

ДОСЛІДЖЕННЯ ВИКОРИСТАННЯ СПОЛУК ОКСИДІВ ЗАЛІЗА У СКЛАДІ ПОРОШКОВИХ ЛАКОФАРБОВИХ МАТЕРІАЛІВ

Розробка нових корозійних захисних покриттів з високою механічною міцністю передбачає використання в складі порошкових красок, як наповнювача сполук оксидів заліза. Основна частка, яка формує вартість отримання цих залізовмісних сполук є використання в процесі синтезу коштовних прекурсорів та енергетичних ресурсів. Тому заміна в процесі синтезу хімічно чистих прекурсорів солей важких металів, наприклад відпрацьованими технологічними розчинами, які утворюються в великих об'ємах на металургійних і гальванічних підприємствах дозволить вирішити цю проблему. Перспективною є переробка цих розчинів з отриманням цінних товарних продуктів. В дослідженнях представлені результати із застосування методу феритизації. Особливістю роботи є використання енергоощадної ультразвукової обробки реакційної суміші. Показані її переваги порівнянні з традиційною термічною активацією. Вивчено вплив різних окиснювачів на проведення процесу феритизації та способів його активації на структурні властивості отриманих осадів. Методом рентгенофазового аналізу в осадах феритизації виявлені фази фероксигіту – $\delta\text{-FeOOH}$ та магнетиту Fe_3O_4 . Встановлено, що при ультразвуковій обробці та використання пероксиду водню в кількості $2,5 \text{ мл/дм}^3$ осад містить виключно фазу магнетиту. Отримані зразки осадів феритизації дозволяють надійно забезпечити високий рівень інкапсулювати іони заліза від навколишнього середовища в кристалічній структурі. Відмічено, що високе значення вигуговування іонів заліза в агресивних навколишніх середовищах має осад, що містить фазу оксегідроксиду заліза та становить в кислому – $5,67 \text{ мг/кг}$, лужному – $0,83 \text{ мг/кг}$. Результати дослідження свідчать про можливість подальшого використання осадів для виготовлення порошкових лакофарбових покриттів з вмістом цих феромагнітних сполук. Використання удосконаленого феритизаційного процесу на виробництві дозволить досягнути менших енерговитрат в порівнянні з відомими технологіями переробки.

Ключові слова: *травильні розчини, переробка відходів, феритизація, ультразвукова обробка, феритні осади, магнетит, порошкові краски, корозійна стійкість.*

Вступ. В теперішній час все більше сполук оксидів заліза використовуються в виробництві будівельних матеріалів та в багатьох інших галузях [1]. Основна сфера споживання на світовому ринку високодисперсних сполук оксидів заліза до

45 % припадає на виробництво лакофарбових матеріалів [2]. Введення їх до складу красок додає матеріалам додаткову міцність і корозійну стійкість.

Отримання порошків оксидів заліза і дослідження їхніх властивостей – один із напрямів сучасної науки і техніки, який активно розвивається. Метод отримання цих сполук відіграє ключову роль у визначенні структури, розмірів, морфології і форми частинок [3]. Одним з важливих факторів, що впливає на масове застосування високодисперсних сполук оксидів заліза в різних високотехнологічних галузях промисловості, є вартість їх отримання. Існує кілька стратегій синтезу цих сполук: механічні, фізичні, хімічні і фізико-хімічні методи [4]. Порівнюючи фізичні та хімічні методи, можна зазначити, що досягти потрібного розміру наночастинок у межах нанометра через фізичні методи досить складно [5]. Крім того, фізичними методами синтезу важко налаштувати розмір та форму частинок [6]. В той час, як хімічні методи дозволяють контролювати розмір і форму частинок за рахунок коригування різних умов реакції [7]. До сучасних методів та засобів отримання високодисперсних сполук оксидів заліза є застосування ультразвуку [8]. Переваги ультразвуку включають рівномірне перемішування, посилений масообмін, здатність впливати на кінетику реакції та функціоналізувати частинки, що робить його особливо ефективним для отримання однорідних частинок оксидів заліза. Ультразвуковий метод добре поєднується в застосуванні з іншими хімічними методами отримання наночастинок, а саме: співосадження, термічного розкладання або гідротермальним [9]. Проте більшість сучасних методів отримання матеріалів потребують використання хімічно чистих прекурсорів [10]. Тому потрібні економічно ефективні методи та засоби виробництва високодисперсних матеріалів при чому у великих кількостях. Тому заміна хімічно чистих прекурсорів солей заліза, наприклад відпрацьованими розчинами травлення сталевих деталей, які утворюються в великих об'ємах на металургійних і гальванічних підприємствах дозволить вирішити цю проблему. Крім того, це шлях і до вирішення екологічних проблем пов'язаних з переробкою та утилізацією токсичних розчинів травлення, які містять іони заліза у великих концентраціях.

Слід також зазначити, що одним з технологічних параметрів, який впливає на фізико-хімічні властивості осадів феритизації є окиснення реакційної суміші. В роботі авторів [11] досліджувався вплив швидкості аерації киснем повітря на процес отримання залізовмісних осадів методом феритизації. Проте застосування аерації киснем повітря при отриманні осаду з контрольованим ростом і формою частинок сполук оксидів заліза є дуже складним процесом. Вирішенням цієї проблеми може слугувати використання в якості окиснювача пероксиду водню (H_2O_2). При реакції $\text{Fe}^{2+} + \text{H}_2\text{O}_2$ утворюються радикали гідроксилу, що є сильними окисниками і допомагають руйнувати навіть органічні забруднювачі. Це основа процесу Фентона, який широко використовується для очищення промислових стічних вод. З літературних джерел про вплив пероксиду водню на фізико-хімічні властивості отриманих осадів в феритизаційному процесі майже нічого невідомо. Таким чином, визначення раціонального використання пероксиду водню для окиснення реакційної суміші є перспективним напрямком дослідження в хімічному синтезі сполук оксидів заліза.

Таким чином, враховуючи широкі перспективи застосування та розповсюдження високодисперсних матеріалів та зростання їх впливу на людину та довкілля, набуває надзвичайно важливого значення розробка і удосконалення будівельних матеріалів, а особливо порошкових покриттів, які містять

високодисперсні сполуки оксидів заліза для підвищення їх експлуатаційних властивостей.

У зв'язку з цим **метою роботи** є дослідження використання сполук оксидів заліза отриманих при переробці гальванічних відходів феритизаційним методом з ультразвуковою обробкою у порошкових покриттях з метою визначити їх корозійні та міцнісні властивості. Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

– дослідити структурні та екологічні властивості сполук оксидів заліза отриманих удосконаленим феритизаційним методом при впливі різних окиснювачів;

– визначити корозійну стійкість та міцнісні властивості порошкових лакофарбових покриттів з використанням супутніх продуктів переробки гальванічних відходів.

Матеріали та методи досліджень. Для отримання порошоків оксидів заліза використовували метод феритизації при переробці відпрацьованого сірчано-кислотного розчину травлення сталевих поверхонь, який отримано на одному з промислових підприємств м. Києва. Процес феритизації проводився при вихідній концентрації іонів заліза в розчині, що сягає значенню $11,3 \text{ г/дм}^3$. Коригування величини рН провадили 25 %-им розчином гідроксиду натрію до значення 11. Тривалість проведення процесу феритизації становила 45 хв.

Досліджувався процес феритизаційної переробки відпрацьованих травильних розчинів з отриманням кристалічних феро-місних сполук, як з традиційною термічною активацією реакційної суміші при температурі 75°C [12], так із активацією реакційної суміші ультразвуком. Для досліджень використовували ультразвукову ванну марки «TUN» при потужності ультразвуку в 70 Вт та частоті 40 кГц. В експериментах використовували реактори з робочим об'ємом 1 дм^3 .

Для окиснення реакційної суміші Fe^{2+} в Fe^{3+} використовували як кисень повітря так і 35 % розчин перексиду водню. Умови проведення феритизаційних досліджень наведено в таблиці 1. В дослідженнях застосована найкраща швидкість аерації киснем повітря при якій формуються стійкі 100 % фази оксидів заліза [13].

Таблиця 1

Умови проведення феритизаційних досліджень

№ зразка	Спосіб активації	Окиснювач реакційної суміші	Особливості окиснення
A – 1	Термічний	Киснем повітря	0,06 дм³/с
A – 2	Термічний	Пероксидом водню	5 мл/дм³
A – 3	Ультразвуком		5 мл/дм³
A – 4			10 мл/ дм³
A – 5			2,5 мл/дм³

Концентрацію іонів заліза відпрацьованого травильного розчину визначали на спектрофотометрі DR3900 (Nach, 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 CM-5 (Micromed, Україна) з фактором розділення 3600 та

висушувався при температурі 105 °С протягом доби в електросушильній шафі СНОЛ 67/350 (Україна). Висушений осад подрібнювався в порошок за допомогою фарфорової ступки.

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.

З метою оцінки впливу водневого показника pH на швидкість міграції іонів важких металів із порошкових фарб, які містять супутні продукти переробки гальванічних відходів були проведені експериментальні дослідження, щодо вилугування іонів заліза з осадів феритизації. В дослідженнях використовували дистильовану воду з нейтральним pH = 6,8. В якості агресивних середовищ застосовувались експериментальні моделі: кислий дощ – розчин сірчаної кислоти H₂SO₄ з pH = 4,0 та лужний ґрунт – розчин NaOH з pH = 9,0. Дослідження на вилугування проводились згідно EN 12457-1:2002 Part 1. Процес вилугування проводився протягом 1 доби в динамічному режимі, який має місце при дії атмосферних опадів на шлам, що знаходиться на звалищах. Для цього використовували установку для перемішування зі швидкістю обертання 9 об./хв., яка представлена в роботі [14].

Як основну полімерну компоненту при формуванні лакофарбових покриттів використовували карбоксилівмісну поліефірну смолу виробництва компанії “Alnex” Crylcoat 2618-3. Для інтенсифікації полімеризації останньої використовували затверджувач - гідроксоалкіламід (HAA). Для забезпечення покривності поверхні металевих зразків в досліджуваних порошкових системах було обрано білий пігмент у вигляді діоксиду титану (TiO₂). В якості контрольного складу було використано систему порошкового покриття, що вміщує сульфат барію (BaSO₄), який є традиційним наповнювачем для отримання порошкового лакофарбового матеріалу. Компонентний склад матеріалів покриттів, використаних при дослідженні, наведено в таблиці 2. Для оцінки впливу наповнювача на основні властивості отриманих покриттів використовували добавки сполук оксидів заліза зразків А – 1 ÷ 5 (табл. 1).

Таблиця 2

Компонентний склад матеріалів покриттів, використаних при дослідженні

№ зразка	Вміст складових, % (мас.)								
	Crylcoat 2618-3	HAA	TiO ₂	BaSO ₄	Оксид заліза				
					А – 1	А – 2	А – 3	А – 4	А – 5
1	65	5	15	15	–	–	–	–	–
2				–	15	–	–	–	–
3				–	–	15	–	–	–
4				–	–	–	15	–	–
5				–	–	–	–	15	–
6				–	–	–	–	–	15

У роботі досліджували властивості композиційного матеріалу, а саме: міцність до дії зворотного удару, відшарування покриття та середня ширина корозії металу.

Міцність до дії зворотного удару визначалася згідно ДСТУ ISO 6272-2:2015 «Фарби та лаки. Міцність до дії зворотного удару» [15].

Дослідження корозійної стійкості систем порошкових покриттів провадилося у відповідності до ДСТУ ISO 9227:2015 «Випробування на корозію в штучних атмосферах. Випробування соляним туманом (конденсація водного розчину хлориду натрію на поверхні зразків при температурі 35 °C)». Склад і ступінь корозійної агресивності навколишнього середовища встановлювався згідно ДСТУ ISO 12944-2:2019, а їх довговічність у відповідності до ДСТУ ISO 12944-1:2019. За результатами досліджень визначали середнє відшарування покриття через 480 год. та середню ширину корозії металу через 480 год. випробувань.

Результати дослідження. На першому етапі досліджень вивчали структурні та екологічні властивості отриманих осадів феритизації. Отримані дані феритизації з використанням ультразвукової обробки порівнювали з відповідними для традиційної термічної.

В роботі проведений візуальний аналіз зміни спектру кольору зразків висушених осадів феритизації отриманих при різних умовах синтезу, який наведено на рис. 1. Колір зразків осадів змінюється в залежності від способу активації реакційної суміші так і окиснювача. Можна припустити, що в отриманих осадах феритизації містяться як фази оксогідроксидів так і оксидів заліза. Слід відмітити наявність осаду червоно-коричневого кольору в зразку А – 4, що може свідчити про наявність фаз оксогідроксидів заліза.

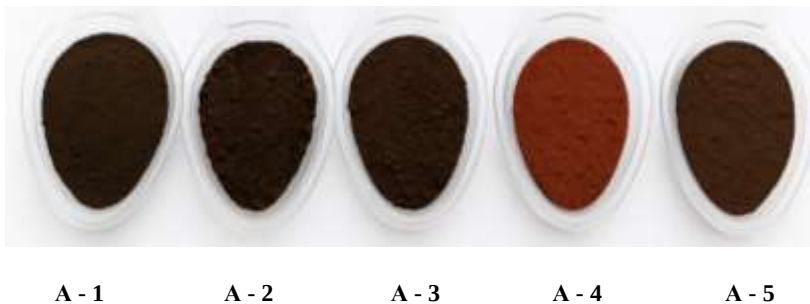


Рис. 1. Спектр зміни кольору зразків осадів феритизації

Проведений якісний фазовий склад осадів феритизації свідчить про кристалічність отриманих зразків (рис. 2). В усіх досліджених зразках осадів ідентифіковано хімічно стабільну феромагнітну фазу магнетиту Fe_3O_4 з параметром кристалічної решітки (a) 8,36 Å. Крім утворення магнетиту, в осаді містяться також інші твердофазні продукти реакції феритизації, зокрема, фероксигіт $\delta\text{-FeOOH}$ з параметрами кристалічної решітки (a) 2,95 Å, який є менш стабільними в лужному середовищі. Виявлена фаза магнетиту на відміну від оксогідроксидів заліза при звичайній температурі не розчиняються не лише у воді, але і в розбавлених водних розчинах сильних мінеральних кислот і їдких лугів. Така стійкість магнетиту обумовлено особливою будовою їх кристалічної решітки шпінельного типу. Потрібно відмітити, що всі досліджувані зразки, мають високий ступінь кристалічності структури окрім зразка А – 4, в якому видніється більш низька інтенсивність і значна ширина дифракційних рефлексів. Крім того,

лише в зразку А – 4 було ідентифіковано проміжну фазу δ -FeOOH. Це можливо пов'язано з тим, що через значну кількість дозування об'єму перекису водню в реакційну суміш відбувається швидке переокиснення розчину порівняно з використанням аерації киснем повітря. Швидке переокиснення реакційної суміші також може призвести до подальшої трансформації фази магнетиту в інші більш стійкі фази оксидів заліза через формування іншої модифікації оксигідроксидів заліза. Але в більшості процесах фазоутворення спостерігається наступна трансформація фазоутворення: $\text{Fe}(\text{OH})_2 \rightarrow \delta\text{-FeOOH} \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3$. Процес формування в осаді магнетиту обумовлено утворенням гідроксиду та оксигідроксиду заліза з наступною їх трансформацією у шпінельну структуру магнетиту.

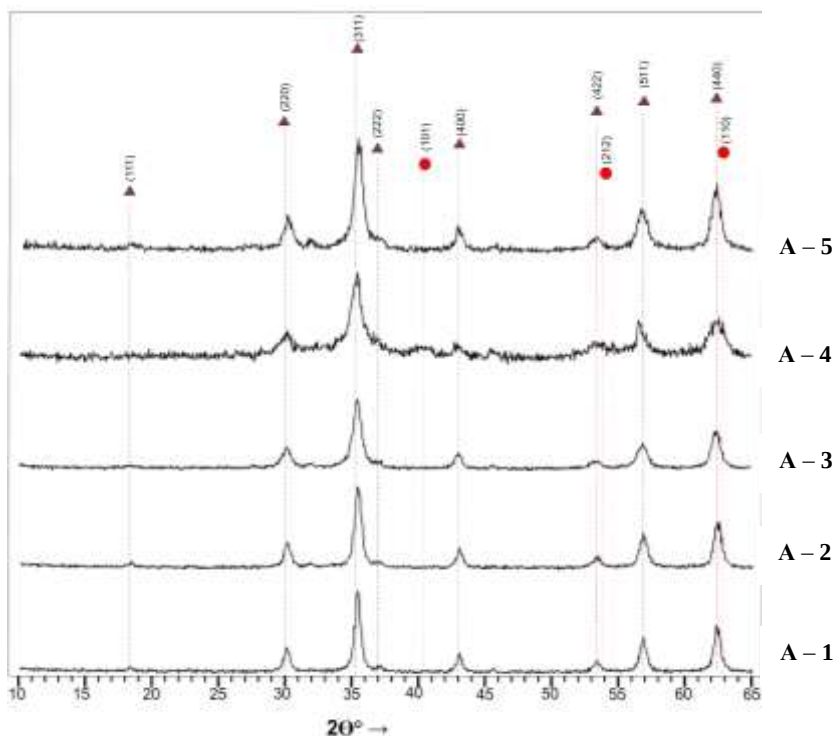


Рис. 2. Дифрактограми осадів феритизації
 ● – δ -FeOOH; ▲ – Fe_3O_4

Проведений кількісний фазовий аналіз досліджених зразків (табл. 3) показав про вплив використання різних окиснювачів.

Таблиця 3

Вплив використання різни окиснювачів

Зразок осаду	Спосіб активації	Окиснювач реакційної суміші	Особливості окиснення	Вміст фази, %	
				$\delta\text{-FeOOH}$	Fe_3O_4
A - 1	Термічний	Киснем повітря	0,06 $\text{дм}^3/\text{с}$	–	100
A - 2	Термічний	Пероксидом водню	5 $\text{мл}/\text{дм}^3$	–	100
A - 3	Ультразвуком		5 $\text{мл}/\text{дм}^3$	–	100
A - 4			10 $\text{мл}/\text{дм}^3$	21,1	78,9
A - 5			2,5 $\text{мл}/\text{дм}^3$	–	100

Потрібно відмітити, що в усіх досліджуваних зразках підтверджується максимальний 100 % вміст хімічно стійкої фази магнетиту, окрім зразка A – 4, в якому кінцевими продуктами в осаді є фероксигіт та магнетит.

Для встановлення хімічної стійкості отриманих осадів феритизації шляхом вилуговування було проведено дослідження на вміст залишкових концентрацій іонів заліза у елюаті з різним водневим показником pH. Проведені дослідження (табл 4) показали залежність отриманих результатів від фазового складу зразків осадів, технологічних параметрів їх отримання та способу активації. Всі досліджені зразки елюатів після вилуговування, окрім A – 4 відповідають вимогам води ДСанПіН 2.2.4-171-10 та Директиві ЄС 98/83, щодо показників ГДК іонів заліза. Це свідчить про надійну хімічну стійкість таких зразків осадів оксидів заліза в лужних та кислих навколишніх середовищах. В нейтральному середовищі в більшості досліджених зразках елюатів залишкову концентрацію іонів заліза невиявлено.

Таблиця 4

№ серії дослідів	Значення pH вихідного елюата	№ зразка	Значення вилуговування іонів $\text{Fe}^{\text{зар.}}$	
			A, $\text{мг}/\text{кг}$	$\text{C}_{\text{зал.}}$, $\text{мг}/\text{дм}^3$
1	9,0	A – 1	0,13	0,06
2		A – 2	0,13	0,06
3		A – 3	0,14	0,07
4		A – 4	0,83	0,41
5		A – 5	0,14	0,07
6	6,8	A – 1	н.в.	н.в.
7		A – 2	н.в.	н.в.
8		A – 3	н.в.	н.в.
9		A – 4	0,16	0,08
10		A – 5	н.в.	н.в.
11	4,0	A – 1	0,32	0,16
12		A – 2	0,34	0,17
13		A – 3	0,36	0,18
14		A – 4	5,67	2,82
15		A – 5	0,34	0,17

н.в. – значення важких металів, які знаходяться за порогом чутливості вимірювального приладу: $< 0,01 \text{ мг}/\text{дм}^3$ – $\text{Fe}^{\text{зар.}}$.

Всі зміни, які відбуваються при вилуговуванні іонів заліза не залежно від

параметрів феритизації та способів активації реакційної суміші зв'язані зі фазовим складом отриманих осадів, а саме вмістом фази фероксигіту $\delta\text{-FeOOH}$. Як показали дослідження (табл. 3) ця фаза при контакті з водними розчинами з різним значенням водневого показника pH є нестабільною не лише в лужному середовищі, але і кислому. Кількісний вміст цієї фази визначає величину вилугування іонів заліза. Чим більший вміст цієї фази тим значення вилугування іонів заліза вище.

На другому етапі досліджень вивчали міцнісні властивості та корозійну стійкість порошкових лакофарбових покриттів з використанням як наповнювача супутніх продуктів феритизації у вигляді сполук оксидів заліза.

Як показали результати досліджень фізико-механічних властивостей покриттів різного компонентного складу, наведені на рис. 3, введення до складу полімерних систем наповнювачів сполук оксидів заліза в більшості досліджень сприяє підвищенню рівня цих властивостей, однак має суттєву залежність умов синтезу цих наповнювачів.

Так, зокрема, при дослідженні міцності полімерного покриття до дії зворотного удару встановлено, що в той час, як міцність вихідного полімерного покриття без добавок оксидів заліза складає близько 2,5 Нм, то введення в склад полімеру порошку оксидів заліза зразків А – 2, 4 та 5 практично не призводить до підвищення міцності. Однак, в зразках А – 3 та 6 міцність значно підвищується майже в 2 рази.

Підвищення міцності полімерного композиту при введенні в склад останнього наповнювача пояснюється ущільненням структури полімерного композиту шляхом зміни ступеня зшивання розроблених композитів за рахунок формування структурної сітки полімеру з додатковими хімічними зв'язками макромолекул полімерної матриці з активними центрами на поверхні дисперсного наповнювача. Такі новоутворені хімічні зв'язки збільшують густину структурної сітки композиту і, як наслідок, поліпшують адгезійну міцність гетерогенних системи як з частинками наповнювача, так і з металевою основою.

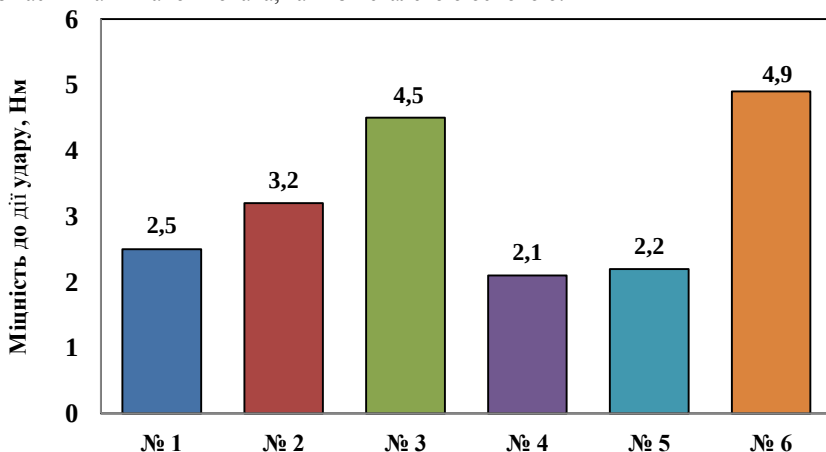


Рис. 3. Міцність покриттів до дії зворотного удару

Виявлено, що введення отриманих супутніх продуктів феритизаційної переробки гальванічних відходів до складу порошкових лакофарбових систем по різному впливають на формування корозійної стійкості покриття (рис. 4, 5). Так, контрольний склад порошкового покриття з використанням наповнювача у вигляді сульфату барію протягом 480 годин витримки в камері сольового туману характеризується відшаруванням покриття на рівні 6,1 мм.

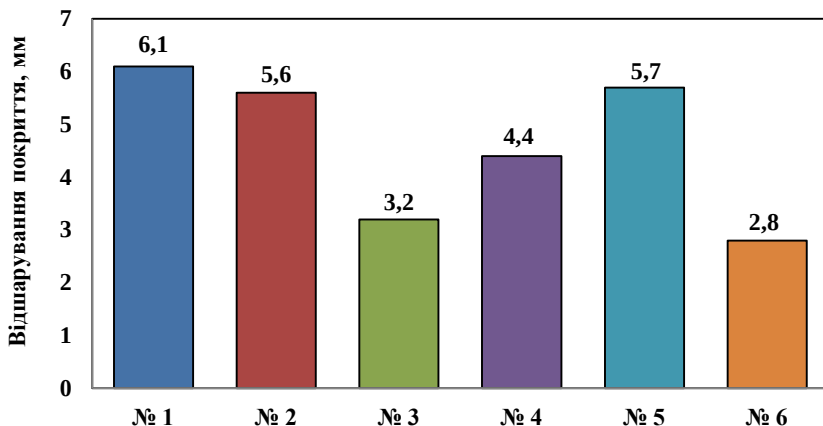


Рис. 4. Відшаруванням покриття протягом 480 годин

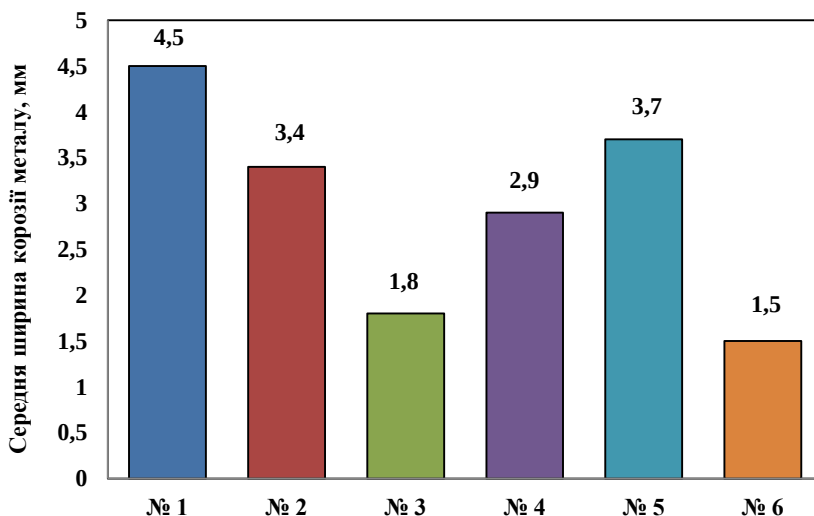


Рис. 5. Середня ширина корозії металу протягом 480 годин

Середня ширина корозії металу становить 4,5 мм. Категорія корозійної стійкості покриття відповідає класу С3 (середній) при забезпеченні середнього класу довговічності (L) від 7-ми до 15-ти років. Прикладами типового середовища (згідно ДСТУ ISO 12944-2:2019) де можуть експлуатуватись отримані покриття є міська та промислова атмосфера, помірне забруднення діоксидом сірки, прибережні райони з низькою солоністю.

Введення отриманих супутніх продуктів феритизації у вигляді оксидів заліза в цілому призводить до підвищення корозійної стійкості порошкового покриття. Слід зазначити, що зразок покриття № 5, який містив значну кількість фази δ -FeOON сприяв незначній корозійній стійкості порівняно із зразками, які містили 100 % вміст Fe_3O_4 , але отримувалися при різних умовах синтезу. Одними з найбільш ефективних для підвищення корозійної стійкості порошкового покриття є використання сполук оксидів заліза зразків А – 3 та 6. У разі введення зразка А – 3 середня ширина відшарування покриття зменшилась в майже 2 рази в порівнянні з контрольним складом з 6,1 до 3,2 мм, а середня ширина розширення корозії металу – з 4,5 до 1,8 мм. При використанні зразка А – 6 в якості наповнювача відшарування покриття зменшилась до 2,8 мм, а середня ширина корозії металу до 1,5 мм. Категорія корозійної стійкості покриттів відповідає класу С4 (високий) при забезпеченні високому класу довговічності (H) від 15-ти до 25-ти років. Прикладами типового середовища де можуть експлуатуватись отримані покриття є промислові райони та прибережні райони з помірною солоністю.

Висновки та перспективи подальших досліджень. В результаті проведених досліджень визначено вплив різного окисника на процес феритизації та способів його активації на структурні та екологічні властивості отриманих осадів. Аналіз експериментальних досліджень показав перспективність переробки відпрацьованих сірчаноокислотних травильних розчинів феритизацією з ультразвуковою обробкою. Встановлено, що активація процесу феритизації ультразвуковою обробкою з використанням окисника пероксиду водню в кількості $2,5 \text{ мл/дм}^3$ призводить до отримання 100 % вмісту фази Fe_3O_4 . Отримані зразки осадів феритизації дозволяють надійно забезпечити високий рівень інкапсулювати іони заліза від навколишнього середовища в кристалічній структурі. Відмічено, що високе значення вилуговування іонів заліза в агресивних навколишніх середовищах має осад, що містить фазу оксегідроксиду заліза та становить в кислому – 5,67 мг/кг, лужному – 0,83 мг/кг. Подальше використання хімічно стійких зразків осадів феритизації як наповнювача в складі лакофарбових красок дозволить забезпечити високий рівень інкапсулювати іони заліза від навколишнього середовища за рахунок надійної іммобілізації їх в порошкових покриттях регульованого призначення компонентного складу. Використання в порошкових красках залізовмісних наповнювачів дозволяє значною мірою утилізувати продукти переробки рідких гальванічних та металургійних відходів. Крім того, ця енергоощадна активація процесу при дотриманні певних технологічних параметрів феритизації сприяє утворенню, головним чином, осаду магнетита.

В результаті проведених досліджень виявлено, що використання осадів феритизації у вигляді сполук оксидів заліза в цілому сприяють підвищенню корозійної стійкості та міцнісних властивостей покриття. Ефективність їх використання залежить від умов синтезу феритизаційного процесу. Серед

досліджуваних зразків найбільш ефективним є введення супутніх продуктів феритизаційної переробки до складу порошкових систем отриманих ультразвуковою обробкою з використанням окисника пероксиду водню в кількості $2,5 \text{ мл/дм}^3$, що сприяє зниженню ширини відшарування покриття в 2 рази, а також ширини корозії металу в 3 рази порівняно з контрольним складом. Клас корозійної стійкості вказаних лакофарбових систем відповідає С4 (високий) при забезпеченні відповідного класу довговічності (Н) від 15-ти до 25-ти років. Крім того, підвищується міцність отриманих покриттів до дії зворотного удару більше ніж у 2 рази.

Список літератури:

1. Revia, R. A., Zhang, M. (2016). Magnetite nanoparticles for cancer diagnosis, treatment, and treatment monitoring: recent advances. *Mater Today*. Vol. 19(3). P. 157–168.
2. Michael, J. P. (2003)/ Iron oxide pigments. *US Geological Survey Minerals Yearbook*. Vol. 41, P. 1 - 41.
3. Mohamed, A.E.M.A., Mohamed, M.A. (2019). Nanoparticles: Magnetism and Applications. In: Abd-Elsalam, K., Mohamed, M., Prasad, R. (eds) *Magnetic Nanostructures. Nanotechnology in the Life Sciences*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-16439-3_1
4. Lu, A.-H., Salabas, E.L., Schuth, F. (2007). Magnetic nanoparticles: synthesis, protection, functionalization, and application. *Angewandte Chemie International Edition*. Vol. 46, Issue 8. P. 1222–1244. <https://doi.org/10.1002/anie.200602866>
5. Cuenya, B.R. (2010). Synthesis and Catalytic Properties of Metal Nanoparticles: Size, Shape, Support, Composition, and Oxidation State Effects. *Thin Solid Films*, 518, 3127-3150. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2010.01.018>.
6. DeCastro, C. L., and Mitchell, B. S. (2002). Nanoparticles from Mechanical Attrition. In Synthesis, Functionalization, and Surface Treatment of Nanoparticles Editor Baraton, M. I. Valencia, CA: *American Scientific Publishers*, 5. P. 1-14.
7. Wu W, He Q, Jiang C. (2008). Magnetic iron oxide nanoparticles: synthesis and surface functionalization strategies. *Nanoscale Res Lett*; 3(11): 397-415. DOI: 10.1007/s11671-008-9174-9.
8. Gogate, P.R. (2002). Cavitation: an auxiliary technique in wastewater treatment schemes. *Advances in Environmental Research*. Vol. 6, Issue 3. P. 335 – 358. DOI: 10.1016/S1093-0191(01)00067-3
9. Vashist, S. K. (2013). Magnetic Nanoparticles-Based Biomedical and Bioanalytical Applications. *Journal of Nanomedicine & Nanotechnology*. 04. DOI: 10.4172/2157-7439.1000e130.
10. Kochetov, G., Samchenko, D., Lastivka, O. (2022). Determining the rational parameters for processing spent etching solutions by ferritization using alternating magnetic fields. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. №3 (10). P. 21 – 28.
11. Yemchura, B., Kochetov, G., Samchenko, D. (2018). Ferrit cleaning of waste water from zinc ions: influence of aeration rate. *Problems of Water Supply, Sewerage and Hydraulic*, 30, 14–22. DOI: <https://doi.org/10.32347/2524-0021.2018.30.14-22>.
12. Samchenko, D., Kochetov, G., Derecha, D. O., & Skirta, Y. B. (2022). Sustainable approach for galvanic waste processing by energy-saving ferritization with

AC-magnetic field activation. *Cogent Engineering*, 9(1). <https://doi.org/10.1080/23311916.2022.2143072>

13. Samchenko, D., Sosedko, A. (2024). Removal of Zn²⁺ ions from wastewater using iron-containing sorbents, *Gaz, Woda i Technika Sanitarna*, pp. 26–30. DOI: 10.15199/17.2024.10.4

14. 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*, Vol. 5, №10 (107), pp. 6–13. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.215129>.

15. Gots, V. & Lastivka, O. & Tomin, O. & Kovalchuk, O. (2019). Influence of Film-Forming Components on the Corrosion Resistance of Powder Coating. *Materials Science Forum*. 968. 143-152. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.968.143.

Oles LASTIVKA, Taras ISHUTKO

Investigation of the Use of Iron Oxide Compounds in Powder Coating Materials

A significant cost factor in the production of these iron-containing compounds is the use of expensive precursors and energy resources during synthesis. Therefore, replacing chemically pure heavy metal salt precursors with spent technological solutions—generated in large volumes at metallurgical and electroplating plants—can address this issue. The processing of such solutions to obtain valuable commercial products is considered a promising approach. This study presents the results of employing the ferritization method. A distinctive feature of the research is the use of energy-efficient ultrasonic treatment of the reaction mixture. Its advantages over traditional thermal activation methods are demonstrated. The influence of different oxidizing agents and activation methods on the ferritization process and the structural properties of the resulting precipitates has been investigated. X-ray diffraction analysis revealed the presence of ferroxhyte (δ -FeOOH) and magnetite (Fe_3O_4) phases in the ferritization products. It was established that ultrasonic treatment combined with hydrogen peroxide addition at a concentration of 2.5 ml/dm³ results in a precipitate consisting exclusively of the magnetite phase. The obtained ferritization precipitates reliably encapsulate iron ions within their crystalline structure, effectively isolating them from the environment. It was noted that the precipitate containing iron oxyhydroxide phase exhibited significant iron ion leaching in aggressive environments: 5.67 mg/kg in acidic and 0.83 mg/kg in alkaline conditions. The research results indicate the potential use of these ferrimagnetic compound-containing precipitates in the production of powder coating materials. Implementing the improved ferritization process in industrial applications may reduce energy consumption compared to conventional waste treatment technologies.

Keywords: pickling solutions, waste processing, ferritization, ultrasonic treatment, ferrite precipitates, magnetite, powder coatings, corrosion resistance.