

1953. – Vol. 1. – P. 428–437. *Флемингс, М. С.* Процессы затвердевания: Пер. с англ. [Текст] / *М. С. Флемингс*. – М.: Мир, 1977. – 423 с. **8.** *Burton, J. A.* The Distribution of Solute in Crystals Grown from the Melt. I. Theoretical [Текст] / *J. A. Burton, R. C. Prim, F. P. Slichter* // Journal of Chemical Physics. – Vol. 21, Nov. 1953. – P. 1987–1994. **9.** *Лакомский, В. И.* Взаимодействие диатомных газов с жидкими металлами при высоких температурах: монография [Текст] / *В. И. Лакомский*. – К.: Наукова думка, 1992. – 231 с. **10.** *Пфани, В. Д.* Перераспределение растворимых примесей при кристаллизации [Текст] / *В. Д. Пфани* // Сб. "Жидкие металлы и их затвердевание": Пер. с англ. – М.: Металлургиздат, 1962. – С. 248–272.

Bibliography (transliterated): **1.** *Nesterenko, T. M., Nesterenko, O. M., Kolobov, H. O., Hrytsai, V. P.* (2007). Vyrobnystvo aliuminiievkykh spлавiv z rudnoi ta vtorynnoi syrovynny: navchalnyi posibnyk. Kiev: Vyshcha shkola, 207. **2.** *Fomyn, B. A., Moskvytyn, V. Y., Makhov, S. V.* (2004). Metallurhия vtorychnoho aliumyniia: monohrafyia. Moscow: EKOMET, 240. **3.** *Napalkov, V. Y., Makhov, S. V., Bobryshev, B. L.,*

Moiseev, S. M. (2011). Fyzyko-khymycheskye protsessy rafynirovaniia aliumyniia y eho spлавov: monohrafyia. Moscow: Teplotekhn, 490. **4.** *Khrychykov, V. E., Meniailo, E. V.* (2010). Lyteinoe proyzvodstvo chernykh y tsvetnykh metallo: Uchebnoe posobyе. Dnepropetrovsk: NMetAU, 89. **5.** *Mazur, V. Y., Mazur, A. V.* (2009). Vvedeniye v teoriyu spлавov: monohrafyia. Dnepropetrovsk: Lyra LTD, 264. **6.** *Tiller, W. A., Jackson, K. A., Rutter, J. W., Chalmers, B.* (1953). The Redistribution of Solute Atoms During the Solidification of Metals. Acta Metallurgica, Vol. 1, 428–437. **7.** *Flemynhs, M. S.* (1977). Protssy zatverdevaniya: Per. s anhl. Moscow: Myr, 423. **8.** *Burton, J. A., Prim, R. C., Slichter, F. P.* (1953). The Distribution of Solute in Crystals Grown from the Melt. I. Theoretical. Journal of Chemical Physics, Vol. 21, No. 1953, 1987–1994. **9.** *Lakomskyi, V. Y.* (1992). Vzaymodeistviye dyatomnykh hazov s zhydkymy metallamy pry vysokykh temperaturakh: monohrafyia. Kiev: Naukova dumka, 231. **10.** *Pfann, V. D.* (1962). Pereraspredeleniye rastvorymykh pryemsei pry krystallyzatsyy. Sb. "Zhydkyye metalli y ykh zatverdevaniye": Per. s anhl. Moscow: Metallurhyzdat, 248–272.

Надійшла (received) 16.11.2015

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Трегубенко Геннадій Николаевич – доктор технічних наук, Національна металургічна академія України, професор кафедри Електрометалургії, пр. Гагарина, 4, г. Дніпропетровськ, Україна, 49600.

Трегубенко Геннадій Миколайович – доктор технічних наук, Національна металургічна академія України, професор кафедри Електрометалургії, пр. Гагарина, 4, м. Дніпропетровськ, Україна, 49600.

Tregubenko Gennady – Doctor of Technical Sciences, National Metallurgical Academy of Ukraine, professor of Electrometallurgy, Gagarin ave., 4, Dnepropetrovsk, Ukraine, 49600.

УДК 546.72.76.46:54-36

А. В. ЛУЦАСЬ, І. П. ЯРЕМІЙ, М. П. МАТКІВСЬКИЙ, С. І. ЯРЕМІЙ

ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОДУКТІВ СУМІСНОГО ОСАДЖЕННЯ МАГНІЙ, ФЕРУМ ТА ХРОМ ГІДРОКСИДІВ І ПРОДУКТІВ ЇХ ТЕРМІЧНОГО РОЗКЛАДУ

З водних розчинів відповідних хлоридів синтезовано ферит-хроміти магнію системи $Mg(Fe_xCr_{2-x})O_4$. Показано, що шляхом співосадження утворюється гомогенна, реакційно здатна фаза гідроксидів з високим значенням питомої поверхні, величина якої збільшується з підвищенням вмісту хрому в системі. Частки продуктів сумісного осадження мають губчасту форму, а в спечених феритах характеризуються неправильною формою та значною кількістю як дуже великих, так і дуже малих часток. Колір співосаджених гідроксидів монотонно змінюється від сіро-голубого до коричневого, а порошоків-феритів від гірчичного до червоно-коричневого по мірі збільшення вмісту феруму.

Ключові слова: ферит, магнію ферит-хроміти, шпінель, магнію заліза хрому гідроксиди, метод осадження, питома поверхня.

Вступ. Шпінельні тверді розчини на основі феритів і хромітів володіють великим спектром технологічних властивостей і використовуються в якості магнітних, ізоляційних матеріалів, а також як каталізатори хімічних процесів. В літературі приділяється велика увага вивченню властивостей речовини в нанорозмірних системах та оптимізації процесу одержання шпінелей з великою питомою поверхнею і заданими властивостями [1-9].

Магнію ферит-хроміти є основою для створення перспективних і високотехнологічних феритових матеріалів довгохвильової частини НВЧ-діапазону [10-12], у зв'язку з чим закономірності їх формування залишаються об'єктом всестороннього вивчення. Чутливість властивостей НВЧ-феритів до залишкових хімічних неоднорідностей [13] спонукає до вивчення фізико-хімічних характеристик феритів, одержаних різними методами.

Досягти високої хімічної однорідності феритів можна за допомогою методу сумісного осадження гідроксидів металів. Крім того, цей метод зазвичай дає можливість суттєво скоротити час термообробки та знизити температуру процесу феритизації.

Проте, технологічно контрольовані властивості систем, отриманих таким методом, відрізняються від властивостей феритів, синтезованих традиційним керамічним методом.

Таким чином, метою даної роботи було визначення питомої поверхні продуктів сумісного осадження гідроксидів та одержаних з них магнію ферит-хромітів.

Отримання та аналіз сумісного осадження гідроксидів. Для дослідження було синтезовано ряд ферит-хромітів магнію із загальною формулою $Mg(Fe_xCr_{2-x})O_4$, де $x = 0,8; 1,2; 1,6$ [14, 15].

Аналіз отриманих зразків проводився на X-променевому флуоресцентному спектрометрі ARL 9800 та дифрактометрі ДРОН-3. Флуоресцентний аналіз показав, що в зразках наявні тільки метали Mg , Fe та Cr . Методом X-променевого структурного аналізу встановлено, що отримані порошки (продукт сумісного осадження магнію, ферум та хром гідроксидів системи $Mg(Fe_xCr_{2-x})O_4 \times nH_2O$) є настільки дрібнокристалічними, що класичної дифрактограми з

інтенсивними рефлексами від них практично не одержується, і їх можна вважати аморфними з погляду X-променевого аналізу.

Зазначений структурний стан та низька, порівняно з твердофазним синтезом, температура формування шпінельної фази вказують на те, що співосаджені гідроксиди вже не можна розглядати як просту суміш речовин. Літературні [16] та одержані нами експериментальні дані, такі як формування кристалічних фаз із структурою близькою до шпінелі в процесі осадження, принципова різниця перебігу процесів термічного розкладу співосаджених гідроксидів та механічних сумішей оксидів, підтверджують наявність хімічної взаємодії гідроксидів при співосадженні. Можна припустити, що будова хімічної сполуки, яка утворюється при сумісному осадженні магній, ферум та хром гідроксидів, характеризується полімерною матрицею, в якій хром(III)-йони поступово замінюватимуться на ферум(III)-йони, за рахунок чого зв'язки полімерної матриці із підвищенням вмісту феруму ставатимуть слабші, і, як наслідок, знижуватиметься температура шпінелеутворення.

За допомогою наведеної моделі продукту співосадження можна пояснити низькотемпературне утворення шпінелей при термічному розкладі співосаджених гідроксидів. В такій сполуці магній, ферум та хром гідроксиди добре контактують між собою, що полегшує формування кристалічної ґратки фериту та унеможливує утворення часток оксидів MgO , Fe_2O_3 та Cr_2O_3 . Особливо сприятливими мають бути умови для утворення феритової фази безпосередньо при дегідратації співосаджених гідроксидів, якщо їх склад близький до складу фериту, оскільки за такої умови ґратка фериту може виникнути в результаті незначного зсуву йонів. Якщо ж система містить надлишкову кількість йонів магнію, феруму чи хрому порівняно із складом фериту, середня відстань, на яку дифундують йони металу та оксид-йони в процесі утворення кристалів, збільшується, а утворення фериту, відповідно, утруднюється. Це підтверджується також результатами структурного аналізу синтезованих за аналогічних умов зразків нестехіометричного складу, в яких фериту тільки близько 10 %, а решта – оксиди.

Таким чином, у випадку одержання магній ферит-хромітів методом гідроокисного співосадження швидкість процесу формування шпінельної фази сильно зростає не тільки через високу активність вихідної сполуки, чому сприяють такі чинники, як

неоднакова хімічна (кислото-основна) природа, недосконалість структури та її висока дисперсність, шарувата ґратка та наявність в ній молекул міжшарової води, що полегшує дифузію катіонів, а також внаслідок того, що співосаджені гідроксиди являють собою проміжні продукти синтезу кінцевих феритних фаз, і їх можна розглядати як попередників останніх. Аморфність гідроксидів з погляду X-променевого аналізу пов'язана з хаотичним розташуванням різних за довжиною полімерних ланцюгів та малими лінійними розмірами зазначених вище ділянок полімерної матриці.

Описана структура осаджених гідроксидів проявляється у дисперсності частинок та значній питомій поверхні зазначеного матеріалу. Питому поверхню співосаджених гідроксидів вимірювали методом адсорбції азоту при температурі рідкого азоту і подальшому розрахунку питомої поверхні по методу БЕТ. Встановлено, що в зразках (продуктах сумісного осадження гідроксидів) вільна поверхня становить близько 130-170 m^2/g , а заміщення іонів хрому іонами феруму приводить до деякого зменшення величини вільної поверхні (рис. 1).

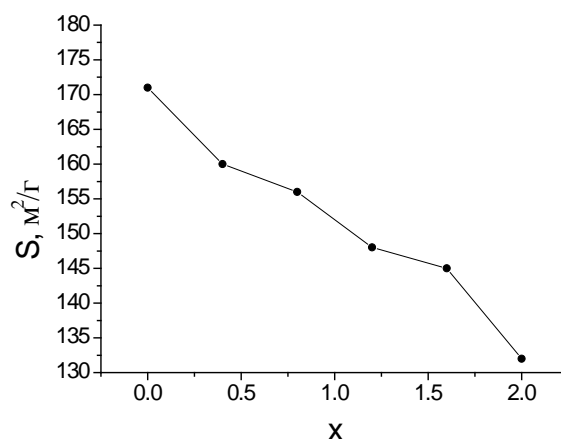


Рис. 1 – Залежність величини вільної поверхні продуктів сумісного осадження гідроксидів від вмісту феруму x .

Форму часток зразків-продуктів сумісного осадження та їх гранулометричний склад видно з мікрофотографій (рис. 2, а-д). Зокрема, добре видно, що вони на рахунок вище описаної специфіки будови та агломерації мають губчасту форму, а також фази двох кольорів.

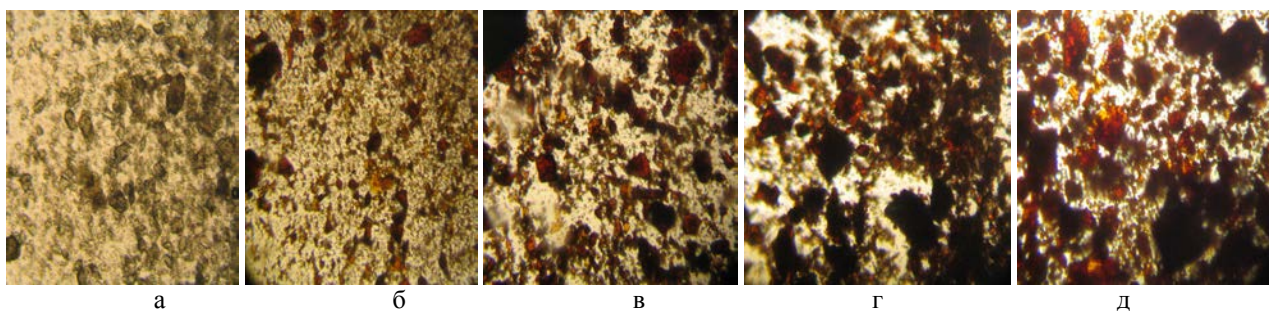


Рис. 2 – Мікрофотографії зразків-продуктів сумісного осадження гідроксидів магнію, феруму та хрому системи $Mg(Fe_xCr_{2-x})O_4 \cdot nH_2O$: а - $x=0$; б - $x=0,8$; в - $x=1,2$; г - $x=1,6$; д - $x=2$

Аналіз ферит-шпінелей, отриманих із сумісного осадження гідроксидів. Продукти сумісного осадження гідроксидів магнію, феруму та хрому системи $Mg(Fe_xCr_{2-x})O_4 \cdot nH_2O$ спікали при 1273°K протягом 4 год. з наступним загартовуванням на повітрі.

Аналіз отриманих зразків проводився на X-променевому дифрактометрі ДРОН-3 з використанням *Cu* аноду та флуоресцентному спектрометрі ARL 9800, в якому є вбудований дифрактометр та використовувалися *Rh* та *Mo* аноди. В даному приладі інтегровані два методи: X-променеві флуоресцентний та дифракційний аналіз (рис. 3, а), що давало можливість легко визначити як хімічний так і фазовий склад. До отриманих на установці ARL 9800 дифрактограм можна використати повнопрофільний аналіз за методом Рітвельда, якісний і кількісний аналіз, визначення розміру блоків, аналіз текстури та залишкових напруг і т.п.

Якісний фазовий аналіз зразків показав, що вони у всьому діапазоні заміщень є однофазними. На дифрактограмах спечених зразків, з ростом ступеня заміщення ферумом x спостерігається зміщення піків, що пов'язано з ростом сталої ґратки від 0,833 нм до 0,838 нм і пояснюється входженням внаслідок заміщення у кристалічну ґратку іонів феруму з більшим іонним радіусом (рис. 3, а, б).

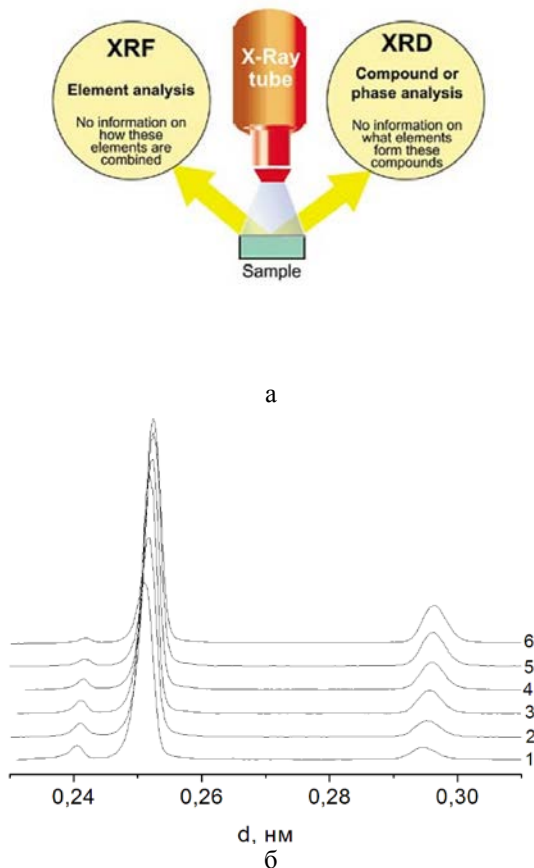


Рис. 3 – Схема роботи установки ARL 9800 (а), та фрагменти отриманих з її допомогою дифрактограм одержаних зразків шпінелі $Mg(Fe_xCr_{2-x})O_4$ (б): 1 - $x=0$; 2 - $x=0,4$; 3 - $x=0,8$; 4 - $x=1,2$; 5 - $x=1,6$; 6 - $x=2$

Підвищення температури розкладу твердих розчинів гідроксидів від ≈ 383 К супроводжується різким зменшенням питомої поверхні, яка при 1273 К скла-

дає тільки менше десять відсотків від величини поверхні, що відповідає не спеченим продуктам сумісного осадження (рис. 4). Таким чином, «гідроксидні» матеріали мають велику питому поверхню (та пов'язану з нею надлишкову вільну енергію) тільки при низьких температурах (573-873 К). Варто зауважити, що спікання не змінило загальної тенденції, яка полягає в тому, що питома поверхня як співосаджених гідроксидів, так і спечених шпінелей є більшою у зразках із меншим вмістом феруму.

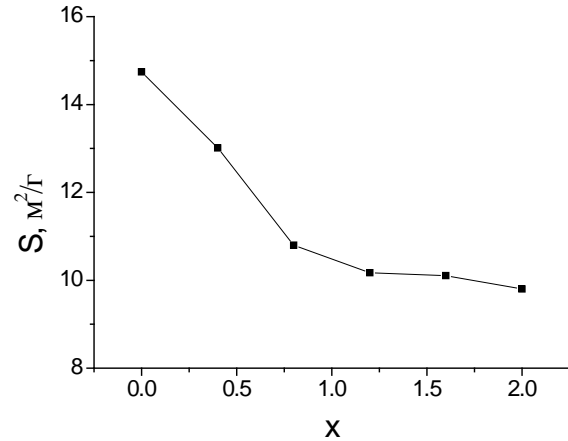


Рис. 4 – Залежність величини вільної поверхні феритів системи $Mg(Fe_xCr_{2-x})O_4$, одержаних методом гідроксидно-го співосадження, від вмісту феруму x .

З ростом ступеня заміщення ферумом x на дифрактограмах спечених зразків спостерігається зменшення інтегральної ширини головних брегівських піків (рис. 5), що пов'язано із зменшенням дисперсності порошоків.

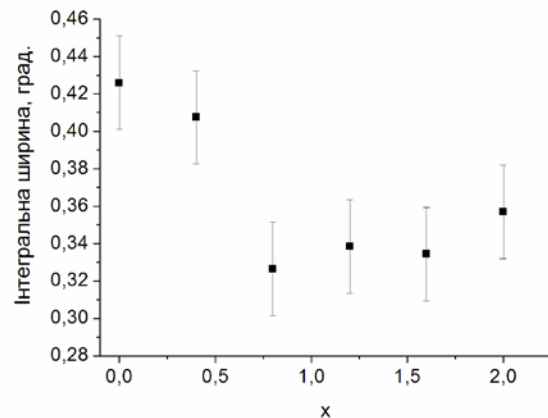


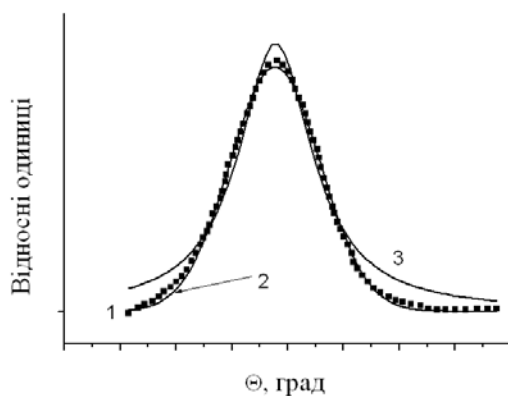
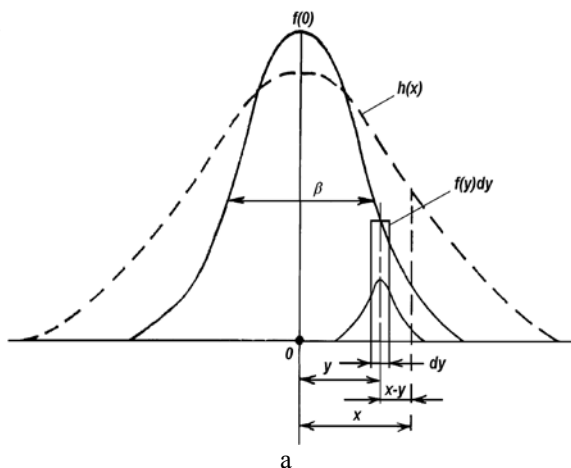
Рис. 5 – Зміна інтегральної півширини лінії (311) в залежності від вмісту феруму x

Як відомо, форма лінії досліджуваного зразка визначається фізичним (дифракційним) і геометричним (інструментальним) уширенням. Вплив обох факторів є неадитивним, оскільки кожна ділянка кривої істинного дифракційного уширення під впливом геометричних умов зйомки розвивається за однаковим законом $g(y)$. Результуюча крива розподілу інтенсивності $h(x)$ виражається інтегральним співвідношенням (згорткою):

$$h(x) = \int_{-\infty}^{\infty} f(y)g(x-y)dy, \quad (1)$$

де $f(x)$ – функція істинного дифракційного уширення, обумовлена фізичним станом зразка, $h(x)$ і $g(y)$ – функції розподілу інтенсивності для досліджуваного та еталонного зразка відповідно. Схематично розмиття кривої фізичного уширення $f(x)$ в результаті симетричного уширення представлено на рис 6. Функція $g(y)$ знаходиться шляхом знімання КДВ від ідеального монокристалу, в якому фізичні фактори є несуттєві. Позначивши через B , β і b інтегральні ширини кривих $h(x)$, $g(x)$ і $f(x)$ і апроксимуючи функції $g(x)$ і $f(x)$ у вигляді функції Лоренца або Коші $1/(1+\alpha x^2)$ одержується співвідношення $B = \beta + b$, а якщо краще підходить функція Гаусса, то $B^2 = \beta^2 + b^2$ [17].

Для точнішого виділення кривої істинного дифракційного уширення використовувався метод Стокса [18]. Визначена з використанням методу Стокса крива істинного дифракційного уширення для піка, що відповідає міжплосинній відстані 0,296 нм була наближена функціями Лоренца та Гаусса. Як видно з рис. 6, а, б, наближення функцією Гаусса є значно кращим, тому використовувалися квадратичні формули.



б

Рис. 6 – Розмиття кривої фізичного уширення $f(x)$ в результаті: а – геометричного уширення; б – апроксимація кривої істинного дифракційного уширення

Під уширенням, обумовленим фізичним станом зразка, розуміється уширення лінії пов'язане з дефектами кристалічної структури II класу (за М. А. Кривоглазом). Ці дефекти, дислокації та їх сукупності характеризуються дальнодіючими полями зміщень атомів з вузлів кристалічної ґратки. У випадку, коли уширення дифракційної лінії спричинене лише мікронапругами, інтегральна ширина лінії визначається як $n = 4\varepsilon \operatorname{tg} \theta$, де ε – середнє значення модуля відносної деформації; коли уширення спричинене тільки розмірами кристалів чи блоків – інтегральна ширина $m = 0,94\lambda / L \cos \theta$ (формула Шеррера), де L – середній лінійний розмір областей когерентного розсіювання в напрямі нормалі до відбиваючої площини. Коли уширення викликане одночасним впливом мікронапруг і областей когерентного розсіювання, то, у випадку наближення функцією Лоренца або Коші, інтегральна ширина $b = n + m$, а у випадку наближення функцією Гаусса – $b^2 = n^2 + m^2$.

Для підвищення точності визначення параметрів порошків також використовувався інтерполяційний методом Вільямсона-Холла, згідно якого будувалася залежність $\beta \cos \theta$ від $\sin \theta$ рівняння

$$\beta \cos \theta = \frac{\lambda}{D} + 4\varepsilon \sin \theta \quad (\text{якщо наближення проводилось}$$

функціями Лоренца або Коші) або рівняння

$$\beta^2 \cos^2 \theta = \left(\frac{\lambda}{D}\right)^2 + (4\varepsilon \sin \theta)^2 \quad (\text{якщо наближення}$$

здійснювалося функцією Гаусса). Якщо лінійно апроксимувати отриману залежність, то кут нахилу прямої буде пропорційний величині мікронапруг (ε чи ε^2), а перетин прямої з віссю ординат – величину, обернено пропорційну розміру блоків (D чи D^2).

Як показали розрахунки, апроксимаційна пряма на графіку лежить майже горизонтальною, тому мікронапругами в матеріалі нехтувалося, і вважалося, що фізичне уширення пов'язане тільки з розмірами кристалів. Це допущення є обґрунтованим, бо досліджувані зразки в процесі виготовлення проходили відповідну термообробку (спікання). Провівши відповідні розрахунки як за методом Шеррера, так і за методом Вільямсона-Холла, було визначено середній розмір блоків L , залежність якого від вмісту феруму представлена на рис. 7. При розрахунку за формулою Шеррера була невелика відмінність (до 10 %) в розмірах блоків із результатами методу Вільямсона-Холла, що зумовлено тим, що у першому випадку до розрахунку бралися окремі піки, а метод Вільямсона-Холла враховує всі рефлекси.

Якщо вважати, що частинки спеченої фази мають сферичну форму, то середній діаметр частинок d_c і питома поверхня S_n пов'язані співвідношенням $d_c = \frac{6}{\rho S_n}$, де ρ – густина шпінелі. Вважаючи, що

частки шпінелі складаються з одного блоку, тобто $d_c = L$, було теоретично розраховано питому поверхню, залежність якої від вмісту феруму представлено на рис. 8 (крива б). Як бачимо, значення питомої поверхні, визначеної хроматографічним методом в діапазоні $x=0,6 \div 1,6$ практично співпадає з теоретично розрахо-

ваними значеннями, тобто частки дійсно складаються з одного блоку. Значення теоретично розрахованої питомої поверхні в діапазонах $x < 0,6$ та $x > 1,6$ вказує на те, що частина часток складається як мінімум з двох блоків.

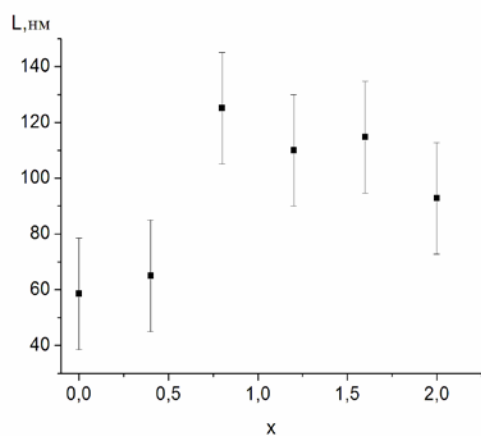


Рис. 7 – Розмір блоків у феритах системи $Mg(Fe_xCr_{2-x})O_4$ в залежності від вмісту феруму.

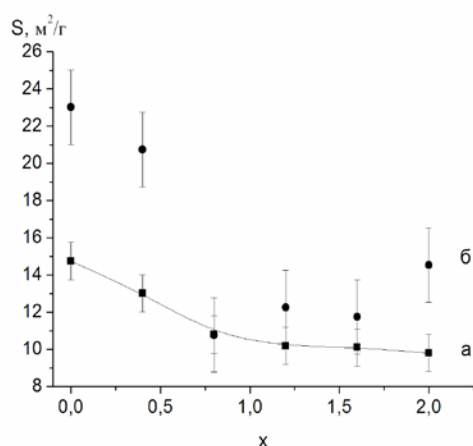
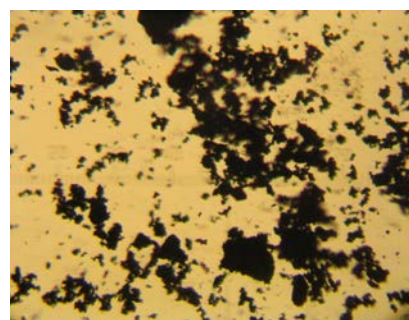


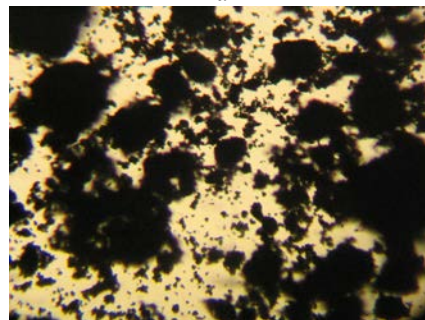
Рис. 8 – Залежність поверхні спечених феритів системи $Mg(Fe_xCr_{2-x})O_4$, визначеної хроматографічним методом (крива а) та теоретично розрахованої за середніми розмірами блоків (крива б) залежності від вмісту феруму.

Дані поляризаційно-інтерференційної мікроскопії (збільшення в 480 разів) свідчать про те, що ферити одержані методом гідроокисного співосадження при мінімальних температурах формування шпінелі (573-873°K), мають надзвичайно малий розмір часток (0,01-0,2 мк) без чітко вираженої кристалічної огранки, які характеризуються неправильною формою та схильні до утворення агрегатів (рис. 9).

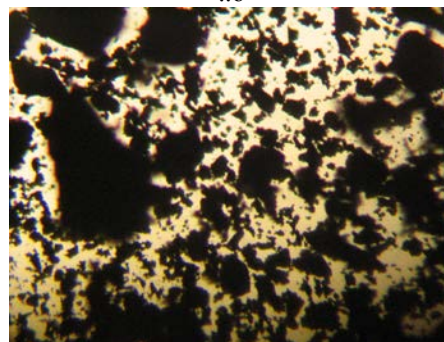
Підвищення температури обробки до 1273°K супроводжується різким збільшенням розміру часток до 5-10 мк. Однак поряд з крупними частками в значній кількості залишаються частки розміром $\approx 0,005-0,01$ мкм [19]. Порівняння одержаних різними методами даних про розмір часток, ще раз підтверджує, що гранулометричний склад часток спечених ферит-шпінелей є дуже неоднорідним.



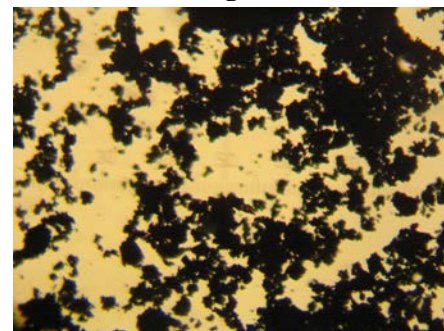
а



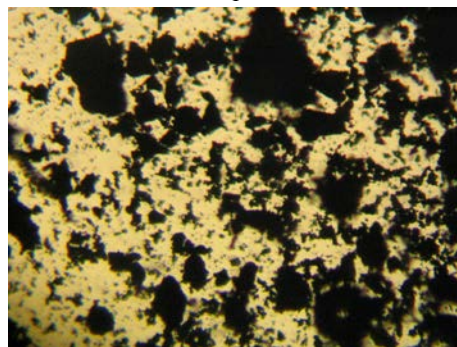
..б



в



г



д

Рис. 9 – Мікрофотографії зразків-феритів системи $Mg(Fe_xCr_{2-x})O_4$ одержаних методом гідроокисного співосадження: а - $x=0$; б - $x=0,4$; в - $x=0,8$; г - $x=1,2$; д - $x=1,6$

Це явище можна пояснити тим, що процес розкладу термічно нестабільних гідроксидів відбувається в максимально нерівноважних умовах та призводить до утворення максимально нерівноважного продукту з великою дисперсністю. Більш того, енергетична нерівноцінність окремих часток, якої не уникнути в нерівноважних умовах формування фази, сприяє агрегації найбільш активних з них з утворенням порошкоподібної фази, що складається з дуже великих часток (результат взаємодії часток, що володіють в момент формування шпінелі максимальною активністю поверхні) і дуже дрібних часток з числа найменш активних в момент розкладу [19].

Висновки. Таким чином, проведене дослідження показало, що поверхня сумісно осаджених гідроксидів ($171 \div 132,9 \text{ м}^2/\text{г}$) та спечених при температурі 1273°K ферит-хромітів ($14,3 \div 9,8 \text{ м}^2/\text{г}$) в системі $\text{Mg}(\text{Fe}_x\text{Cr}_{2-x})\text{O}_4$ ($0 \leq x \leq 2$) збільшується з підвищенням вмісту хрому в системі.

Розміри блоків у зразках отриманих методом гідроокисного співосадження знаходяться в межах 50–130 нм.

В діапазоні $x=0,6 \div 1,6$ частки спечених феритів складаються практично з одного блоку, тоді як в діапазонах $x < 0,6$ та $x > 1,6$ частина часток складається з двох чи більше блоків.

Частки зразків-продуктів сумісного осадження за рахунок наявності полімерних ланцюгів та полімерної матриці мають губчасту форму. В спечених феритах частки характеризуються неправильною формою та схильні до утворення агрегатів, результатом чого є наявність як дуже великих, так і дуже малих часток неправильної форми.

Також, необхідно відмітити, що колір співосаджених гідроксидів монотонно змінюється від сіро-голубого до коричневого, а порошок-феритів від гірчичного до червоно-коричневого по мірі збільшення вмісту феруму.

Список літератури: 1. Иванов, В. В. Феррит-хромиты переходных элементов: синтез, структура, свойства [Текст] / В. В. Иванов, А. К. Ульянов, Н. П. Шабельская. – М.: Академия естествознания. – 94 с. 2. Шабельская, Н. П. Исследование процессов образования хромитов MCr_2O_4 ($M = \text{Co}, \text{Ni}, \text{Zn}, \text{Cd}, \text{Mg}$) [Текст] / Н. П. Шабельская, М. В. Таланов, И. Н. Захарченко и др. // Известия вузов. Химия и химическая технология. – 2013. – Т. 56, Вып. 8. – С. 59–62. 3. Шабельская, Н. П. О влиянии природы катиона на процесс синтеза шпинели [Текст] / Н. П. Шабельская, И. Н. Захарченко, А. К. Ульянов // Известия вузов. Химия и химическая технология. – 2014. – Т. 57, Вып. 8. – С. 23–26. 4. Шабельская, Н. П. О механизме образования ферритов-хромитов никеля в ходе топохимического процесса [Текст] / Н. П. Шабельская, И. Н. Захарченко, А. К. Ульянов // Современные наукоемкие технологии. – 2014. – № 3. – С. 150–152. 5. Щепеткин, А. А. Кристаллохимические особенности феррошпинелей систем $\text{Mg}-\text{M}-\text{Fe}-\text{O}$ ($M = \text{Cr}, \text{Al}$) [Текст] / А. А. Щепеткин // Неорганические материалы. – 2004. – Т. 40, № 4. – С. 495–497. 6. Комлев, А. А. Формирование наночастиц железо-магниевого шпинели при дегидратации соосаженных гидроксидов магния и железа [Текст] / А. А. Комлев, С. Илхан // Наносистемы: физика, химия, математика. – 2012. – Т. 3 (4). – С. 114–121. 7. Комлев, А. А. Получение и магнитные свойства нанокристаллических порошков на основе твердых растворов $\text{MgFe}_2\text{O}_4 \cdot n\text{Fe}_2\text{O}_3$ [Текст] / А. А. Комлев // Журнал прикладной химии. – 2014. – Т. 87. – № 11. – С. 1564. 8. El-Sheikh, S. M. Novel low temperature synthesis of spinel nano-magnesium chromites from secondary resources [Text] / El-S.M. Sheikh, M. Rabbah // Thermochimica Acta. – 2013. – V. 568. – P. 13–

19. 9. Pisarska-Piess, B. B. The thermal decomposition of certain metal chromates(VI) [Text] / B. B. Pisarska-Piess, Z. Gontarz // Polish Journal of Chemistry. – 1998. – V. 72. – № 9. – P. 2067–2078. 10. Рабкин, Л. И. Ферриты. Строение, свойства, технология производства. [Текст] / Л. И. Рабкин С. А. Соскин, Б. Ш. Эпштейн; Энергия, 1968. – 384 с. 11. Адаменко, О. М. Кристаллохимические исследования природных хромшпинелидов та їх перетворення при нагріванні [Текст] / О. М. Адаменко, С. С. Лісняк, С. М. Немий; Доповіді НАН України. – 1999. – № 5. – С. 150–153. 12. Ерастова, А. П. Определение катионного распределения и кислородного параметра в системе $\text{MgFe}_{2-y}\text{Cr}_y\text{O}_4$ [Текст]: сб. науч. тр. / А. П. Ерастова, Ю. Г.

Саксонов // Ферриты и бесконтактные элементы. – Минск: Изд-во ак. наук БССР, 1963. – С. 163–175. 13. Третьяков, Ю. Д. Физико-химические основы термической обработки ферритов [Текст] / Ю. Д. Третьяков, Н. Н. Олейников, В. А. Граник. – МГУ, 1973. – 203 с. 14. Битнева, А. В. Феритообразование при термообработке системы гидроксидов магния, железа та хрому [Текст] / А. В. Битнева // Физика і хімія твердого тіла. – 2006. – Т. 7, № 1. – С. 97–101. 15. Пат. 86201 (Україна), МПК С01G 49/00, С01F 5/00. Спосіб одержання ферит-хромітів магнію шляхом сумісного осадження гідроксидів [Текст] / Луцас А. В., Матківський М. П. – Прик. нац. ун-т. – № 200512223. – Заявл. 19.12.05. Опубл. 10.04.2009. – Оф. бюл. "Промислова власність". – № 7. 16. Белоус, А. Г. Ферритообразование при термообработке системы гидроксидов железа, никеля и цинка [Текст] / А. Г. Белоус, Е. В. Пашкова, В. А. Елианский // Укр. хим. журнал. – 2001. – Т. 67, № 1. – С. 11–15. 17. Горелик, С. С. Рентгенографический и электронно-оптический анализ [Текст] / С. С. Горелик, Ю. А. Скаков, Л. Н. Расторгуев – М.: МИСИС, 1994. – 327 с. 18. Палатник, Л. С. Структура и физические свойства твердых тел [Текст] / Л. С. Палатник – М.: Высшая школа, 1983. 19. Логинова, И. Я. Активное состояние продуктов разложения солей и его влияние на формирование керамической структуры и магнитные свойства ферритов [Текст]: сб. науч. тр. / И. Я. Логинова, Ю. Д. Третьяков // Магнитные и кристаллохимические исследования ферритов. – М.: Изд-во МГУ, 1971. – С. 239–271.

Bibliography (transliterated): 1. Ivanov, V. V., Ul'janov, A. K., Shabel'skaja, N. P. Ferryt-khromityu perekhodnykh elementov: sintez, struktura, svoystva. Moscow: Akademiya estestvoznaniya, 94. 2. Shabel'skaja, N. P., Talanov, M. V., Zaharchenko, I. N. (2013). Issledovanie processov obrazovaniya khromitov MCr_2O_4 ($M = \text{Co}, \text{Ni}, \text{Zn}, \text{Cd}, \text{Mg}$). Izvestija vuzov. Khimija i khimicheskaja tekhnologija, 56 (8), 59–62. 3. Shabel'skaja, N. P., Zaharchenko, I. N., Ul'janov, A. K. (2014). O vlijanii prirody kationa na process sinteza shpineli. Izvestija vuzov. Khimija i khimicheskaja tekhnologija, 57 (8), 23–26. 4. Shabel'skaja, N. P., Zaharchenko, I. N., Ul'janov, A. K. (2014). O mekhanizme obrazovaniya ferritov-khromitov nikelja v hode topo-himicheskogo processa. Sovremennye naukoemkie tekhnologii, 3, 150–152. 5. Shhepetkin, A. A. (2004). Kristallohimicheskie osobennosti ferroshepinelej system $\text{Mg}-\text{M}-\text{Fe}-\text{O}$ ($M = \text{Cr}, \text{Al}$). Neorganicheskie materialy, 40 (4), 495–497. 6. Komlev A. A., Ilkhan, S. (2012). Formirovanie nanochastich zhelezo-magnejovoj shpineli pri degidracii soosazhdennykh gidroksidov magnija i zheleza. Nanasistemy: fizika, khimija, matematika, 3 (4), 114–121. 7. Komlev, A. A., Semenova, A. S. (2014). Poluchenie y mahnytnye svoystva nanokristallicheskykh poroshkov na osnove tverdykh rastvorov $\text{MgFe}_2\text{O}_4 \cdot n\text{Fe}_2\text{O}_3$. Zhurnal prikladnoj khymy, 87 (11), 1564. 8. El-Sheikh, S. M., Rabbah, M. (2013). Novel low temperature synthesis of spinel nano-magnesium chromites from secondary resources. Thermochimica Acta, 568, 13–19. 9. Pisarska-Piess, B. B., Gontarz, Z. (1998). The thermal decomposition of certain metal chromates(VI). Polish Journal of Chemistry, 72, 9, 2067–2078. 10. Rabkin, L. I., Soskin, S. A., Jepshtejn, B. Sh. (1968). Ferrity. Stroenie, svoystva, tehnologija proizvodstva. Jenergiya, 384. 11. Adamenko, O. M., Lisnjak, S. S., Nemij, S. M. (1999). Kristalokvazihimichni doslidzhenja prirodni hromshpinelidiv ta yh peretvorennja pri nagrivanii. Dopovidi NAN Ukraini, 5, 150–153. 12. Erastova, A. P., Saksonov, Ju. G. (1963). Issledovanie strukturyh izmenenij v magnievykh khromitakh-ferritakh. Ferrity i beskontaktnye jelementy. Minsk: Izd-vo ak. nauk BSSR, 152–162. 13. Tretjakov, Ju. D., Olejnikov, N. N., Granik, V. A. (1973). Fiziko-khimicheskie osnovy termicheskoy obrabotki ferritov. MGU, 203. 14. Bitniva, A. V. (2006). Ferytoutvorennia pry termoobrobtsi systemy hidroksydiv mahniuu, zaliza ta khromu. Fizyka i khimija tverdoho tila, 7 (1), 97–101. 15. Lutas, A. V., Matkivskij, M. P. (2009). Patent 86201 (Ukraina), МПК S01G 49/00, С01F 5/00 / Sposib oderzhannia feryt-khromitiv mahniuu shliakhom sumisnoho osadzhenia hidroksydiv. №200512223. Zayavl.

19.12.05. Opubl. 10.04.2009. Of. biul. "Promyslova vlasnist", № 7. **16.** Belous, A. H., Pashkova, E. V., Elshanskyi, V. A. (2001). Ferrytoobrazovanye pry termoobrabotke systemy hydroksydov zheleza, nykelia i tsynka. Ukr. khym. zhurnal, 67 (1), 11 – 15. **17.** Horelyk, S. S., Skakov, Yu. A., Rastorhiev, L. N. (1994). Renthenohrafycheskyi i elektronno-optycheskyi analiz. Moscow: MYSYS. – 327. **18.** Palatnyk,

L. S. Struktura i fizicheskie svoistva tverdykh tel. (1983). Moscow: Vysshaia shkola. **19.** Loginova, I. Ja., Tret'jakov, Ju. D.; Belov, K. P., Tret'jakov, Ju. D. (Eds.) (1971). Aktivnoe sostojanie produktov razlozhenija solej i ego vlijanie na formirovanie keramicheskoi struktury i magnitnye svojstva ferritov. Magnitnye i kristallohimicheskie issledovanija ferritov. Moscow: Izd-vo MGU, 239–271.

Надійшла (received) 16.11.2015

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Луцась Анна Віталіївна – кандидат хімічних наук, Прикарпатський національний університет ім.В.Стефаніка, доцент кафедри “Неорганічної та фізичної хімії”; вул. Шевченка, 57, м. Івано-Франківськ, Україна, 76018; e-mail: alutsas@gmail.com.

Луцась Анна Віталіївна – кандидат химических наук, Прикарпатский национальный университет им. В. Стефаніка, доцент кафедры “Неорганической и физической химии”; ул. Шевченка, 57, г. Івано-Франковск, Украина, 76018; e-mail: alutsas@gmail.com.

Lutsas Anna – candidate of chemical sciences, associate Professor, Vasyl Stefanyk Precarpathian National University; address: 57 Shevchenko str., Ivano-Frankivsk, Ukraine, 76018; e-mail: alutsas@gmail.com.

Яремій Іван Петрович – доктор фізико-математичних наук, Прикарпатський національний університет ім. В. Стефаніка, професор кафедри “Матеріалознавства і новітніх технологій”; вул. Шевченка, 57, м. Івано-Франківськ, Україна, 76018; e-mail: yaremiy@rambler.ru.

Яремий Иван Петрович – доктор физико-математических наук, Прикарпатский национальный университет им. В. Стефаніка, професор кафедры “Материалознавства и новейших технологий”; ул. Шевченка, 57, г. Івано-Франковск, Украина, 76018; e-mail: yaremiy@rambler.ru.

Ivan Yaremiy – doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Vasyl Stefanyk Precarpathian National University; address: 57 Shevchenko str., Ivano-Frankivsk, Ukraine, 76018; e-mail: yaremiy@rambler.ru.

Матківський Микола Петрович – кандидат технічних наук, Прикарпатський національний університет ім. В.Стефаніка, доцент Кафедри “Неорганічної та фізичної хімії”, заступник директора з навчальної роботи Інституту Природничих Наук; вул. Шевченка, 57, м. Івано-Франківськ, Україна, 76018;

Матковский Николай Петрович – кандидат технических наук, Прикарпатский национальный университет им. В. Стефаніка, заместитель директора по учебной работе Института Естественных Наук, доцент кафедры “Неорганической и физической химии”; ул. Шевченка, 57, г. Івано-Франковск, Украина, 76018; e-mail: pryr_dep@pu.if.ua.

Mykola Matkivskyi – candidate of technical sciences, associate professor, Vasyl Stefanyk Precarpathian National University; address: 57 Shevchenko str., Ivano-Frankivsk, Ukraine, 76018; e-mail: Pryr_dep@pu.if.ua.

Яремій Софія Іванівна – кандидат фізико-математичних наук, Івано-Франківський національний медичний університет, асистент кафедри медичної інформатики, медичної і біологічної фізики; вул. Галицька, 2, м. Івано-Франківськ, 76018; e-mail: Sofiya.Yaremiy@rambler.ru

Яремий София Ивановна – кандидат физико-математических наук, Івано-Франковский национальный медицинский университет, ассистент кафедры медицинской информатики, медицинской и биологической физики; ул. Галицкая, 2, г. Івано-Франковск, 76018; e-mail: Sofiya.Yaremiy@rambler.ru.

Yaremiy Sofiya – candidate of Physical and Mathematical Sciences, Ivano-Frankivsk National Medical University, assistant Department of Medical Informatics, Medical and Biological Physics; addresses: 76018, Ivano-Frankivsk, st. Galytska, 2; e-mail: Sofiya.Yaremiy@rambler.ru.