², Д.О. Дереча³,
Ю.Б. Скірта^{3,4}, О.В. Ластівка¹

¹ Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна

² Державний університет Східного Теннессі, США

³ Інститут магнетизму, м. Київ, Україна

⁴ Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна

ЕНЕРГООЩАДНА ТЕХНОЛОГІЯ ПЕРЕРОБКИ ВІДПРАЦЬОВАНИХ ТРАВІЛЬНИХ РОЗЧИНІВ З ОДЕРЖАННЯМ ФЕРОМАГНІТНИХ СПОЛУК

Анотація. Відпрацьовані травільні розчини – відходи промислових підприємств – містять токсичні забруднення, які згубно впливають на довкілля. Наразі важливою є переробка цих розчинів з отриманням товарних продуктів. В роботі представлені результати досліджень із застосування методу феритизації для переробки відпрацьованих травільних розчинів сталевих поверхонь. Використовувалась енергоощадна активація процесу змінними магнітними полями, яка має беззаперечні переваги в порівнянні з традиційною термічною активацією. Вивчено вплив вихідної концентрації іонів феруму в реакційній суміші процесу феритизації та способів його активації на якість очищення травільного розчину. Встановлено, що найкращий ступінь вилучення іонів важких металів з травільних розчинів феритизацією досягається при застосуванні активації реакційної суміші змінними магнітними полями при вихідній концентрації іонів феруму $6,6 \text{ г/дм}^3$. При цьому залишкова концентрація іонів феруму в очищених розчинах не перевищує $0,03 \text{ мг/дм}^3$, що відповідає ступеню очищення розчинів $99,999\%$. Такі розчини можна повторно використовувати на виробництві. Досліджено якісний і кількісний склад осадів феритизації травільних розчинів. Методом рентгенофазового аналізу в осадах виявлені фази фероксигіту $\delta\text{-FeOOH}$, магнетиту Fe_3O_4 та маггеміту $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$. Встановлено, що при вихідній концентрації іонів феруму $26,6 \text{ г/дм}^3$ і термічній активації реакційної суміші, а також $16,6 \text{ г/дм}^3$ і активації змінними магнітними полями осад містить виключно фазу магнетиту. Результати дослідження свідчать про можливість подальшого використання осадів для виготовлення важливих промислових виробів і матеріалів з вмістом феромагнітних сполук. Використання удосконаленого феритизаційного процесу на виробництві дозволить досягнути менших енерговитрат в порівнянні з відомими технологіями переробки відпрацьованих розчинів.

Ключові слова: *травільні розчини; переробка відходів; феритизація; змінні магнітні поля; магнетит*

DOI: <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2022.3.22-34>

Вступ

В цей час особлива увага приділяється заходам з переробки та знешкодження рідких феровмісних відходів гальванічних, металургійних і хімічних виробництв з отриманням товарних продуктів. Щорічно на промислових підприємствах Східної Європи утворюється сотні мільйонів тонн токсичних відпрацьованих висококонцентрованих травильних розчинів, які підлягають знешкодженню та переробці [1]. Такі заходи дозволять вирішити одночасно дві проблеми: екологічну – утилізацію відходів і сировинну – для виробництва цінних матеріалів. До феровмісних відходів можна віднести відпрацьовані сірчаноокислотні розчини травлення сталевих поверхонь, які практично не утилізуються на виробництві. Це призводить до їх накопичення та завдає значної шкоди навколишньому середовищу. В результаті із недостатньо очищеними промисловими стічними водами у водні об'єкти щороку потрапляють тисячі тонн токсичних сполук, які містять іони феруму та інших важких металів. Таким чином, в результаті травлення сталі із стічними водами безповоротно втрачається значна кількість цих сполук. Іони феруму володіють високою міграційною рухомістю та здатністю акумулюватися в живому організмі та викликати різноманітні фізіологічні порушення, в тому числі на генетичному рівні [2]. Надлишок солей феруму в живому організмі може призводити до гострих кишкових отруєнь з нудотою та погіршенням роботи імунної системи [3]. Крім того, солі важких металів перешкоджають біологічному самоочищенню водоймищ, що пов'язано з порушенням біологічної рівноваги мікроелементів і кисневого режиму водойми [4]. Екологічна небезпека відпрацьованих травильних розчинів показана в табл. 1.

Таблиця 1 – Інтервали значення екологічної небезпеки травильних розчинів

Найменування технологічного процесу травлення	Інтервал значення екологічної небезпеки технологічних розчинів
Сталевих сплавів	$0,2 \cdot 10^3 \div 11 \cdot 10^6$
Корозійно-стійких сплавів	$0,3 \cdot 10^3 \div 1 \cdot 10^6$
Хромистих та хромнікелевих сплавів	$8 \cdot 10^3 \div 70 \cdot 10^6$
Алюмінію і його сплавів	$0,1 \cdot 10^3 \div 3 \cdot 10^6$
Міді і її сплавів	$1,5 \cdot 10^3 \div 27 \cdot 10^6$

Тому постає завдання розробки ефективних методів очистки цих токсичних стічних вод, що містять сполуки феруму. Повторне використання вилучених із травильних розчинів матеріалів дозволить підприємству знизити плату за зберігання небезпечних відходів, отримати додаткову економічну вигоду від реалізації нової продукції та знизити навантаження на екосистему. Актуальними є дослідження, спрямовані на отримання високоякісної сировини з промислових стічних вод, які містять іони феруму, з раціональним використанням води, сировини та енергії в системі промислового виробництва.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Аналіз робіт вчених з переробки феро-місних стічних вод показав актуальність і доцільність досліджень в напрямку отримання матеріалів з нанорозмірною структурою. Особливу зацікавленість представляють магнітні наночастинки полівалентних оксидів феруму [5]. Вони використовуються в біотехнології [6], при виготовленні магнітних носіїв [7], датчиків [8], сорбентів [9], колоїдних допоміжних речовин лікарських засобів [10], каталізаторів [11], скла [12], пігментів [13], будівельних матеріалів [14, 15] тощо.

Існують два основних напрямки переробки відпрацьованих розчинів травлення сталевих поверхонь: регенерація цих розчинів та вилучення іонів феруму у вигляді твердофазних хімічно стійких сполук [16, 17]. Одним із перспективних методів регенерації відпрацьованих травильних розчинів є метод гідрофазної феритизації [18]. Суть цього методу полягає у створенні у відпрацьованих сірчаноокислотних травильних розчинах умов, які сприяють швидкому формуванню дисперсних речовин з магнітними властивостями. Суттєвим недоліком гідрофазної феритизації є тривале нагрівання значних об'ємів вихідних розчинів при температурі вище 75 °С. У роботі [19] показано, що альтернативою термічній гідрофазній феритизації є активація процесу змінними магнітними полями (ЗМП) при кімнатній температурі. В цих дослідженнях [19] отримувалися феромагнітні наночастинки різного фазового складу, в структурі яких містяться іони нікелю, цинку та міді.

Перебіг процесу гідрофазної феритизації залежить від наступних факторів, що визначають тип первинних зародкових феро-місних структур, їх подальше формування та розвиток з утворенням стійких сполук: вихідна концентрація іонів важких металів [20], значення рН [21], температура [22], тривалість процесу [23], витрати окисника [24] та спосіб активації реакційної суміші [25]. Крім того, перераховані вище фактори впливають або на стійкість тієї чи іншої модифікації моногідратів та оксидів важких металів в цих умовах, або ініціюють їх трансформацію в інші більш стійкі сполуки в лужному середовищі [26].

Мета цієї роботи полягає в тому, щоби визначити вплив вихідної концентрації іонів феруму в реакційній суміші процесу феритизації та способів його активації на ступінь вилучення цих іонів з відпрацьованих травильних розчинів, а також на структуру отриманих осадів.

Методика дослідження

В роботі досліджувалась переробка методом феритизації відпрацьованого сірчаноокислотного розчину травлення сталевих поверхонь, який отримано на одному з промислових підприємств м. Києва. Концентрація основних хімічних сполук у цьому розчині, який має величину рН = 1,41: FeSO_4 – 126,5, H_2SO_4 – 21,0 г/дм³. Процес феритизації проводився при вихідних концентраціях іонів феруму в розчині, що змінювались в межах 6,6 ÷ 46,6 г/дм³. Для досягнення необхідних нам значень концентрацій травильний розчин розбавлявся водопровідною водою. Коригування величини рН провадили 25% розчином гідроксиду натрію до значення 11,5. Тривалість проведення процесу феритизації становила 15 хв. Часткове окислення Fe^{2+} в Fe^{3+} здійснювалось аерацією реакційної суміші киснем повітря зі швидкістю 0,15 м³/год.

Досліджувався процес феритизаційної переробки відпрацьованих травильних розчинів з отриманням кристалічних феро-вімісних сполук, як з традиційною термічною активацією реакційної суміші при температурі 75 °С [19], так і з активацією реакційної суміші в змінному магнітному полі при кімнатній температурі [25]. В експериментах використовувався реактор з робочим об'ємом 1 дм³. Для створення змінного магнітного поля було розроблено керований генератор прямокутних імпульсів на основі плати мікроконтролера ATmega328p. Вихідна напруга імпульсів на 8 цифрових виходах плати контролера становила 5 В, максимальний струм – 20 мА.

Зміна амплітуди магнітної індукції величиною 0,1 Тл в робочій зоні установки проводилася блоком живлення UTP3305C через інтерфейс RS-232. Сталими були також інші параметри генерації змінного магнітного поля: частота імпульсів 1 Гц, період між імпульсами 100 мс, тривалість імпульсу 1000 мс.

Концентрацію іонів феруму відпрацьованого травильного розчину визначали на спектрофотометрі DR3900 (Hach, США). Величина рН реакційної суміші в процесі феритизації визначалась на рН-метрі PL-700AL (Польща).

Осад феритизаційної переробки травильного розчину зневоднювався протягом 2 хв на центрифугі СМ-5 (Micromed, Україна) з фактором розділення 3600 та висушувався при температурі 105 °С протягом доби в електросушильній шафі СНОЛ 67/350 (Україна).

Фазовий аналіз порошку висушених осадів здійснювався методом рентгенівської дифракції на дифрактометрі Ultima IV (Rigaku, Японія) з використанням Cu-K α випромінювання. Зйомка проводилась в інтервалі кутів 2 θ від 6 до 65° з кроком сканування 0,05° та часом експозиції в точці 2 с.

Для вивчення мікроструктури зразків осадів використовували скануючий електронний мікроскоп-аналізатор РЕММА-101А (SELMI, Україна).

Результати дослідження

Результати дослідження впливу одного з ключових параметрів процесу феритизації травильних розчинів, а саме, вихідної концентрації іонів феруму на ступінь вилучення цих іонів показано в таблицях 2 та 3. Отримані дані феритизації з використанням ЗМП активації порівнювали з відповідними для традиційної термічної. Як видно з табл. 2, залишкові концентрації іонів Fe²⁺, Fe³⁺ в розчині після феритизації з термічною активацією знаходяться в межах 0,26–2,20 мг/дм³. При використанні ЗМП активації реакційної суміші відповідні значення концентрацій становлять 0,03–2,80 мг/дм³ (табл. 3). Слід відмітити, що при феритизації з ЗМП активацією розчину залишковий вміст іонів феруму має більші значення в порівнянні з термічною активацією при вихідній концентрації реакційної суміші ≥ 20 г/дм³. Очевидно, це обумовлено тим, що при високих вихідних концентраціях феруму в реакційній суміші електромагнітних розрядів із вивчаємими характеристиками недостатньо для формування щільної шпінельної кристалічної структури феритів. В процесі феритизації спостерігається часткове утворення в дисперсійному середовищі проміжних нестійких твердофазних сполук моногідратів важких металів.

В результаті дослідження встановлено, що процес феритизації забезпечує високий ступінь вилучення іонів феруму в екологічно безпечні нерозчинні

сполуки. Він сягає значень більш ніж 99,992%. Таким чином, найкращі умови проведення процесу досягаються при вихідній концентрації іонів феруму 6,6 г/дм³ із ЗМП активацією. При цьому залишкові концентрації іонів феруму мають значення менш ніж 0,03 мг/дм³. Очевидно, це обумовлено тим, що така вихідна концентрація іонів важких металів в реакційній суміші феритизації сприяє утворенню переважно стійких феромагнітних частинок [27].

Таблиця 2 – Вилучення іонів феруму з відпрацьованих травильних розчинів феритизацією з термічною активацією

№ серії дослідів	Концентрація іонів феруму, мг/дм ³		Ступінь вилучення (α), %
	реакційна суміш	розчин після феритизації	
1	46 600	2,20	99,995
2	36 600	2,01	99,994
3	26 600	1,63	99,993
4	16 600	0,84	99,994
5	6600	0,26	99,996

Таблиця 3 – Вилучення іонів феруму з відпрацьованих травильних розчинів феритизацією з активацією змінними магнітними полями

№ серії дослідів	Концентрація іонів феруму, мг/дм ³		Ступінь вилучення (α), %
	реакційна суміш	розчин після феритизації	
1	46 600	2,80	99,993
2	36 600	2,62	99,992
3	26 600	2,04	99,992
4	16 600	0,78	99,995
5	6600	0,03	99,999

Слід зазначити, що при вихідній концентрації іонів феруму 6,6 г/дм³ очищену воду після феритизації при застосуванні обох способів активації можна повторно використовувати на виробництві в промивних операціях, оскільки вона задовольняє діючим вимогам до вмісту в ній іонів феруму (менш ніж 0,3 мг/дм³). Крім того, при феритизації з ЗМП активацією досягається ефективність вилучення іонів феруму, що відповідає вимогам води 2 категорії для гальванічного виробництва. Така вода може застосовуватись як в промивних операціях, так і для приготування технологічних розчинів (ГДК іонів феруму – 0,1 мг/дм³).

Результати структурних досліджень осадів (табл. 4 та рис. 1, 2) добре узгоджуються з даними хімічного аналізу розчинів після процесу феритизації (табл. 2, 3), що дає можливість більш повно зрозуміти процеси, які відбуваються при перебігу феритизації. При досліджених способах активації реакційної суміші та вихідних концентраціях іонів феруму формується дисперсна чорна суспензія, яка в подальшому кристалізується з утворенням, головним чином, щільних феромагнітних структур. Проведений

рентгенофазовий аналіз зразків осадів переробки відпрацьованих травильних розчинів феритизацією (табл. 4) показує, що кількісний фазовий склад осаду значною мірою залежить від вихідної концентрації іонів металу та способу активації реакційної суміші.

Таблиця 4 – Фазовий склад осадів феритизації

Вихідна концентрація іонів феруму в розчині, г/дм ³	Фазовий склад осадів, %					
	Термічна активація			ЗМП активація		
	δ -FeOOH	Fe ₃ O ₄	γ -Fe ₂ O ₃	δ -FeOOH	Fe ₃ O ₄	γ -Fe ₂ O ₃
46,6	29,2	70,8	–	55,8	44,2	–
36,6	14,1	85,9	–	35,5	4,5	–
26,6	–	100	–	10,9	89,1	–
16,6	–	81,1	18,9	–	100	–
6,6	–	–	100	–	50,8	49,2

В результаті дослідження фазового складу зразків осадів (табл. 4) ідентифіковано феромагнітні фази фероксигіту – δ -FeOOH, магнетиту Fe₃O₄ та маггеміту γ -Fe₂O₃ з параметрами решітки 2,95; 8,36 і 8,34 Å, відповідно. Слід відмітити, що при ЗМП активації з вихідною концентрацією феруму 46,6 г/дм³ в реакційній суміші в осаді містяться твердофазні проміжні продукти, зокрема фероксигіт із значною масовою часткою цієї фази більш ніж 50%. Це, вірогідно, обумовлено низьким ступенем кристалічності структури. Крім того, для формування в дисперсному середовищі магнетита при термічній активації необхідна вихідна концентрація іонів феруму в реакційній суміші 26,6 г/дм³. Для ЗМП активації концентрація іонів феруму, при якій утворюється виключно фаза магнетиту, складає 16,6 мг/дм³. Кінцевими продуктами процесу фазоутворення при вихідній концентрації іонів феруму 6,6 г/дм³ є фази маггеміту (100%) з термічною активацією та магнетиту (50,8%) та магнетиту (49,2%) з ЗМП активацією.

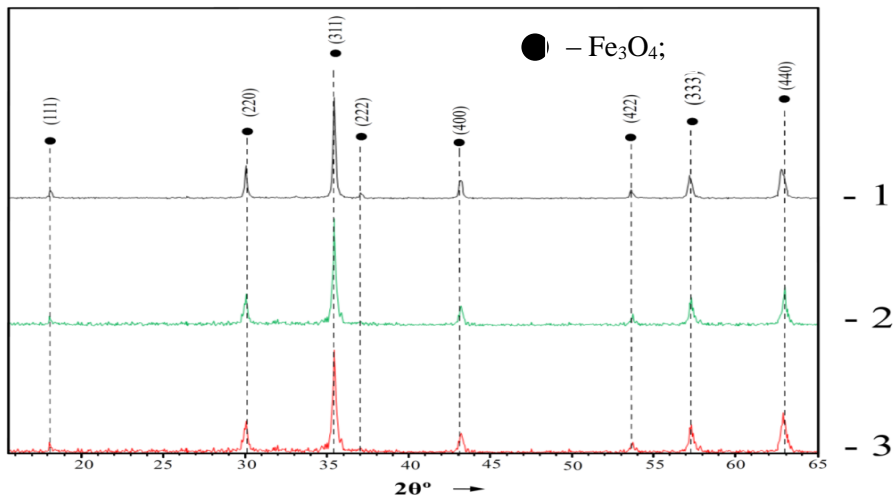


Рис. 1. Рентгенограми зразків магнетиту: 1 – кваліфікації «ч» та осадів феритизації; 2 – ЗМП, 3 – термічна активація

В результаті аналізу фазового складу досліджених зразків осадів (табл. 4) були визначено зразки, які мають виключно фазу магнетиту. Це зразки з вихідною концентрацією іонів феруму в розчині 26,6 і 16,6 г/дм³ для феритизації з термічною і ЗМП активацією, відповідно. Порівняння дифрактограм цих зразків із магнетитом кваліфікації «ч» свідчать про те, що вони ідентичні за структурними параметрами (рис. 1).

Дані фазового аналізу зразка осаду (рис. 1) добре корелюють з результатами скануючої електронної мікроскопії зразка, який отримано в результаті феритизації із ЗМП активацією (рис. 2).

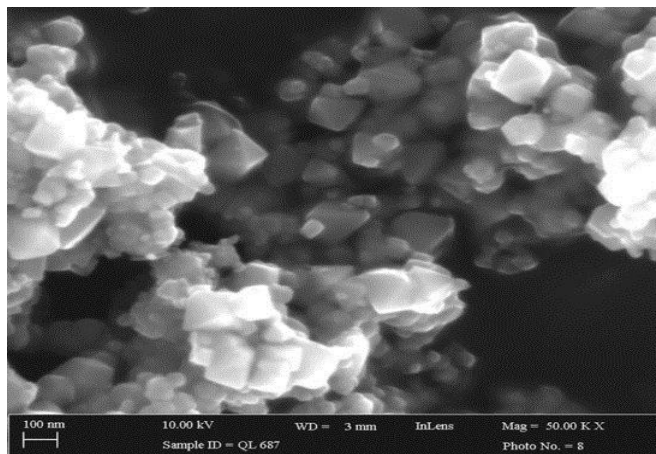


Рис. 2. Мікрофотографія зразка осаду магнетиту, отриманого ЗМП активацією процесу феритизації

Цей мікропористий зразок містить кристали магнетиту неправильної кубічної форми, які розміщені хаотично. Така структура забезпечує високу сорбційну здатність цих матеріалів як до іонів важких металів, так і до органічних речовин.

Висновки та перспективи подальших досліджень

В результаті проведених досліджень визначено вплив вихідної концентрації іонів феруму в реакційній суміші для переробки відпрацьованих травильних розчинів феритизацією та способів її активації на ступінь вилучення цих іонів з розчину та структурний склад отриманих осадів. Встановлено, що найкращий ступінь вилучення іонів важких металів з травильних розчинів феритизацією досягається при застосуванні її активації змінними магнітними полями при вихідній концентрації іонів феруму 6,6 г/дм³. При цьому залишкова концентрація іонів феруму не перевищує 0,03 мг/дм³, що відповідає ступеню очищення розчинів 99,999% та дає змогу їх повторного використання на гальванічному виробництві згідно з нормами діючих стандартів щодо іонів феруму.

На основі даних рентгенофазового аналізу визначено якісний і кількісний склад осадів, які отримані в результаті феритизаційної переробки відпрацьованих травильних розчинів при різних значеннях вихідної концентрації іонів феруму в реакційній суміші та способах активації процесу.

Фазовий аналіз зразків осадів виявив присутність у структурі ферумвмісних сполук δ -FeOОН, Fe₃O₄ та γ -Fe₂O₃. Визначено значення вихідних концентрацій іонів феруму в розчині феритизації, при яких досягається формування в однофазних осадах магнетиту: 26,6 і 16,6 г/дм³ з термічною і ЗМП активацією, відповідно.

Результати цієї роботи свідчать про те, що ЗМП активація в порівнянні з термічною уповільнює перебіг процесу трансформації проміжних феровмісних фаз в більш стійкі феритні сполуки. Проте використання ЗМП активації суттєво впливає на техніко-економічні показники отримання феромагнітних сполук за рахунок значної енергоощадності ініціювання реакції феритоутворення. Цей спосіб активації дає можливість більш ніж на 60% зменшити витрати електроенергії в порівнянні з традиційною термічною, а отже, зробити цю технологію інвестиційно привабливою. Крім того, така енергоощадна активація процесу при дотриманні певних технологічних параметрів феритизації сприяє утворенню осаду цінної феромагнітної фази магнетиту.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Обращение с отходами / Челноков А.А., Ющенко Л.Ф., Жмиков И.Н., Юращик К.К. // Высшая школа, 2018. С. 457.
2. A study of different strategical views into heavy metal(oid) removal in the environment / Ramezani M., Enayati M., Ghorbani A. // Arabian Journal of Geosciences. 2021 Vol. 14(21), 2225. URL: <https://doi.org/10.1007/s12517-021-08572-4>.
3. Тугай А.М., Кочетова Г.М., Самченко Д.М. Вивчення стійкості відходів очищення стічних вод, які містять сполуки міді // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідраліки, 2012. Вип. 20, С. 66–70.
4. Clean & environmentally friendly regeneration of Fe-surface cleaning pickling solutions / Liu Q., Pan D., Ding T., Ye M., He F. // Green Chemistry. 2020. Vol. 22(24). С. 8728–8733. URL: <https://doi.org/10.1039/d0gc03297b>.
5. Chen Y., Hou S. Application of magnetic nanoparticles in cell therapy // Stem Cell Research and Therapy. 2022. Vol. 13(1), 135. URL: <https://doi.org/10.1186/s13287-022-02808-0>.
6. Immobilized peptide-N-glycosidase F onto magnetic nanoparticles: A biotechnological tool for protein deglycosylation under native conditions / Bidondo L., Festari F., Freire T., Giacomini C. // Biotechnology and Applied Biochemistry. 2022. Vol. 69(1), С. 209–220. URL: <https://doi.org/10.1002/bab.2099>.
7. Aslan T.N. Relaxivity properties of magnetoferritin: The iron loading effect // Journal of Bioscience and Bioengineering. 2022. Vol. 133(5), С. 474-480. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jbiosc.2022.01.005>.
8. Microwave-assisted facile synthesis of layered reduced graphene oxide-tungsten disulfide sandwiched Fe₃O₄ nanocomposite as effective and sensitive sensor for detection of dopamine / Rana D.S., Kalia S., Kumar R., (...), Singh D., Singh R.K. // Materials Chemistry and Physics. 2022. Vol. 287, 126283. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2022.126283>.
9. Esmailian A., Dionysiou D.D., O'Shea K.E. Incorporating simultaneous effect of initial concentration and sorbent dose into removal prediction model using glyphosate experimental data and theoretical analysis // Chemical Engineering Journal. 2022. Vol. 445, 136667. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.136667>.
10. Appropriate Size of Fe₃O₄ Nanoparticles for Cancer Therapy by Ferroptosis / Tian X., Ruan L., Zhou S., (...), Zhang X., Shen S. // ACS Applied Bio Materials. 2022. Vol. 5(4), С. 1692-1699. URL: <https://doi.org/10.1021/acsabm.2c00068>.
11. Photothermal catalytic degradation of textile dyes by laccase immobilized on Fe₃O₄@SiO₂ nanoparticles / Zhu Q., Song J., Liu Z., (...), Chen Z., Pang H. // Journal of Colloid and Interface Science. 2022. Vol. 623, С. 992–1001. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2022.05.083>.

12. Anigrahawati P., Sahar M.R., Sazali E.S. Physical, structural and spectroscopic analysis of tellurite glass containing natural magnetite Fe_3O_4 nanoparticles // *Materials Chemistry and Physics*. 2022. Vol. 286, 126183. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2022.126183>.
13. Pfaff G. Iron oxide pigments // *Physical Sciences Reviews*. 2021. Vol. 6(10), C. 535–548. URL: <https://doi.org/10.1515/psr-2020-0179>.
14. Study of the stability of industrial wastewater treatment waste in alkaline cements / Kolodko A., Kochetov G., Samchenko D., Pasko A. // *Problems of water supply, sewerage and hydraulic*, 2016. Vol. 28, P. 180–186.
15. Kovalchuk O., Kochetov G., Samchenko D. Study of service properties of alkali-activated cement using wastewater treatment residues // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019. Vol. 708, Is. 1, 012087.
16. Reis M.T.A., Ismael M.R.C. Electroplating wastes // *Physical Sciences Reviews*. 2019. Vol. 3(6). 20180024. URL: <https://doi.org/10.1515/psr-2018-0024>.
17. Reuse of Waste Pickling Acid for the Production of Hydrochloric Acid Solution, Iron(II) Chloride and Magnetic Iron Oxide: An Eco-Friendly Process / Cunha T.N.D., Trindade D.G., Canesin M.M., Costa Junior I.L., Bail A. // *Waste and Biomass Valorization*. 2021. Vol. 12(3), C. 1517–1528. URL: <https://doi.org/10.1007/s12649-020-01079-1>.
18. Кочетов Г.М., Науменко І.В., Самченко Д.М. Феритизаційна переробка відпрацьованих технологічних розчинів, що містять сполуки цинку та нікелю // *Проблеми водопостачання та гідраліки*, 2014. Вип. 24, С. 59–66.
19. Кочетов Г.М., Самченко Д.М. Удосконалення феритизаційної технології переробки стічних вод: електромагнітна імпульсна активація процесу // *Водопостачання та водовідведення*, 2015. Вип. 3, С. 20–26.
20. The extraction of chromium (III) from concentrated solutions by ferrite method / Frolova L. A., Pivovarov A. A., Anisimova L. B., Yakubovskaya Z. N., Yakubovskii A. I. // *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*, 2017. Vol. 6, P. 110–115.
21. The two-step neutralization ferrite-formation process for sustainable acid mine drainage treatment: Removal of copper, zinc and arsenic, and the influence of coexisting ions on ferritization / Igarashi T., Herrera P. S., Uchiyama H., Hashimoto K., Tabelin C. B. // *Science of the Total Environment*, 2020. Vol. 715, 136877.
22. Evolution of microstructure and mechanical properties of Cr ferrite/martensite steels with different Si content after long-term aging at 550 °C / Zhang Y., He H., Wang H., Chen G., An X., Wang Y. // *Journal of Alloys and Compounds*, 2021. Vol. 873, 159817.
23. Recovery of Ag and Au from synthetic and industrial wastewater by 2-step ferritization and Lt-delafoosite process via precipitation / John M., Heuss-Assbichler S., Tandon K., Ullrich A. // *Journal of Water Process Engineering*, 2019. Vol. 30, 100532.
24. Ємчура Б.М., Кочетов Г.М., Самченко Д.М. Феритна очистка стічних вод від іонів цинку: вплив швидкості аерації // *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідраліки*, 2018. Вип. 30, С. 14–22.
25. Kochetov G., Prihna T., Kovalchuk O., Samchenko D. Research of the treatment of depleted nickel-plating electrolytes by the ferritization method // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2018. Vol. 3 (6–93), C. 52–60.
26. Structure, magnetic and microwave absorption properties of NiZnMn ferrite ceramics / Zhou X., Wang J., Zhou L., Wang Y., Yao D. // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2021. Vol. 534, 168043.
27. Kochetov G., Kovalchuk O., Samchenko D. Development of technology of utilization of products of ferritization processing of galvanic waste in the composition of alkaline cements // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2020. Vol. 5/10 (107), P. 6–13.

Стаття надійшла до редакції 08.06.2022 і прийнята до друку після рецензування 31.08.2022

REFERENCES

1. Chelnokov, A.A., Jushhenko, L.F., Zhmikov, I.N., & Jurashhik, K.K. (2018). Waste management. Kyiv: Vyshcha shkola [in Russian].
2. Ramezani, M., Enayati, M., & Ghorbani, A. (2021). A study of different strategical views into heavy metal(oid) removal in the environment. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(21), 2225. URL: <https://doi.org/10.1007/s12517-021-08572-4>.
3. Tuhai, A.M., Kochetova, H.M., & Samchenko, D.M. (2012). Study of the stability of waste water treatment containing copper compounds. *Problems of water supply, sewerage and hydraulic*, 20, 66-70 [in Ukrainian].
4. Liu, Q., Pan, D., Ding, T., Ye, M., & He, F. (2020). Clean & environmentally friendly regeneration of Fe-surface cleaning pickling solutions. *Green Chemistry*, 22(24), 8728-8733. URL: <https://doi.org/10.1039/d0gc03297b>.
5. Chen, Y., & Hou, S. (2022). Application of magnetic nanoparticles in cell therapy. *Stem Cell Research and Therapy*, 13(1), 135. URL: <https://doi.org/10.1186/s13287-022-02808-0>.
6. Bidondo, L., Festari, F., Freire, T., & Giacomini, C. (2022). Immobilized peptide-N-glycosidase F onto magnetic nanoparticles: A biotechnological tool for protein deglycosylation under native conditions. *Biotechnology and Applied Biochemistry*, 69(1), 209-220. URL: <https://doi.org/10.1002/bab.2099>.
7. Aslan, T.N. (2022). Relaxivity properties of magnetoferritin: The iron loading effect. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 133(5), 474-480. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jbiosc.2022.01.005>.
8. Rana, D.S., Kalia, S., Kumar, R., (...), Singh, D., & Singh, R.K. (2022). Microwave-assisted facile synthesis of layered reduced graphene oxide-tungsten disulfide sandwiched Fe₃O₄ nanocomposite as effective and sensitive sensor for detection of dopamine. *Materials Chemistry and Physics*, 287, 126283. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2022.126283>.
9. Esmaeilian, A., Dionysiou, D.D., & O'Shea, K.E. (2022). Incorporating simultaneous effect of initial concentration and sorbent dose into removal prediction model using glyphosate experimental data and theoretical analysis. *Chemical Engineering Journal*, 445, 136667. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.136667>.
10. Tian, X., Ruan, L., Zhou, S., (...), Zhang, X., & Shen, S. (2022). Appropriate Size of Fe₃O₄ Nanoparticles for Cancer Therapy by Ferroptosis. *ACS Applied Bio Materials*, 5(4), 1692-1699. URL: <https://doi.org/10.1021/acsabm.2c00068>.
11. Zhu, Q., Song, J., Liu, Z., (...), Chen, Z., & Pang, H. (2022). Photothermal catalytic degradation of textile dyes by laccase immobilized on Fe₃O₄@SiO₂ nanoparticles. *Journal of Colloid and Interface Science*, 623, 992-1001. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2022.05.083>.
12. Anigrahawati, P., Sahar, M.R., & Sazali, E.S. (2022). Physical, structural and spectroscopic analysis of tellurite glass containing natural magnetite Fe₃O₄ nanoparticles. *Materials Chemistry and Physics*, 286, 126183. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2022.126183>.
13. Pfaff, G. (2021). Iron oxide pigments. *Physical Sciences Reviews*, 6(10), 535-548. URL: <https://doi.org/10.1515/psr-2020-0179>.
14. Kolodko, A., Kochetov, G., Samchenko, D., & Pasko, A. (2016). Study of the stability of industrial wastewater treatment waste in alkaline cements. *Problems of water supply, sewerage and hydraulic*, 28, 180-186.
15. Kovalchuk, O., Kochetov, G., & Samchenko, D. (2019). Study of service properties of alkali-activated cement using wastewater treatment residues. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 708, 1, 012087.
16. Reis, M.T.A., & Ismael, M.R.C. Electroplating wastes (2019). *Physical Sciences Reviews*, 3(6), 20180024. URL: <https://doi.org/10.1515/psr-2018-0024>.

17. Cunha, T.N.D., Trindade, D.G., Canesin, M.M., Costa Junior, I.L., & Bail, A. (2021). Reuse of Waste Pickling Acid for the Production of Hydrochloric Acid Solution, Iron(II) Chloride and Magnetic Iron Oxide: An Eco-Friendly Process. *Waste and Biomass Valorization*, 12(3), 1517-1528. URL: <https://doi.org/10.1007/s12649-020-01079-1>.
18. Kochetov, H.M., Naumenko, I.V., & Samchenko, D.M. (2014). Ferritization processing of spent technological solutions containing zinc and nickel compounds. *Problems of water supply, sewerage and hydraulic*, 24, 59-66 [in Ukrainian].
19. Kochetov, H.M., & Samchenko, D.M. (2015). Improvement of the ferritization technology of wastewater treatment: electromagnetic impulse activation of the process. *Water supply and drainage*, 3, 20-26 [in Ukrainian].
20. Frolova, L.A., Pivovarov, A.A., Anisimova, L.B., Yakubovskaya, Z.N., & Yakubovskii, A.I. (2017). The extraction of chromium (III) from concentrated solutions by ferrite method. *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*, 6, 110-115.
21. Igarashi, T., Herrera, P. S., Uchiyama, H., Hashimoto, K., & Tabelin, C. B. (2020). The two-step neutralization ferrite-formation process for sustainable acid mine drainage treatment: Removal of copper, zinc and arsenic, and the influence of coexisting ions on ferritization. *Science of the Total Environment*, 715, 136877.
22. Zhang, Y., He, H., Wang, H., Chen, G., An, X., & Wang, Y. (2021). Evolution of microstructure and mechanical properties of Cr ferrite/martensite steels with different Si content after long-term aging at 550 °C. *Journal of Alloys and Compounds*, 873, 159817.
23. John, M., Heuss-Assbichler, S., Tandon, K., & Ullrich, A. (2019). Recovery of Ag and Au from synthetic and industrial wastewater by 2-step ferritization and Lt-delafoosite process via precipitation. *Journal of Water Process Engineering*, 30, 100532.
24. Yemchura, B.M., Kochetov, H.M., & Samchenko, D.M. (2018). Ferrite treatment of wastewater from zinc ions: effect of aeration rate. *Problems of water supply, sewerage and hydraulic*, 30, 14-22 [in Ukrainian].
25. Kochetov, G., Prihna, T., Kovalchuk, O., & Samchenko, D. (2018). Research of the treatment of depleted nickel-plating electrolytes by the ferritization method. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(6-93), 52-60.
26. Zhou, X., Wang, J., Zhou, L., Wang, Y., & Yao, D. (2021). Structure, magnetic and microwave absorption properties of NiZnMn ferrite ceramics. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 534, 168043.
27. Kochetov, G., Kovalchuk, O., & Samchenko, D. (2020). Development of technology of utilization of products of ferritization processing of galvanic waste in the composition of alkaline cements. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5/10(107), 6-13.

The article was received 08.06.2022 and was accepted after revision 31.08.2022

Самченко Дмитро Миколайович

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник науково-дослідної частини Київського національного університету будівництва і архітектури
Адреса робоча: 03037 Україна, м. Київ, пр. Повітрофлотський, 31
ORCID ID: 0000-0003-3305-8180 **e-mail:** sama30071988@gmail.com

Кочетов Геннадій Михайлович

доктор технічних наук, професор кафедри хімії Київського національного університету будівництва і архітектури
Адреса робоча: 03037 Україна, м. Київ, пр. Повітрофлотський, 31
ORCID ID: 0000-0003-0041-7335 **e-mail:** gkochetov@gmail.com

Васильєв Олексій

доктор, професор, Державний університет Східного Теннесі
Адреса робоча: PO Box 70695, Johnson City, TN 37614, USA
ORCID ID: 0000-0003-2687-0672 **e-mail:** vasiliev@etsu.edu

Дереча Дмитро Олександрович

кандидат фізико-математичних наук, завідувач лабораторії Інституту магнетизму

Адреса робоча: 03142 Україна, м. Київ, бульв. Акад. Вернадського, 36-б

ORCID ID: 0000-0002-2442-3759 *e-mail:* dderecha@gmail.com

Скирта Юрій Борисович

кандидат фізико-математичних наук, провідний науковий співробітник Інституту магнетизму

Адреса робоча: 03142 Україна, м. Київ, бульв. Акад. Вернадського, 36-б

ORCID ID: 0000-0002-6881-2983 *e-mail:* skirtayuri@ukr.net

Ластівка Олесь Васильович

кандидат технічних наук, доцент кафедри технології будівельних конструкцій, виробів і матеріалів Київського національного університету будівництва і архітектури

Адреса робоча: 03037 Україна, м. Київ, пр. Повітрофлотський, 31

ORCID ID: 0000-0002-3670-0020 *e-mail:* oles.lastivka@gmail.com