

СТРУКТУРА ТА МАГНІТНІ ВЛАСТИВОСТІ НАНОКОМПОЗИТІВ МАГНЕТИТ/ДІОКСИД КРЕМНІЮ

Л.С. Семко, П.П. Горбик, М.В. Абрамов, О.Г. Сіренко,
І. В. Дубровін, О.І. Оранська

*Інститут хімії поверхні ім. О.О.Чуйка Національної академії наук України
вул. Генерала Наумова 17, 03680 Київ-164*

Одержано магнітокеровані наноккомпозити на основі магнетиту, модифікованого діоксидом кремнію (при використанні прекурсора тетраметоксисилану). Визначені їх густина, структура та магнітні властивості. Встановлено, що із зростанням маси поверхневого шару SiO_2 в наноккомпозитах від 0 до 0,5 г на 1 г магнетиту відбувається зменшення густини від 4654,8 кг/м^3 (для магнетиту) до 2207,8 кг/м^3 , та значень питомої намагніченості насичення, а також немонотонна зміна коерцитивної сили.

Вступ

Створення нових ефективних магнітних наноматеріалів шаруватого типу з поліфункціональними властивостями – важливий напрямок сучасних нанотехнологій [1]. Значні досягнення в нанотехнологіях привели до створення унікальних магнітних матеріалів, що містять магнітний компонент (ядро) та немагнітну оболонку [2]. Комплекс поліфункціональних властивостей таких матеріалів зумовлює перспективність їх практичного застосування як магнітодіелектриків, для запису інформації з надвисокою густиною, для створення елементів спінової електроніки, каталізаторів, сенсорів, для вирішення ряду задач в біології та медицині. Сьогодні проводяться інтенсивні дослідження з розробки нових магнітних адсорбентів і імуносорбентів, які можуть застосовуватися для очистки крові від вірусів, в онкології, імуноаналізі, сепарації клітин тощо [3 – 11]. Магнітні адсорбенти описані в [7 – 13]. Найбільш поширеними шаруватими наноккомпозитами для магнітних адсорбентів є матеріал магнетит/діоксид кремнію. Для отримання поверхневого шару наноккомпозитів типу $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$ можуть бути використані силікати лужних металів [12, 13] або алкоксиди кремнію. Раніше нами було одержано серію наноккомпозитів на основі магнетиту, модифікованого діоксидом кремнію та досліджені їх структура та властивості [9, 10]. Як прекурсор SiO_2 нами використано тетраетоксисилан (ТЕОС). Встановлено, що мінімальна товщина шару, що перешкоджає окисленню частинок магнетиту, забезпечується модифікуванням 0,15 – 0,18 г SiO_2 на 1 г поверхні магнетиту; 1,5 – 1,8 мг на 1 м^2 магнетиту. Показано, що це покриття SiO_2 на поверхні магнетиту підвищує термічну стабільність наноккомпозитів у порівнянні з немодифікованим магнетитом. Проте структура та властивості таких матеріалів потребує подальшого дослідження.

Магнітні властивості магнітодіелектриків визначаються особливостями намагнічування сукупності окремих частинок і залежать від їх розмірів, форми, взаємного розташування, співвідношення між кількістю магнітної і немагнітної фази, структури поверхневого шару та інших факторів [3, 14 – 16].

В [15, 16] повідомлялось про різну зміну магнітних характеристик його частинок, коли їх розмір змінюється від мікрометричної шкали виміру до нанометричної. Наприклад, частинки поведуть себе як феромагнетики, коли розмір зерен знаходиться в мікрометричному діапазоні, та мають суперпарамагнітні властивості, коли їх розмір зменшується і становить 6 – 15 нм [15, 16]. За даними авторів [16] розмір індивідуального доме-

на магнетиту при кімнатній температурі складає 30 – 50 нм. Отже, перехід від багатодоменної до однодомної структури частинок призводить до зміни магнітних характеристик магнетиту. В процесі модифікування магнітних частинок і створення нанокompatитів відбувається зміна розмірів частинок, характеристик поверхні та утворення немагнітної оболонки. Наявність поверхневого шару модифікатора може впливати на магнітні властивості нанокompatитів. В ряді робіт [7 – 10] описані властивості (в тому числі і магнітні) нанокompatитів на основі нанокристалічного магнетиту, модифікованого полімерами та діоксидом кремнію. Проте, структура та магнітні властивості нанокompatитів на основі магнетиту, покритого діоксидом кремнію, недостатньо вивчені. Потребують більш ретельного дослідження закономірності зміни магнітних характеристик при збільшенні товщини немагнітної зовнішньої оболонки нанокompatитів. Немає чітких уявлень про вплив умов синтезу та типу прекурсорю SiO₂ на структуру та магнітні характеристики нанокompatитів, адже ці відомості вкрай необхідні дослідникам для прогнозування властивостей таких матеріалів та їх практичного застосування.

Мета роботи – вивчити структуру та магнітні властивості нанокompatитів на основі магнетиту, модифікованого діоксидом кремнію, а також визначити вплив маси зовнішнього покриття на його магнітні характеристики. Як прекурсор використано тетраметоксисилан (ТМЕС).

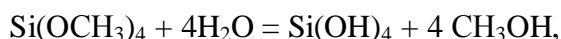
Експериментальна частина

В літературі існує обмаль робіт [10, 17] про застосування ТМЕС як попередника для одержання таких нанокompatитів. Проте умови їх синтезу та процеси перетворення ТМЕС на поверхні магнетиту практично не вивчені. Тому нами розроблена нова методика, яка базується на реакції перетворення ТМЕС в SiO₂. Для її реалізації використано методи золь-гель технології [17], як каталізатор гідролізу ТМЕС застосовано фторид амонію. Як основу для модифікування використано нанокристалічний магнетит.

Виготовлення вищезазначених нанокompatитів включає стадію синтезу магнетиту та безпосередньо шаруватих нанокompatитів. Синтез магнетиту детально описаний нами в [7, 9]. Для його одержання використовували реакцію співсаджень розчинів солей дво- і тривалентного заліза.

Одержання нанокompatитів включає такі основні стадії: попередній гідроліз ТМЕС в суміші метанолу і води, обробка заданої наважки магнетиту продуктами попереднього гідролізу ТМЕС в присутності 0,025 % розчину NH₄F і змішування в ультразвуковому диспергаторі УЗДН-2, сушка в сушильній шафі 10 год при 80 °С, нагрівання в атмосфері аргону (для запобігання окиснення магнетиту) до 400 – 450 °С, витримці за цієї температури 2 год. Вміст SiO₂ на поверхні 1 г магнетиту змінювали від 0 до 0,5 г, кількість каталізатору варіювали від 0,5 до 1,5 г в залежності від об'єму тетраметоксисилану в суміші. Запропонована термообробка необхідна для здійснення процесів полімеризації ТМЕС, видалення побічних продуктів синтезу, а також для наступного процесу руйнування покриття полімеру до (SiO₂)_n, де n < 7 [10]. Відомо, що процеси гідролізу алкоксидів залежать від співвідношення розчинника і води, рН середовища, наявності каталізатора та інших факторів [10, 17]. Наші дослідження показали, що процеси гідролізу відбуваються найбільш ефективно в присутності каталізатора NH₄F.

За умови розробленої нами методики для розрахунку кількості продуктів весь процес гідролізу, поліконденсації і руйнування полімеру можна умовно виразити двома рівняннями:



Однак ці рівняння не відображають утворення проміжних продуктів синтезу. В дійсності процеси гідролізу відбуваються значно складніше з утворенням спочатку $\text{HOSi}(\text{CH}_3)_3$, на подальших стадіях димерів, багатомірів тощо [9, 10, 17].

Для вивчення структури нанокompatитів, ідентифікації утвореної фази Fe_3O_4 , та визначення середніх розмірів їх кристалітів використовували рентгеноструктурний аналіз. Дифрактограми реєстрували на дифрактометрі (ДРОН-4-04) в випромінюванні кобальтового аноду ($\lambda = 1,79021 \text{ \AA}$) з залізним фільтром в віддзеркаленому пучку і геометрії зйомки за Брегом-Брентано.

ІЧ-Фур'є спектроскопічні дослідження нанокompatитів проводилися на ІЧ-Фур'є спектрометрі NEXUS виробництва Thermo Nicolet (США) в діапазоні $400 - 4000 \text{ см}^{-1}$.

Для дослідження магнітних властивостей порошків магнетиту і нанокompatитів на його основі використовували вібраційний магнітометр. Частота й амплітуда вібрації зразка задавалися генератором коливань і підсилювачем низької частоти. Виміри були проведені на частоті 228 Гц при кімнатній температурі. Зразками для досліджень служили сухі розмагнічені порошки, розміщені в циліндричній камері з немагнітного матеріалу. На основі експериментальних результатів будували циклічні залежності значень питомої намагніченості (σ) від напруженості магнітного поля (H) – петлі гістерезису. Використовуючи ці залежності, визначали наступні магнітні характеристики порошків магнетиту та нанокompatитів: питому намагніченість насичення (σ_s) та коерцитивну силу (H_c). Значення питомої намагніченості досліджуваних зразків знаходили за формулою $\sigma_i = (\sigma_{\text{ет}} m_{\text{ет}} / u_{\text{ет}}) (u_i / m_i)$, де σ - питома намагніченість, m – маса, u – електрорушійна сила зразка, індексами «ет» і «i» позначені відповідні характеристики еталонного і досліджуваного зразків. В якості еталонного зразка використовували дисперсний Fe_3O_4 (98 %), виробництва фірми “Nanostructured & Amorphous Materials Inc.” (USA), питома намагніченість насичення (σ_s) при кімнатній температурі якого становила $\sim 8,25 \text{ мкТл} \cdot \text{м}^3 / \text{кг}$.

Густина порошків магнетиту та нанокompatитів $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$ визначали пікнометричним методом, питому поверхню по адсорбції аргону (метод БЭТ).

Результати та їх обговорення

Основні одержані результати наведені на рис. 1 – 3. Було визначено, що вихідний магнетит має питому поверхню $100 \text{ м}^2/\text{г}$. На основі даних рентгенофазового аналізу за допомогою рівняння Шерера [18] розраховане значення середнього розміру кристалітів Fe_3O_4 , яке дорівнює 15 нм. Питома поверхня композитів з вмістом 0,15, 0,2 та 0,3 г SiO_2 на 1 г магнетиту по відношенню до вихідного магнетиту зростає і дорівнює, відповідно, 105, 126, $164 \text{ м}^2/\text{г}$, а при подальшому збільшенні маси поверхневого шару SiO_2 зменшується: $136 \text{ м}^2/\text{г}$ при вмісті 0,5 г SiO_2 на 1 г магнетиту.

Наявність Fe_3O_4 в композитах було підтверджено даними дифракції рентгенівського випромінювання за наявністю на дифрактограмах (рис. 1, а) рефлексів при $2\theta = 21,5; 35; 41,5; 50,5; 63,4; 67,5; 74^\circ$ з міжплощинними відстанями 4,97; 2,98; 2,56; 2,08; 1,69; 1,63; 1,49 \AA), що відповідають кристалічній фазі магнетиту Fe_3O_4 (JCPDS № 19-629) з кубічною сингонією.

Рефлексів, характерних для кристалічної ґратки діоксиду кремнію виявлено не було. Про присутність кремнійвмісного композиту в досліджуваних зразках свідчить зменшення інтенсивності рефлексів Fe_3O_4 на дифрактограмах зразків модифікованого магнетиту. Найбільш помітно воно для зразка з найбільшим вмістом SiO_2 (рис. 1, а, диф. 5).

За умови мінімального вмісту модифікатора (рис. 1, а, диф. 2) на дифрактограмі присутній слабкий пік при $2\theta = 38,5^\circ$, який відповідає найбільш інтенсивному рефлексу кристалічної ґратки $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ (JCPDS №33-664). Це свідчить про те, що така маса покрит-

тя недостатня для утворення суцільного шару SiO_2 на поверхні магнетиту і не перешкоджає окисленню поверхні. Проте при подальшому збільшенні вмісту SiO_2 в нанокompозитах фаза $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ зникає в зв'язку з утворенням суцільного шару SiO_2 на поверхні магнетиту.

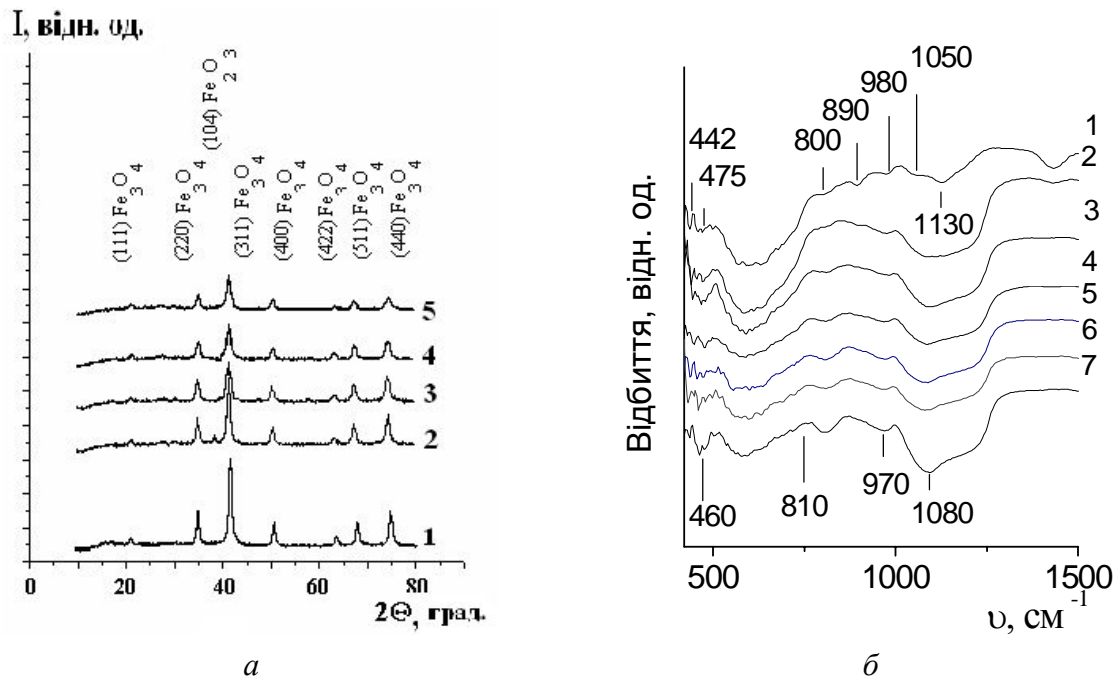


Рис. 1. Дифрактограми (а) та ІЧ-Фур'є спектри (б) зразків вихідного магнетиту (1) та модифікованого діоксидом кремнію з його вмістом 0,1 (2); 0,15 (3); 0,2 (4); 0,3 (5); 0,4 (6); 0,5 г (7) на 1 г магнетиту, витриманих за температури 450 °С в атмосфері аргону.

Методом ІЧ-Фур'є спектроскопії ідентифікована фаза SiO_2 на поверхні магнетиту в нанокompозитах (рис. 1, б, диф. 2). Нами встановлено, що інфрачервоні спектри порошоків немодифікованого магнетиту і нанокompозитів (магнетит, покритий SiO_2) практично такі ж самі, як і для аналогічних, одержаних з використанням перекурсору ТЕОС [9, 10]. Виявлені нами на ІЧ-спектрах смуги поглинання 1080, 810, 460 cm^{-1} характерні, згідно літературним даним для каркасних коливань та зв'язків Si-O-Si в кремнеземі, 970 cm^{-1} – валентні коливання зв'язків Si-O в групі Si-OX (X – в більшості випадків H або Me) [19]. Отже, ці смуги поглинання належать коливанням в поверхневих шарах SiO_2 . Таким чином, наявність покриття SiO_2 на поверхні магнетиту не викликає сумніву.

На основі аналізу вищезазначених результатів щодо структури нанокompозитів за даними оптичної та електронної мікроскопії можна вважати, що сухі порошки нанокompозитів складаються з внутрішнього магнітного ядра із зростків нанокристалітів та зовнішньої немагнітної оболонки з SiO_2 . Являло інтерес з'ясувати, які значення має густина порошоків нанокристалічного магнетиту та як змінюється густина нанокompозиту і поверхневого шару SiO_2 при збільшенні його вмісту в нанокompозитах. Одержані дані дозволяють визначити наступні закономірності.

Із зростанням маси поверхневого шару SiO_2 в нанокompозитах від 0 до 0,5 г на 1 г магнетиту (0 – 33,3 % від загальної маси) відбувається зменшення густини від 4654,8 kg/m^3 (для магнетиту) до 2207,8 kg/m^3 . При цьому густина поверхневого шару SiO_2 спочатку зменшується від 2961,1 kg/m^3 (9,1 % SiO_2), досягає мінімального значення 1898,5 при вмісті SiO_2 16,7 %, а потім збільшується до 2207,8 kg/m^3 (33,3 % SiO_2). Нами

виявлено, що при однакових умовах термообробки при вмісті SiO_2 9,1 – 13,0 % в нанокompозитах утворюється найбільш щільні поверхневі шари SiO_2 .

Виходячи з даних стосовно маси покриття, його густини і питомої поверхні нанокompозитів, нами розрахована середня товщина шару SiO_2 . Остання при вмісті SiO_2 0,2 г (16,7 %) в нанокompозиті складає приблизно 0,8 нм. Ці результати добре узгоджуються з даними, отриманими методом рентгенівської електронної спектроскопії для аналогічних нанокompозитів $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$, виготовлених з використанням прекурсора ТЕОС [20].

Для створення магнітних нанокompозитів важливо оцінити їх магнітні характеристики, обрати оптимальний склад. Наприклад, для розробки магнітокерованих адсорбентів потрібно забезпечити високу питому поверхню і адсорбційну здатність, а також бажано наблизити їх магнітні характеристики до характеристик вихідного магнетиту.

Відомо [14 – 16], що магнітні властивості малих частинок феромагнетика залежать від їх морфології, розміру, форми, складу, співвідношення магнітної і немагнітної фази. На магнітні властивості порошоків нанокompозитів можуть впливати також такі фактори, як відстань між частинками або їх кластерами, дефектність структури, поверхнева анізотропія та інші чинники [9, 15, 16].

Аналіз одержаних даних свідчить про наступні закономірності. Збільшення маси покриття SiO_2 від 0 до 33,3 % від загальної маси нанокompозита призводить до зменшення значень їх питомої намагніченості насичення (рис. 2) і немонотонної зміни коерцитивної сили (табл.).

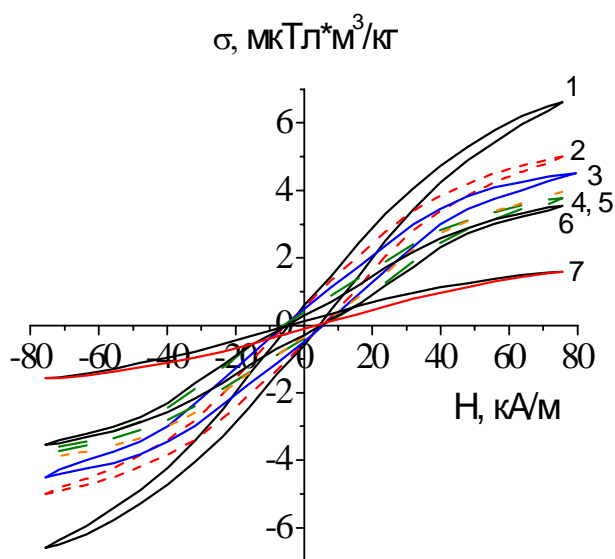


Рис. 2. Петлі гістерезису зразків вихідного магнетиту (1) та нанокompозитів на основі магнетиту, модифікованого діоксидом кремнію (2 – 7). Вміст SiO_2 в поверхневому шарі нанокompозиту на 1 г магнетиту: 2 – 0,1; 3 – 0,15; 4 – 0,2; 5 – 0,3; 6 – 0,4; 7 – 0,5 г.

Таблиця. Залежність коерцитивної сили від концентрації магнітного компонента

Концентрація Fe_3O_4 , % мас.	100	90,9	87,0	83,3	76,9	71,4	66,7
Коерцитивна сила, кА/м	4,54	5,33	5,65	6,05	4,94	4,94	3,98

Для більш детального визначення впливу деяких факторів на питому намагніченість нанокompозитів побудовані залежності значень σ_s від вмісту SiO_2 та від об'єму магнітної фази (Fe_3O_4) в нанокompозиті (рис. 3). З рис. 3 бачимо, що питома намагніченість відносно об'єму магнітної фази змінюється за нелінійним законом. В області вмісту SiO_2 $0 < C < 13,0$ % зниження загального об'єму магнетиту мало впливає на зниження питомої намагніченості. Можна припустити, що в області цих концентрацій SiO_2 на зниження питомої намагніченості переважно впливає поверхнева анізотропія.

Подальше зниження концентрації магнетиту при $C(\text{Fe}_3\text{O}_4) < 83,3\%$ в нанокompозиті призводить до більш істотного зниження σ_s . Так, при вмісті магнетиту 66,7 %, σ_s нанокompозиту складає 1,72 **Ошибка! Ошибка связи.**, тобто приблизно 34 % від величини **Ошибка! Ошибка связи.** вихідного магнетиту. При такому складі нанокompозиту, на нашу думку, на питому намагніченість істотно впливає не тільки об'єм магнітної фази та поверхнева анізотропія, але і відстань між частинками магнетиту в нанокompозиті. Дійсно, при вмісті магнетиту 66,7 % в нанокompозиті середня товщина розрахованого шару SiO_2 складає 2,3 нм, тобто в 4 рази більша, ніж при вмісті магнетиту 83,3 % та SiO_2 16,7 %. Окрім того, ймовірно, зменшується не тільки загальний об'єм магнетиту в заданому об'ємі, але й розмір його магнітного ядра, збільшується дефектність його поверхневих магнітних ланок. З аналізу робіт [9, 15, 16] також витікає, що зменшення товщини шару кристалічної частинки і зменшення числа сусідів в зовнішніх шарах призводить до зменшення її намагніченості.

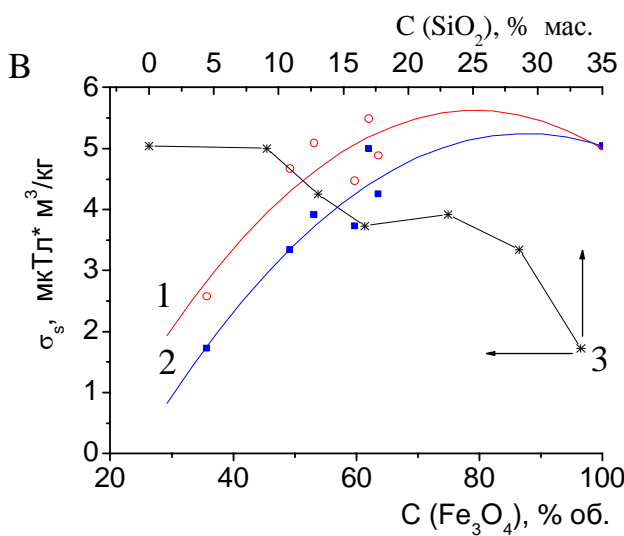


Рис. 3. Залежність розрахункових (1) та експериментальних (2) значень питомої намагніченості насичення нанокompозитів від об'єму магнітної фази в композиті та експериментальних значень питомої намагніченості від концентрації SiO_2 покриття (3).

Залежність коерцитивної сили від концентрації магнітного компонента обговорювалось багаторазово в ряді робіт [9, 15, 16]. Тим не менш, у всіх випадках повідомляється, що із зменшенням розміру частинок значення H_c спочатку збільшується, а потім спадає. У випадку ансамблю частинок із зменшенням їх об'ємної концентрації в ансамблі значення H_c може збільшуватися або зменшуватися в залежності від умов та механізмів перемагнічування. Отже, немонотонну зміну значень H_c для досліджених нанокompозитів можна пов'язати із зміною розмірів частинок магнітного компонента та перебудовою їх магнітної структури при зниженні вмісту магнітної фази.

Висновки

В результаті проведеної роботи синтезовані магнітокеровані нанокompозити на основі магнетиту, модифікованого діоксидом кремнію (при використанні прекурсора тетраметоксисилану). За допомогою методів РФА і ІЧ-Фур'є спектроскопії ідентифікована фази магнетиту і діоксиду кремнію в одержаних нанокompозитах.

Визначено, що густина поверхневого шару SiO_2 нанокompозитів спочатку зменшується від $2961,1 \text{ кг/м}^3$ (9,1 % SiO_2), досягає мінімального значення $1898,5 \text{ кг/м}^3$ при вмісті SiO_2 16,7 %, а потім збільшується до $2207,8 \text{ кг/м}^3$ (33,3 % SiO_2).

Збільшення маси покриття SiO_2 від 0 до 33,3 % від загальної маси нанокompозита призводить до зменшення значень їх питомої намагніченості насичення і немонотонної зміни коерцитивної сили. Такі зміни можна пов'язати із зміною розмірів частинок маг-

нітного компонента та перебудовою їх магнітної структури при зменшенні вмісту магнітної фази.

Література

1. Нанотехнология в ближайшем десятилетии. Прогноз направлений исследований / Под. ред. М. К. Роко, Р.С. Уильямса. – М: Мир, 2002. – 292 с.
2. Горбик П.П. Супрамолекулярна хімія на межі розподілу фаз: пріоритетні напрямки та перспективи // Тези конф.: Нанорозмірні системи. Будова – Властивості – Технології. – 2007. – Київ: Комункомплекс, 2007. – С. 9.
3. Gupta A., Gupta M. Synthesis and Surface engineering of iron oxide nanoparticles for biomedical applications // *Biomaterials*. – 2005. – V. 26. – P. 3995 – 4021.
4. Физические основы применения ферромагнетиков, введенных в организм / В.И. Рымарчук, А.Г. Маленков, Л.А. Радкевич, В.М. Сабодаш // *Биофизика*. – 1990. – Т. 35, № 1. – С. 145 – 154.
5. Оборотова Н.А. Направленная доставка противоопухолевых препаратов // *Антибиотики и химиотерапия*. – 1991. – Т. 36, № 10. – С. 47 – 50.
6. Preparation and characterization of magnetic nanospheres for in vivo application / C. Grüttner, J. Teller, W. Sehütt *et al.* // *Scientific and Chemical Applications of Magnetic Carriers*. – N. Y.: Plenum press, – P. 53 – 67.
7. Медико-біологічні наноконкомпозити на основі магнетиту: синтез, модифікація, функціоналізація поверхні для застосування *in vitro* / П.П. Горбик, А.Л. Петрановська, Л.П. Сторожук, І.В. Дубровін, Л.С.Семко // *Хімія, фізика та технологія поверхні*. – К.: Наук. думка, 2006. – Вип. 11-12. – С 374 – 397.
8. Модифікування магнетиту діоксидом титану та властивості одержаних наноконкомпозитів / Л.С. Семко, П.П. Горбик, О.О. Чуйко, Л.П. Сторожук, І.В. Дубровін, О.І. Оранська, С.Л. Рево // *Доп. НАН України*. – 2007. – № 2. – С. 150 – 157.
9. Синтез та властивості наноконкомпозитів на основі магнетиту, модифікованого оксидом кремнію / Л.С. Семко, П.П. Горбик, Л.П. Сторожук, І.В. Дубровін, О.О. Чуйко, О.І. Оранська, О.І. Скрипка // *Доповіді НАН України*. – 2007. – № 3. – С. 153 – 160.
10. Семко Л.С., Горбик П.П., Сторожук Л.П. Модифікування магнетиту діоксидом кремнію // *Фізика і хімія твердого тіла*. – 2007. – Т. 8, № 3. – С. 526 – 532.
11. Биодegradуемые иммуномагнитные сорбенты в онкологии / М.Ю. Ларин, П.К. Иванов, Д.Ю. Блохин, Н.В. Голубцова, Е.А. Голенкина., О.Л. Ершов, В.И. Филиппов, Н.Г. Мошечков // *Росс. биотерапевт. журн.* – 2005. – Т. 3, № 4. – С. 24 – 29.
12. Пат. 6447911 США., МКИ В32В 005/16. Silica adsorbent on magnetic substrate / J. Neil, L. Lee. – № 723446, 09.2002. – Prior. 10.09.2002.
13. Пат. 6924033 США, Int. Cl. В32В 005/16. Silica adsorbent on magnetic substrate/ J. Neil, L. Lee. – № 615998, 07.2003. – Prior. 02.08.2005.
14. Lefebure S., Dubois V., Cabuil. V. Monodisperse magnetic nanoparticles: preparation and dispersion in water and oils // *J. Mater. Res.* – 1998. – V. 10. – P. 2975.
15. Магнитные ітній частицы: методы получения, строение и свойства / С.П. Губин, Ю.А. Кокшаров, Г.Б. Хомутов, Г.Ю. Юрков // *Успехи химии*. – С. 539 – 574.
16. Непійко С.А. Физические свойства малых металлических частиц. – Киев: Наук. думка, 1981. – 248 с.
17. Brinker C.I., Scherer C.W. Sol-gel science. – N. Y.: Acad. press. inc. – 1990. – 908 p.
18. Оранская Е.И., Горников Ю.И. // *Завод. лаборатория*. – 1994. – Т. 60, № 1 – С. 28.
19. Коваленко А.С., Гринь С.В. Особенности темплатного синтеза мезопористых материалов на основе титано-кремниевых эфиров // *Теорет. и эксперим. химия*. – 2004. – Т. 40, № 1. – С. 46 – 51.

20. Синтез, структура и свойства нанокompозитов на основе магнетита, модифицированного оксидами кремния и титана с различным их содержанием / Л.С. Семко, П.П. Горбик, Л.П. Сторожук, Л.С. Дзюбенко // Химия, физика и технология поверхности. – К.: Наук. думка, 2007. – № 13. – С. 370 – 396.

STRUCTURE AND MAGNETIC PROPERTIES OF MAGNETITE/SILICON DIOXIDE NANOCOMPOSITES

**L.S. Semko, P.P. Gorbyk, M.V. Abramov, O.G. Sirenko,
I.V. Dubrovin, O.I. Oranska**

*Chuiko Institute of Surface Chemistry of National Academy of Sciences of Ukraine
General Naumov Str. 17, 03164 Kyiv-164*

A technique has been developed for synthesis of magnetic nanocomposites based on a magnetite coated with silicon dioxide, using tetramethoxysilane as a precursor. Density, structure, and magnetic properties of the nanocomposites were determined. The SiO₂ surface layer weight fraction of nanocomposites increase from 0 to 0.5 g per 1 g magnetite has been found to result in drop in density from 4654.8 kg/m³ (for magnetite) to 2207.8 kg/m³, as well as and specific magnetization at saturation and non-monotonous change in the coercive force.