

DOI: 10.18372/2310-5461.45.14576

УДК 542.936:669.112.228.1 (045)

Л. А. Фролова, канд. техн. наук, доц.
ДВНЗ «Український державний
хіміко-технологічний університет»
orcid.org/0000-0001-7970-2264
e-mail: 19kozak83@gmail.com

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ СПІВОСАДЖЕННЯ ФЕРУМ(II) ТА НІКЕЛЬ(II) ПОЛІГІДРОКСОКОМПЛЕКСІВ

Вступ

Одержання феритів перехідних металів — це складний багатадійний процес закономірності перебігу якого залежать від умов співосадження, окислення та співвідношення компонентів. Нанодисперсні складні оксиди є перспективними матеріалами завдяки їх високим адсорбційним, каталітичним, магнітним властивостям [1; 2]. Упродовж багатьох років основна увага приділялася розробці технологій одержання, що вміщують обов'язкову високотемпературну стадію.

Аналіз досліджень і публікацій

З літературного огляду випливає, що найбільш перспективним із методів отримання складних оксидів, у тому числі феритів, є гідрофазний, що складається з декількох стадій: співосадження гідроксидів з розчинів солей та подальша феритизація. Є велика кількість праць, що розглядає процеси осаження гідроксидів та співосадження шаруватих подвійних гідроксидів (ПШГ), які перебігають у випадку присутності дво- та тривалентних катіонів [3–6]. Процес співосадження ферум(II) та нікель(II), кобальт(II), манган(II), купрум(II), цинк полігідроксидів практично не досліджений. Наші чисельні експерименти показують, що в деяких випадках різні значення рН-утворення гідроксидів не заважають практично повному співосадженню.

Наприклад, співосадження гідроксидів алюмінію та феруму(II), алюмінію та кобальту(II), алюмінію та феруму(II) [4; 5].

Дослідниками пропонується декілька механізмів осаження гідроксидів. Основним на сьогодні є механізм гетерогенного осаження-розчинення, який реалізується в декілька стадій, основними з яких є гідратація іонів, утворення полігідроксокомплексів, зародкоутворення, зростання кристалічної фази, розчинення та зростання, старіння осаду.

Є дані [6] щодо важливості участі аніонів утворених основних солей в формуванні

ланцюжкової структури подвійних шаруватих гідроксидів. Вважається, що саме кислотні залишки мають важливе значення при формуванні симетричної структури подвійних шаруватих гідроксидів, що мають в складі катіони дво- та тривалентних іонів. Однак експерименти показали можливість утворення однорідних осадів гідроксидів, що мають різну валентність та рН-осаження (Al-Fe ПШГ, Al-Ni ПШГ, Al-Co ПШГ) та неможливість співосадження для гідроксидів з подібним рН-осаженням. Аналіз літературних джерел показав, що значний накопичений матеріал з цього приводу не має пояснення, що задовольняло б усім вимогам.

Запропоновані ланцюги перетворень стосуються утворення феритів при гідротермальній обробці або окисненні двовалентних прекурсорів. У працях [5; 9] наведені розрахункові дані щодо можливості співосадження в системі Ni-Zn або Co-Ni-Zn гідроксидів. Висновки були зроблені на основі близьких значень рН-осаження відповідних гідроксидів. Утворення шпінельних фаз зі співосаджених гідроксидів спостерігали в системах NiAl₂O₄, CoAl₂O₄. Автори праці [12] запропонували механізм осаження ферум(II) гідроксидів карбонатом натрію, за яким спочатку утворюються кристалічні пластинки ферум(II) гідроксид карбонату, з подальшим утворенням Fe₃O₄/γ-Fe₂O₃. Частинки феригідриту з часом зростають за рахунок розчинення пластинок ферум(II) гідроксид карбонату. Аналогічний механізм співосадження пропонують автори праці [13]. Коли є велика різниця в розчинності гідроксидів тривалентних і двовалентних металів утворення ПШГ відбувається шляхом розчинення тривалентного гідроксиду з наступним осадженням ПШГ. Коли продукти розчинності двох бінарних гідроксидів близькі, як у випадку системи Zn-Al, існує також можливість співосадження, що відіграє основну роль в утворенні ПШГ. Тобто основним виражається добуток розчинності окремого гідроксиду.

Мета статті (постановка завдання)

Метою статті є встановлення механізму співосадження ферум (II) та нікель (II) полігідроксидів на основі використання

комплексу методів аналізу, а саме, потенціометричного титрування, циклічної вольтамперометрії, чисельного диференціювання (рис. 1).

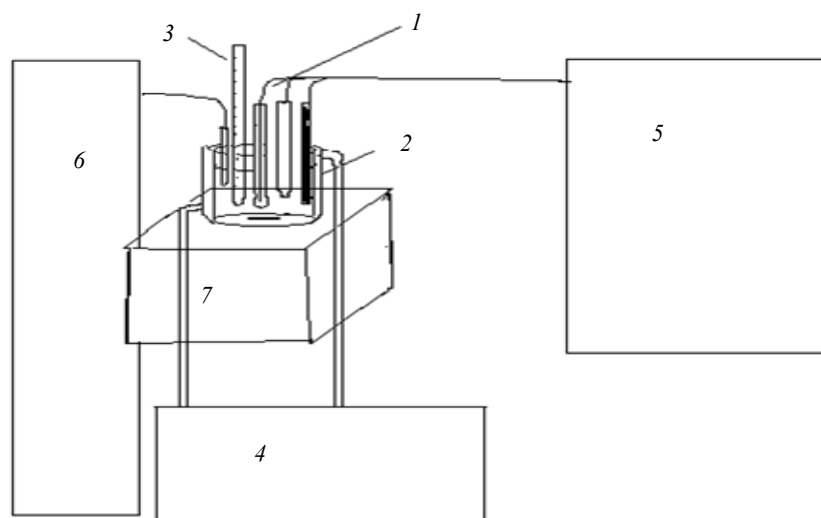


Рис. 1. Схема лабораторної установки дослідження співосадження ферум(II) та нікель(II) полігідроксикомплексів:
1 — електроди; 2 — реактор; 3 — бюретка; 4 — термостат;
5 — рН-метр, 6 — ємність з аргоном, 7 — перемішувачий пристрій

Методика проведення експериментів

Дослідження процесу співосадження проводилося в термостатичному реакторі, забезпеченій мішалкою, ртутним термометром. Постійну температуру підтримували за допомогою термостата ІТЖ-0-03, похибка термостатування 3,5 °С [14].

Потенціометричне титрування проводилося при термостатуванні (1 °С) на рН-метрі-мільвольтметрі рН-150.

Як вимірювальний електрод використовували скляний марки ЕСЛ-15-11, як електрод порівняння — хлоридсрібний електрод марки ЕВЛ-1Г4, похибка вимірювань величини рН становила 0,02 од. Титрування проводили таким чином: з бюретки з ціною поділки 0,02 мл додавали розчин NaOH до вихідного розчину FeSO₄ та NiSO₄. Для отримання порівнянних результатів і спрощення інтерпретації кривих, обсяг NaOH що додається, приводили до мольного співвідношення [ОН/М²⁺].

Циклічні вольтамперограми (ЦВА) одержували за допомогою потенціостату Potentiostat/Galvanostat Reference 3000 (Gamry) у потенціодинамічному режимі при швидкості розгортання потенціалу 100 мВ/с. Робочим електродом слугувала платина площею 2,0 см². Допоміжний електрод був також платиновий.

Електрод порівняння — насичений хлоридсрібний електрод марки ЕВЛ-1М1, з'єднаний з комірною електролітичним містком (рис. 2).

Циклічні вольтамперограми для досліджуваних систем характеризують стадії окиснення-відновлення в розчині. Розгортка потенціалу була розпочата від від'ємних значень потенціалу у напрямку позитивних і, потім після зміни напрямку розгортки, потенціал повертався до вихідного значення.

На рис. 2–4 наведені циклічні вольтамперограми, одержані в розчинах з різним складом (Fe²⁺ — SO₄²⁻ — H₂O, Ni²⁺ — SO₄²⁻ — H₂O, Ni²⁺ — Fe²⁺ — SO₄²⁻ — H₂O). Залежно від складу вони характеризуються наявністю низки характерних ділянок. При анодній поляризації спостерігається різке зростання струму, яке відповідає перебігу процесів виділення кисню та окисненню сполук феруму (рис. 3).

На катодній гілці ЦВА спостерігається пік струму, зумовлений електрохімічним відновленням Fe³⁺ + e → Fe²⁺.

При цьому, площа даного піка може бути використана як критерій, що характеризує інтегральну швидкість процесу розкладу полігідроксикомплексів, тобто концентрацію відповідних іонів в розчині (рис. 4). ЦВА системи Ni²⁺ — SO₄²⁻ — H₂O характеризуються наявністю катодного максимуму в області потенціалів — 0,25 В, що відповідає процесу відновлення іонів Ni(II), а також слабо вираженого анодного піку за E = 0,2 ... 0,3 В, що відповідає реакції розчинення нікелю.

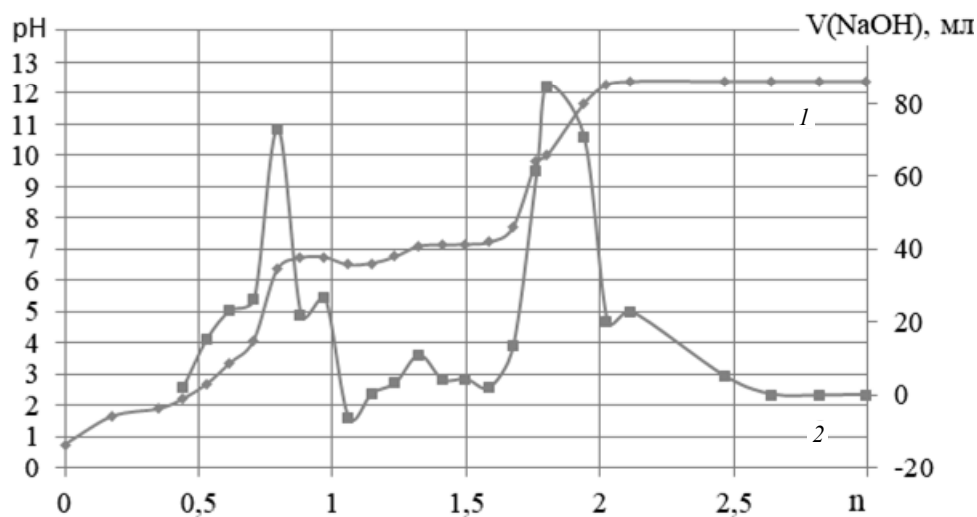


Рис. 2. Криві потенціометричного титрування розчинів $\text{Ni}^{2+} - \text{Fe}^{2+} - \text{SO}_4^{2-} - \text{H}_2\text{O}$, мольне співвідношення катіонів 1:2, інтегральна крива (1), диференціальна крива (2)

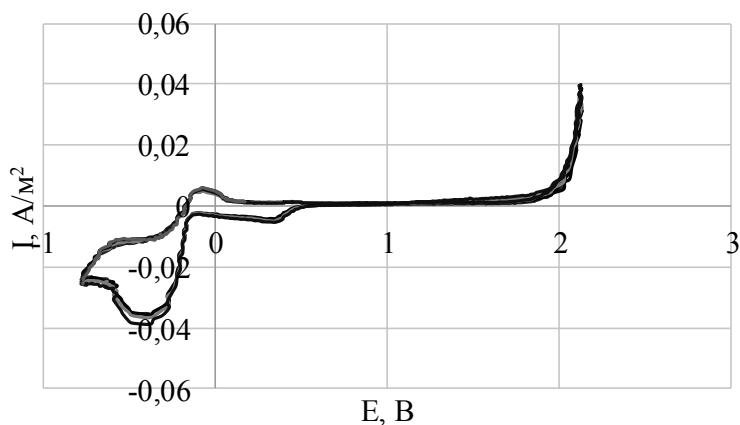


Рис. 3. ЦВА розчинів систем $\text{Fe}^{2+} - \text{SO}_4^{2-} - \text{H}_2\text{O}$ за мольного співвідношення $[\text{OH}^-/\text{M}^{2+}] = 0$ рН = 1 (п'ять циклів)

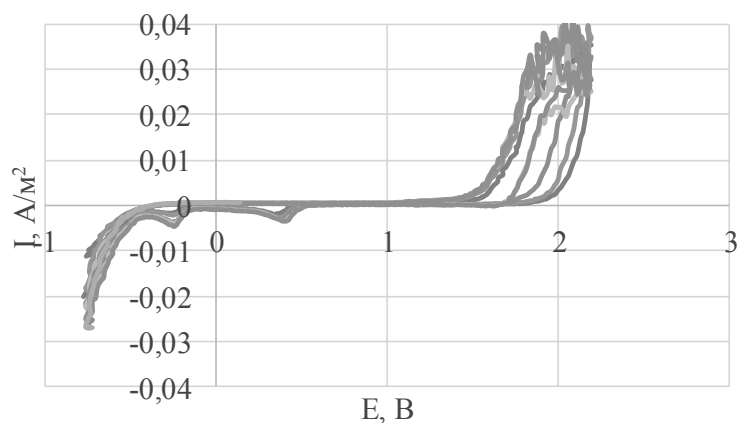
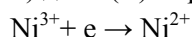
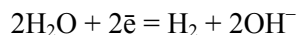
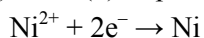


Рис. 4. ЦВА розчинів систем $\text{Ni}^{2+} - \text{SO}_4^{2-} - \text{H}_2\text{O}$ за мольного співвідношення $[\text{OH}^-/\text{M}^{2+}] = 0$

Плато катодного струму на первинному катодному скані при 0,2–0,5 В відповідає відновленню Ni(III) до Ni(II) за реакцією



Ni(II) до Ni(0) за реакцією

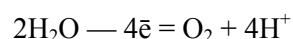
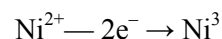


При подальшому зсуві потенціалу у катодний бік спостерігається стрімке експоненційне зростання струму за рахунок утворення водню.

Анодні процеси для системи



описуються рівняннями



На отриманих вольтамперограмах присутні невеликі хвилі окиснення іонів Ni(0) до Ni(II), тобто з помітною швидкістю перебігає лише катодний процес, анодний пік відсутній, тобто процес є незворотнім.

Як впливає з одержаних даних (рис. 5), за наявності в розчині одночасно катіонів феруму(II) та нікелю(II), площа піка аналогічна індивідуальному розчину $\text{Fe}^{2+} \text{SO}_4^{2-} - \text{H}_2\text{O}$ за $n = 0$.

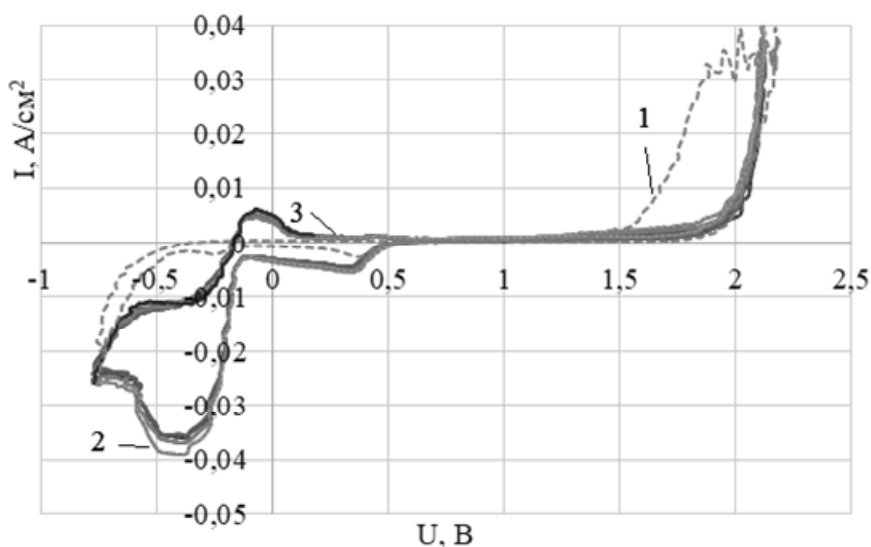
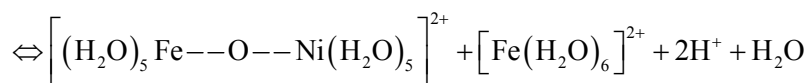
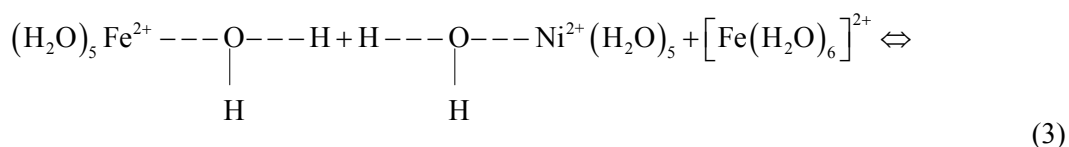
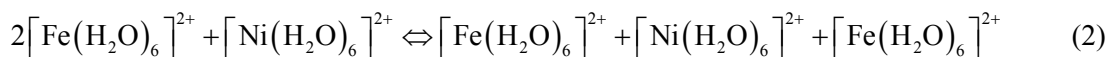


Рис. 5. ЦВА розчинів систем Ni²⁺— SO₄²⁻— H₂O(1), Fe²⁺ SO₄²⁻— H₂O(2) і Ni²⁺— Fe²⁺ SO₄²⁻— H₂O(3) за мольного співвідношення [OH⁻/M²⁺] = 0

Крім того, на сумісному графіку за $n = 0$ спостерігається практично повне співпадіння ЦВА для розчинів ферум(II) сульфату та суміші нікель сульфату та ферум(II) сульфату.

На катодних та анодних кривих відсутні піки, що відповідають окисно-відновним процесам нікель(II), але є деякий зсув катодного піку в бік позитивних значень, що можна пояснити утворенням стійких проміжних комплексів за реакціями:



У системі Ni²⁺— Fe²⁺ SO₄²⁻— H₂O спостерігається домінування процесу осадження ферум(II) гідроксиду (рис. 6).

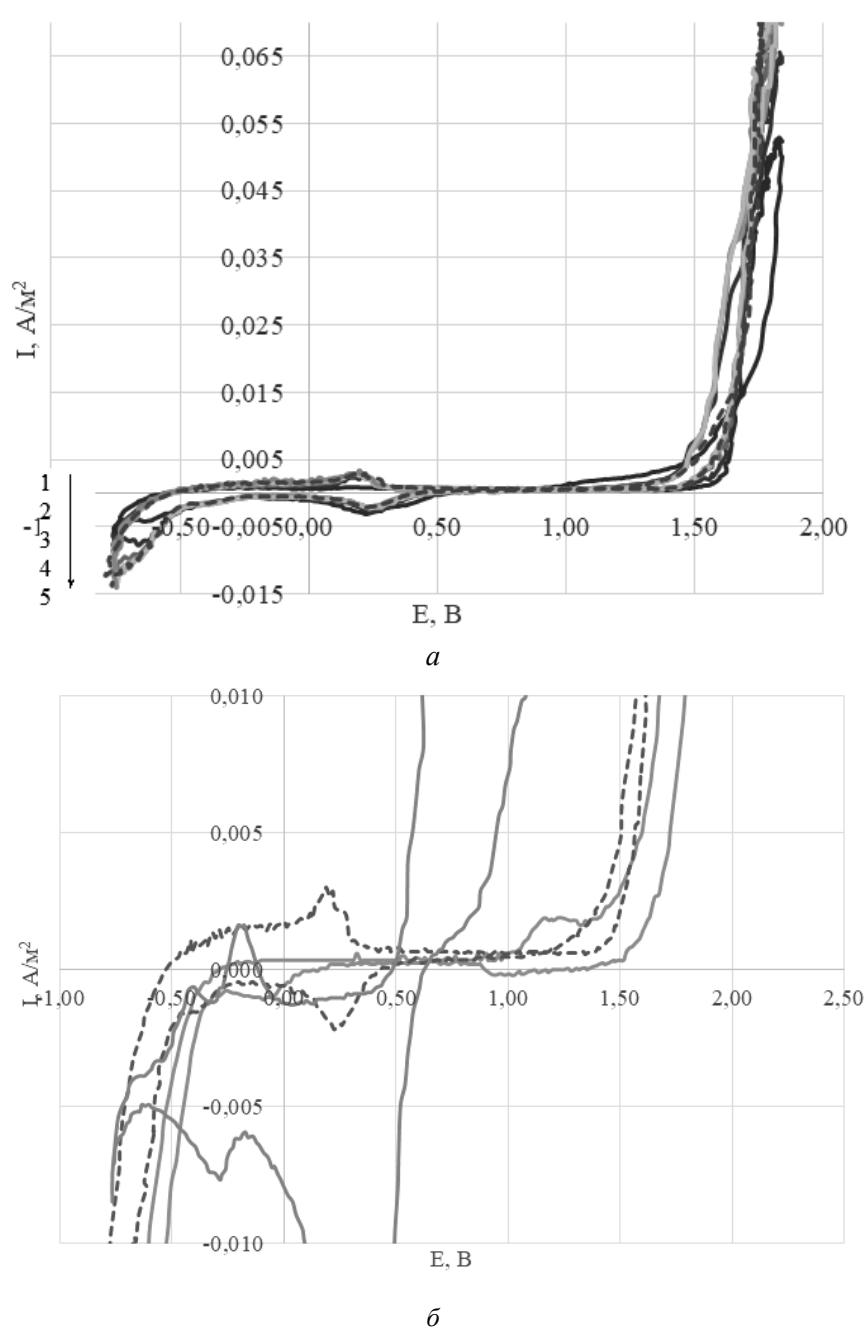


Рис. 6. ЦВА розчинів систем $\text{Ni}^{2+} - \text{Fe}^{2+} \text{SO}_4^{2-} - \text{H}_2\text{O}$ п'ять циклів (а) та $\text{Ni}^{2+} - \text{SO}_4^{2-} - \text{H}_2\text{O}(2)$, $\text{Fe}^{2+} \text{SO}_4^{2-} - \text{H}_2\text{O}(1)$ і $\text{Ni}^{2+} - \text{Fe}^{2+} \text{SO}_4^{2-} - \text{H}_2\text{O}$ (б) за мольного співвідношення $[\text{OH}^-/\text{M}^{2+}] = 1$

Аналіз рис. 5, 6 показує, що при мольному відношенні $n = [\text{OH}^-]/[\text{M}^{2+}] = 1$ для розчинів системи $\text{Ni}^{2+} - \text{Fe}^{2+} \text{SO}_4^{2-} - \text{H}_2\text{O}$ хід кривих практично не змінюється для циклів 1–5, тобто швидкість електродних процесів значно більше швидкості руйнування поліадерних гідроксокомплексів. Це є наслідком стійкості частинок. Пік анодної гілки кривої в діапазоні потенціалів 1.3–1.6 В має симетричний пік в катодній ділянці. Катодна хвиля відновлення за потенціалах 0.25–0.3 В на катодній гілці ЦВА практично не змінюється зі зростанням кількості циклів.

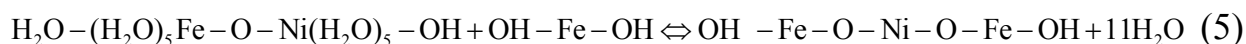
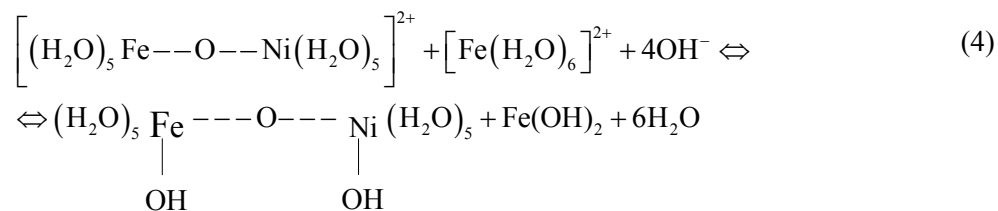
Це може бути пов'язано з відновленням разом з іонами Ni^{2+} іонів Fe^{2+} , які також можуть зв'язуватися в біадерні комплекси. Незначне збільшення піків свідчить про те, що в даному випадку утворюються стійкі біадерні полігідроксокомплекси.

Необхідно також відзначити, що прямий і зворотний хід катодних ділянок ЦВА не збігаються між собою, що говорить про значний вплив поступового вивільнення катіонів із утворених полігідроксокомплексів.

Аналізуючи рис. 5 і 6, можна також припустити, що в обох випадках на початкових

стадіях осадження утворюються аквакомплекси, і при подальшому збільшенні рН відбувається утворення проміжних сполук.

Кінцевим продуктом осадження є полігідроксокомплекси феруму і нікелю.



Висновки

В роботі запропоновано використання методу потенціометричного титрування та циклічної вольтамперометрії для вивчення процесу співосадження ферум(II) та нікель(II) полігідроксидів. Для оцінювання процесу співосадження запропоновано використання аналізу інтегральної та диференціальної залежності рН від співвідношення $[\text{OH}^-/\text{M}^{2+}]$. Додаткове використання ЦВА дозволило визначити домінуюче осадження ферум(II) гідроксидів.

Встановлено, що різний вигляд ЦВА для $[\text{OH}^-/\text{M}^{2+}] = 0$ та $[\text{OH}^-/\text{M}^{2+}] = 1$ пов'язано з перебігом низки реакцій. Якщо розглянути реакції (1)–(5), можна зробити висновки, що гідратовані катіони Fe^{2+} та Ni^{2+} утворюють несиметричні гідроксополімери з оксигеновим містком.

Зі збільшенням рН утворюються біядерні гідроксоструктури з оксигеновими зв'язками. Проміжний гетероядерний комплекс, що утворюється за реакцією (3), є досить нестійким, внаслідок несиметричності структури. При додаванні лугу можливо утворення стійкої проміжної сполуки за реакцією (5).

ЛІТЕРАТУРА

1. Білокопитов Ю. В. та ін. Дослідження гетерогенно-каталітичної трансестерифікації триацетину етанолом. *Наукоємні технології*. 2009. no 2(2). С. 115–118.

2. Білокопитов Ю. В., Бурлаченко Є. С., Гаєвська Т. А., Програмована термодесорбція хлорбензолу на оксидному хромовому каталізаторі. *Наукоємні технології*. 2009. no 2(2). С. 119–122.

3. Юрченко Г. О. Кінетика процесу осадження катіонів нікелю (II). *Технологічний аудит та резерви виробництва*. 2012. no 3 (2). С. 35–36.

4. Frolova L., Pivovarov A., Butyrina T. Synthesis of pigments in $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{—Al}_2\text{O}_3\text{CoO}$ by co-precipitation method. *Pigment and Resin Technology*. 2017. no. 46(5). С. 356–361. DOI:10.1108/PRT-07-2016-0073

Оскільки іони нікелю і феруму знаходяться в розчині у вигляді аквакомплексів $[\text{Ni}(\text{H}_2\text{O})_5]^{2+}$ — $[\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6]^{2+}$ зі збільшенням рН в розчині відбувається наступна взаємодія за механізмом:

5. Evsei E. A. et al. Physicochemical parameters of joint hydrolysis of iron (III) ions with cobalt (II) and zinc (II) cations in aqueous solution. *Russian Journal of Inorganic Chemistry*. 2003. no. 48(10). С. 1601–1608.

6. Grégoire B., Ruby C., Carteret C. Hydrolysis of mixed Ni^{2+} — Fe^{3+} and Mg^{2+} — Fe^{3+} solutions and mechanism of formation of layered double hydroxides, *Dalton Transactions*. 2013. no. 42(44). С. 15687–15698. DOI:10.1039/C3DT51521D

7. Frolova L., Pivovarov A., Butyrina T. Synthesis of pigments in $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{—Al}_2\text{O}_3\text{—CoO}$ by co-precipitation method, *Pigment and Resin Technology*. 2017. no. 46(5). С. 356–361. DOI:10.1108/PRT-07-2016-0073

8. Луцась А. В. та ін. Фізико-хімічні характеристики продуктів сумісного осадження магній, ферум та хром гідроксидів і продуктів їх термічного розкладу. *Вісник Національного технічного університету «ХПИ»*. Серія: *Механіко-технологічні системи та комплекси*. 2015. no. 49. С. 26–32.

9. Мельников Б.І., Астрелін І.М, Фролова Л.А., Смотряев Р.В., Колодяжний О.Т. Дослідження реакції утворення гідроксиду заліза (II) у водяних розчинах його сульфату. *Наукові вісті Національного технічного університету України «КПІ»*. 2003. С. 122–126.

10. Бутенко А. М. та ін. Вплив умов осадження на властивості одержуваного осаду ферум (+ 3) гідроксиду. *Труди Одеського політехнічного університету*. 2009. no 2. С. 210.

11. Цукренко В. В. Сучасні методи синтезу нанокристалічних порошоків алюмокобальтової шпінелі. *Современные проблемы физического материаловедения*. Серія: *Фізико-хімічні основи технології порошкових матеріалів*. 2014. no 23. С. 34–45.

12. LaGrow A. P., Besenhard M. O., Hodzic A., Sergides A., Bogart L. K., Gavrilidis A., Thanh N. T. K. Unravelling the growth mechanism of the co-precipitation of iron oxide nanoparticles with the aid of synchrotron X-Ray diffraction in solution. *Nanoscale*. 2019. no.11. (14). P. 6620–6628. DOI: 10.1039/C9NR00531E

13. Radha A. V., Kamath P. V. Aging of trivalent metal hydroxide/oxide gels in divalent metal salt solutions: Mechanism of formation of layered double hydroxides (LDHs). *Bulletin of Materials Science*. 2003. no. 26. (7). P. 661–666. DOI:10.1007/BF02706760

14. Frolova L. An investigation on the synthesis of nickel aluminate. *Pigment & Resin Technology*. 2019. no. 48 (6). Pp. 487–492. DOI:10.1108/PRT-12-2018-0126

Фролова Л. А.

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ СПІВОСАДЖЕННЯ ФЕРУМ(II) ТА НІКЕЛЬ(II) ПОЛІГІДРОКСОКОМПЛЕКСІВ

Нанодисперсні ферити, одержані гідрофазним методом, є перспективними матеріалами завдяки їх високим адсорбційним, каталітичним, магнітним властивостям. Впродовж багатьох років основна увага приділялася розробці технологій їх одержання, що вміщують високотемпературну стадію. З літературного огляду випливає, що найбільш перспективним з методів отримання феритів є гідрофазний, що складається зі співосадження гідроксидів з розчинів солей та подальшої феритизації. Є велика кількість робіт, що розглядає процеси співосадження шаруватих подвійних гідроксидів (ШПГ), які перебігають у випадку присутності двота тривалентних катіонів. Значний накопичений матеріал не має пояснення, що задовольняло б усім вимогам, тому необхідні дослідження щодо встановлення механізму співосадження. За допомогою потенціометричного титрування, циклічної вольтамперометрії (ЦВА) встановлені послідовні стадії утворення полігідроксокомплексів. Показано, що процес співосадження відбувається в декілька стадій.

Перша стадія — це утворення моно- або біядерних полігідроксокомплексів. Отримані ЦВА при мольному співвідношенні $n = [\text{OH}^-]/[\text{M}^{2+}] = 0$ показують, що аквакомплекс відповідних іонів металів утворюють стійкі продукти гідролізу (моноядерні гідроксокомплекс). При мольному відношенні $n = [\text{OH}^-]/[\text{M}^{2+}] = 1$ в системі $\text{Ni}^{2+} - \text{Fe}^{2+} - \text{SO}_4^{2-} - \text{H}_2\text{O}$ хід кривих практично не змінюється для циклів 1–5, що свідчить про те, що швидкість руйнування біядерних полігідроксокомплексів є лімітуючою стадією в порівнянні з електродними процесами, що відбуваються зі значно більшою швидкістю. Це є наслідком стійкості утворених частинок. Піку анодної гілки кривої в діапазоні потенціалів 1.3–1.6 В відповідає симетричний пік в катодній ділянці. Катодна хвиля відновлення за потенціалах 0.25–0.3 В на катодній гілці ЦВА практично не змінюється зі зростанням кількості циклів. Це може бути пов'язано з відновленням разом з іонами Ni^{2+} іонів Fe^{2+} , які також можуть зв'язуватися в стійкі біядерні полігідроксокомплекс. Незначне збільшення піків свідчить про те, що в даному випадку утворюються стійкі біядерні частинки, які мають структуру ізоморфну структурі фериту.

Ключові слова: ферит; полігідроксокомплекс; вольтамперометрія; потенціометричне титрування; співосадження.

Frolova L.

INVESTIGATION OF PROCESS CO-PRECIPIATION FERUM(II) AND NICKEL(II) OF POLYHYDROXOCOMPLEXES

Nanodispersed ferrites obtained by the hydrophase method are promising materials due to their high adsorption, catalytic, and magnetic properties. Over the years, the focus has been on the development of high temperature production technologies. According to the literature review, the most promising of the ferrite preparation methods are hydrophase technologies, which accommodates the co-precipitation of hydroxides from salt solutions and further ferritization. There is a many work considering the co-precipitation processes of layered double hydroxides (LDH) occurring in the case of the presence of two and trivalent cations. With the used of potentiometric titration, cyclic voltamperometry (CVA), the mechanism of formation of polyhydroxocomplexes is established. It is showed that the process of coprecipitation occurs in several stages - the first stage is the formation of polyhydroxocomplexes. The CVA obtained at a molar ratio of $n = [\text{OH}^-]/[\text{M}^{2+}] = 0$ indicate that the aquacomplexes of the corresponding metal ions form separate stable hydrolysis products. At a molar ratio of $n = [\text{OH}^-]/[\text{M}^{2+}] = 1$ in $\text{Ni}^{2+} - \text{Fe}^{2+} - \text{SO}_4^{2-} - \text{H}_2\text{O}$ systems, the course of the curves practically does not change for cycles 1-5, which indicates that the electrode processes velocity is much greater than the destruction rate of polynuclear hydroxocomplexes. This, in turn, is a consequence of the stability of the particles formed. The peak of the anode branch of the curve in the potential range 1.3–1.6 V has a symmetric peak in the cathode region. The cathodic reduction wave with potentials 0.25–0.3V on the cathodic branch of the CVA practically does not change with increasing number of cycles. This may be due to the reduction together with Ni^{2+} ions of Fe^{2+} ions, which can also bind to stable heteronuclear complexes. The slight increase in the peaks indicates that in this case stable polynuclear particles are formed which are isomorphic to the ferrite structure.

Keywords: ferrite; polyhydroxocomplex; voltammetry; potentiometric titration; coprecipitation.

Фролова Л. А.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СООСАЖДЕНИЯ ФЕРУМ(II) И НИКЕЛЬ(II)
ПОЛИГИДРОКСОКОМПЛЕКСОВ**

Нанодисперсные ферриты, полученные гидрофазным методом, являются перспективными материалами благодаря их высоким адсорбционным, каталитическим, магнитным свойствам. На протяжении многих лет основное внимание уделялось разработке технологий получения, включающих высокотемпературную стадию. Из литературного обзора следует, что наиболее перспективным из методов получения ферритов является гидрофазный, вмещающий стадию соосаждения гидроксидов из растворов солей и дальнейшую ферритизацию. Имеется большое количество работ, рассматривающих процессы соосаждения слоистых двойных гидроксидов (СДГ), протекающие в случае присутствия двух и трехвалентных катионов. Значительный накопленный материал не имеет объяснения, которое удовлетворяло бы всем требованиям. С помощью метода потенциометрического титрования, циклической вольтамперометрии (ЦВА) установлен механизм образования полигидрохсокомплексов. Установлено, что процесс соосаждения происходит в несколько стадий: первая стадия — образование моно- или биядерных полигидрохсокомплексов. Полученные ЦВА при мольном отношении $n = [\text{OH}^-] / [\text{M}^{2+}] = 0$ показывают, что аквакомплексы соответствующих ионов металлов образуют отдельные устойчивые продукты гидролиза. При мольном отношении $n = [\text{OH}^-] / [\text{M}^{2+}] = 1$ в системах $\text{Ni}^{2+} - \text{Fe}^{2+} \text{SO}_4^{2-} \text{H}_2\text{O}$ ход кривых практически не меняется для циклов 1-5, что свидетельствует о том, что скорость электродных процессов значительно больше скорости разрушения биядерных гидроксокомплексов. Это является следствием устойчивости образованных частиц. Пик анодной ветви кривой в диапазоне потенциалов 1.3–1.6В имеет симметричный пик в катодной области. Катодная волна восстановления при потенциалах 0.25–0.3В на катодной ветви ЦВА практически не меняется с ростом количества циклов. Это может быть связано с восстановлением вместе с ионами Ni^{2+} ионов Fe^{2+} , которые также могут связываться в устойчивые биядерные комплексы. Незначительное увеличение пиков свидетельствует о том, что в данном случае образуются устойчивые биядерные частицы, которые имеют структуру изоморфную структуре феррита.

Ключевые слова: феррит; полигидрохсокомплекс; вольтамперометрия; потенциометрическое титрование; соосаждение.

Стаття надійшла до редакції 28.01.2020 р.

Прийнято до друку 25.02.2020 р.