

## О СВЯЗЯХ Si–O–Fe В НАНОКОМПОЗИТАХ ОКСИД ЖЕЛЕЗА – ОКСИД КРЕМНИЯ

В.М. Богатырев<sup>1</sup>, М.В. Галабурда<sup>1</sup>, Л.П. Сторожук<sup>1</sup>,  
Е.И. Оранская<sup>1</sup>, О.М. Кордубан<sup>2</sup>, П.П. Горбик<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт химии поверхности им. А.А. Чуйко Национальной академии наук Украины  
ул. Генерала Наумова 17, 03164 Киев-164

<sup>2</sup>Институт металлофизики им. Г.В. Курдюмова Национальной академии наук Украины  
бульв. Академика Вернадского 36, 03680 Киев-142

Методами ИК-, рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии и рентгенофазового анализа изучены условия формирования связи Si – O – Fe в системе “оксид железа – оксид кремния”, а также особенности структуры полученных оксидов железа. Установлено повышение термической стабильности Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> и γ-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в присутствии аморфного кремнезема, что может быть связано с образованием связей Si – O – Fe в наноконкомпозитах.

### Введение

В последнее время внимание исследователей привлекает получение и свойства оксидных наноконкомпозитов Fe<sub>x</sub>O<sub>y</sub>/SiO<sub>2</sub> [1] и возможность их использования для создания новых материалов с магнито-оптическими свойствами [2, 3], магниточувствительных сорбентов [4] и для применения в области биомедицинских технологий [5]. Оксиды железа в исследуемых наноконкомпозитах представлены частицами магнетита Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, маггемита γ-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и гематита α-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. При этом в зависимости от потенциальных применений соотношение между оксидными фазами железа и кремния варьируется в очень широких пределах. Для синтеза кремнеземных наноконкомпозитов используются различные методы. В газофазных методах применяют технологию пирогенного синтеза и спрей-пиролиза [6]. Жидкофазные методы широко используют золь-гель технологии и способы химического модифицирования поверхности наночастиц [7, 8]. В конечном результате полученная система Fe<sub>x</sub>O<sub>y</sub>/SiO<sub>2</sub> представлена включениями нанокристаллического оксида железа в «оболочке» из аморфного кремнезема, смесью наночастиц оксидов железа и кремния или частицами оксида кремния, покрытого наночастицами оксида железа. Во всех вариантах наноконкомпозиты состоят из аморфного оксида кремния и кристаллического оксида железа (или нескольких кристаллических форм оксида железа).

Известно, что на поверхности аморфного кремнезема находится 4 – 5 гидроксильных групп на 1 нм<sup>2</sup>, связанных с атомами кремния [9]. По данным различных авторов, число гидроксильных групп на нм<sup>2</sup> поверхности оксидов железа составляет для гематита 4,4 – 10, для маггемита 5,1 – 9,8 и для магнетита 5 – 5,2 [10]. Кристаллографическое рассмотрение оксидов железа показывает, что гидроксильные группы поверхности могут быть координированы с одним FeOH, двумя Fe<sub>2</sub>OH или тремя Fe<sub>3</sub>OH поверхностными атомами железа. К этим трём типам могут быть добавлены и геминальные гидроксильные группы, т.е. с двумя гидроксильными у одного атома железа. Тип поверхностных гидроксидов определяется кристаллической структурой оксида и для гематита (α-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) на гранях (104), (012), (110) и (100) находятся одиночные гидроксиды FeOH, которые располагаются парами. Тогда как на базальной грани (001) гематита находятся гидроксиды только второго типа – Fe<sub>2</sub>OH [10]. В процессе синтеза наносистем оксид железа –

оксид кремния появляется возможность образования связей Si – O – Fe на различных стадиях протекания химических реакций.

В присутствии некоторых примесей и адсорбированных фосфатов температура превращения  $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> повышается, что сопровождается трансформацией в кристаллической решетке оксида железа с изменением кубической сингонии в тригональную. В некоторых исследованиях отмечено, что в системе  $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub> также повышается термическая стабильность  $\gamma$ -формы оксида железа [10]. Однако сведения о существовании связей Si – O – Fe и, следовательно, об их участии в межчастичных взаимодействиях в нанокompозитах очень ограничены и противоречивы [11, 12]. Причиной этому может быть существенное влияние условий синтеза и природы реагентов на построение оксидных наносистем.

В нашей работе на примере различных нанокompозитов рассмотрено образование связей Si – O – Fe, как одного из возможных факторов, способствующих повышению термостойкости  $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> в составе наноразмерной оксидной системы Fe<sub>x</sub>O<sub>y</sub>/SiO<sub>2</sub>.

### Экспериментальная часть

Нанокompозиты состава Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub> получали различными методами. Первый метод состоял в химическом модифицировании пирогенного кремнезема марки А-300 (S<sub>уд</sub>=342 м<sup>2</sup>/г) ацетилацетонатом железа Fe(acac)<sub>3</sub> в изопропиловом спирте (SiFe-1 и SiFe-2) или тетрахлориде углерода (SiFe-3). После удаления растворителя упариванием, образцы прокачивали при 450 °С в атмосфере воздуха. Содержание Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в образцах составляло 7 и 50 % масс.

Второй способ синтеза нанокompозита Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub> состоял в использовании золь-гель метода. Тетраэтоксисилан смешивали с этиловым спиртом, дистиллированной водой и FeCl<sub>3</sub>·6H<sub>2</sub>O в массовых соотношениях 37,4/20,3/5,0/12,2, соответственно. После созревания геля, его крошили и проводили термообработку на воздухе с постадийным повышением температуры до 600 °С. Содержание Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в образце – 29 %. Наименование образца – ZG.

Для получения нанокompозитов Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/SiO<sub>2</sub> как модификатор использован тетраэтоксисилан (ТЭОС). Методика синтеза нанокompозитов на основе магнетита, модифицированного диоксидом кремния, основывается на использовании процессов гидролиза ТЭОС. Количество SiO<sub>2</sub> в модифицированном Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> составляло 16,7, 23 и 33 % масс. Наименование образцов: FeSi-1, FeSi-2 и FeSi-3. Основные характеристики синтезированных образцов приведены в табл. 1.

**Таблица 1.** Характеристики нанокompозитов Fe<sub>x</sub>O<sub>y</sub>/SiO<sub>2</sub>

Наименование	Исходный оксид	Синтезированный оксид в составе нанокompозита		Удельная поверхность, м <sup>2</sup> /г
		Наименование	Содержание, % масс.	
SiFe-1	SiO <sub>2</sub>	$\gamma$ -Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7	239
SiFe-2	SiO <sub>2</sub>	$\gamma$ -Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	50	164
SiFe-3	SiO <sub>2</sub>	$\alpha$ -Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7	202
ZG	-	$\alpha$ -Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /SiO <sub>2</sub>	29/71	550
FeSi-1	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /SiO <sub>2</sub>	83,3/16,7	120
FeSi-2	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /SiO <sub>2</sub>	77/23	134
FeSi-3	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /SiO <sub>2</sub>	67/33	142

ИК спектроскопические измерения проводили на приборе ThermoNicolet Nexus методом диффузного отражения с Фурье-преобразованием (DRIFT) в области 4000 –

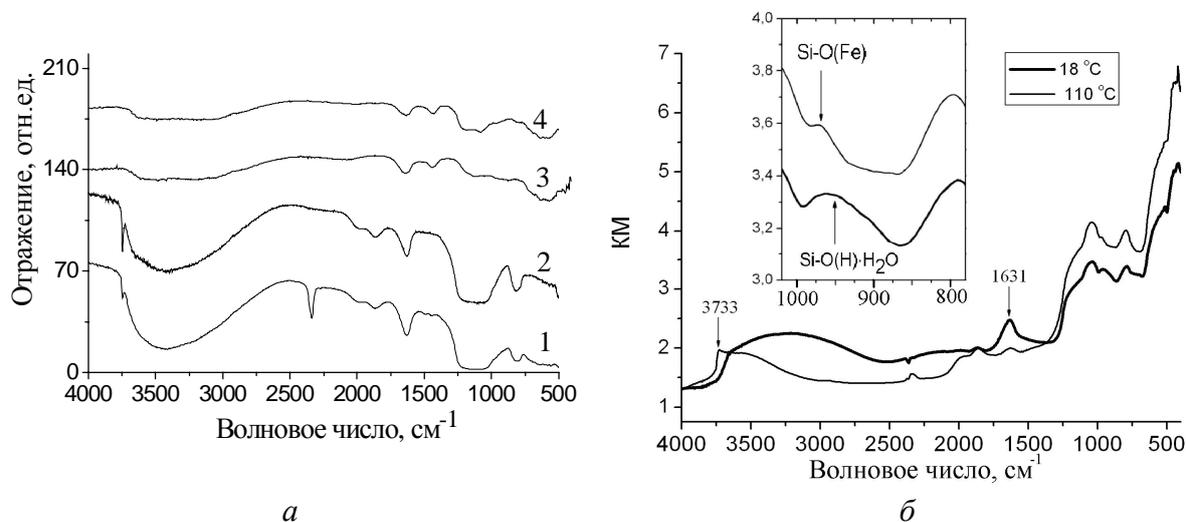
400 см<sup>-1</sup>. В работе использовали приставки для диффузного отражения, которые позволяли проводить измерения при комнатной и повышенной температурах.

Рентгенофазовый анализ (РФА) проводили методом порошковой дифрактометрии на приборе ДРОН-УМ1 (НПО “Буревестник”, Россия) с компьютерной регистрацией данных, в излучении Cu (для образцов SiFe) и Co Kα (для образцов FeSi) с Fe фильтром в отраженном пучке и геометрией съемки по Брэггу-Брентано.

Электронную структуру поверхности наночастиц исследовали методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) на электронном спектрометре ЕС-2402 с энергоанализатором PNOIBOS-100\_SPECS (E MgKα = 1253,6 эВ, P = 300 W). Спектры Fe2p<sub>3/2</sub>-уровней разлагали на компоненты по методу Гаусса-Ньютона.

## Результаты и их обсуждение

ИК спектроскопическими исследованиями установлено, что химическое модифицирование кремнезема Fe(acac)<sub>3</sub> сопровождается уменьшением полосы поглощения (ПП) валентных колебаний силанольных групп при 3748 см<sup>-1</sup>. Однако прямого подтверждения образования связей Si – O – Fe установлено не было, т. к. в результате термообработки образцов на воздухе, для формирования оксидной фазы железа, происходит практически полное восстановление интенсивностей ПП при 3750 см<sup>-1</sup> до исходной величины [13]. Известно, что образование связей Si – O(Me) на поверхности кремнезема, характеризуется появлением ПП в области 930 – 980 см<sup>-1</sup> [14], тем не менее, достоверно установить поглощение в этой области для связей Si-O(Fe) в кремнеземе, модифицированном Fe(acac)<sub>3</sub>, не удавалось. Малоинтенсивную ПП при 960 см<sup>-1</sup> в образцах SiFe-1 и SiFe-2 относили к физически сорбированной воде (рис. 1, а).



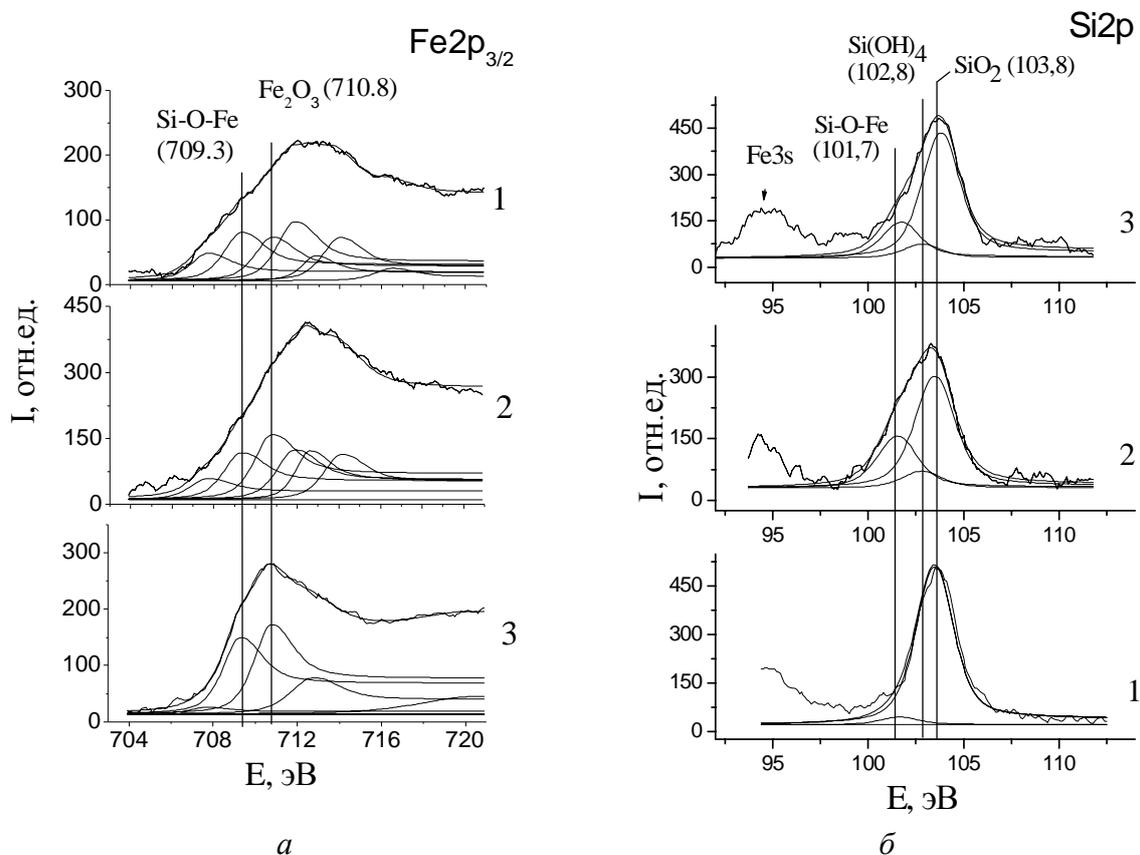
**Рис. 1.** ИК спектры диффузного отражения образцов SiFe-2– 1, SiFe-1– 2, FeSi-1– 3, FeSi-2 – 4 (а); и ZG при 18°C и 110°C (б).

Иной результат получен для образца ZG, полученного золь-гель методом (рис. 1, б). После удаления физически сорбированной воды при 110 °C в ИК-спектре наблюдается ПП при 970 см<sup>-1</sup>, что может быть отнесено к колебаниям связей Si – O(Fe). Высокая удельная поверхность образца при высоком содержании оксида железа способствует образованию значительно большего числа связей Si – O – Fe в этом нанокompозите, чем в образцах на основе высокодисперсных SiO<sub>2</sub> и Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>.

Известно, что ПП 1070, 798, 465 см<sup>-1</sup> характерны для каркасных колебаний и связей Si – O – Si в кремнеземе [9]. В ИК-спектрах образцов FeSi-1, FeSi-2, где содержание SiO<sub>2</sub> составляет 16,7 и 23 % масс., ПП 980, 1079, 789 см<sup>-1</sup> и ПП в области 1052 –

1217  $\text{cm}^{-1}$  принадлежат колебаниям  $\text{SiO}_2$ , сформированного в результате гидролиза ТЭОС. Существование поверхностных гидроксильных групп на частицах магнетита создает предпосылки к формированию связей  $\text{Si} - \text{O} - \text{Fe}$  при конденсации силанольных групп в процессе гидролиза ТЭОС.

Спектры РФЭС  $\text{Fe}2p_{3/2}$ -уровней исследуемых образцов и результаты разложения на компоненты представлены на рис. 2, а. В образце ZG  $\text{Fe}2p_{3/2}$ -линия в основном сформирована компонентой в области энергий  $E = 710,8$  эВ, отвечающая фазе  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  [15] и компонентой в области энергий  $E=709,3$  эВ, которая соответствует наличию значительных количеств связей  $\text{Fe} - \text{O} - \text{Si}$ . В области энергий  $E_b = 707,6$  эВ обнаруживается незначительный вклад от фрагментов связи  $\text{Fe} - \text{Si}$  [16]. Однако протекающие химические реакции в процессе термоокислительной деструкции ацетилацетоната железа не создают видимых условий для формирования силицидов  $\text{Fe}_3\text{Si}$ , и достоверное отнесение этой компоненты спектра РФЭС к связям  $\text{Fe} - \text{Si}$  требует дополнительных исследований. Для образца SiFe-3 наблюдается увеличение вклада в интегральную интенсивность  $\text{Fe}2p_{3/2}$ -линии в области энергий 707,6 – 709,3 эВ. При сравнении спектров SiFe-3 и SiFe-1 зафиксировано появление компоненты в области  $E = 711,9$  эВ, что отвечает атомам  $\text{Fe}^{3+}$ , которые могут образовываться в продуктах неполной термодеструкции ацетилацетонатных комплексов железа. Форма ИК-спектров в области связей  $\text{C} - \text{C}$  для образцов SiFe, отожженных при 400 и 600  $^\circ\text{C}$ , позволяет предположить существование остаточных углеродсодержащих продуктов после термообработки образцов до 450  $^\circ\text{C}$ . В области 713 – 716 эВ на всех спектрах РФЭС присутствуют вклады от сателлитных линий. Интегральные интенсивности основных компонент  $\text{Fe}2p_{3/2}$ - линий приведены в табл. 2.



**Рис. 2.** Разложенные на компоненты спектры образцов (а) SiFe-3 – 1, SiFe-1 – 2, и ZG – 3; (б) FeSi-1– 1, FeSi-2 – 2, FeSi-3– 3.

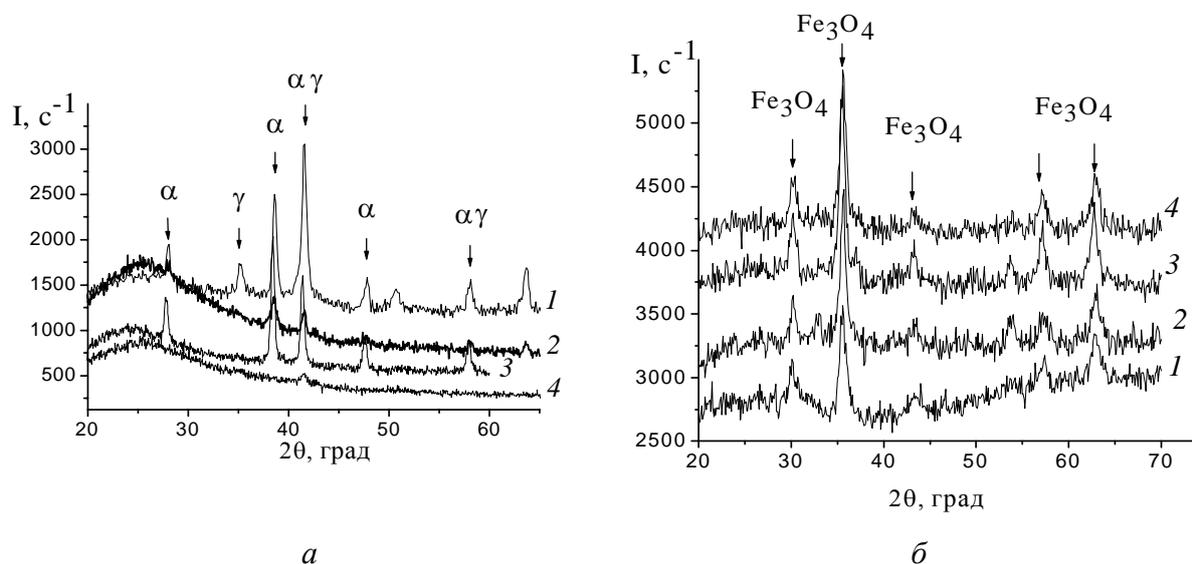
Спектры РФЭС Si2p-уровней образцов FeSi-1, FeSi-2, FeSi-3 и результаты разложения на компоненты представлены на рис. 2, б. Компоненту спектра с  $E_{\text{св}} \text{ Si } 2p = 101,7 \text{ эВ}$  можно отнести к связи Fe–O–Si, компоненту с  $E_{\text{св}} \text{ Si } 2p = 102,8 \text{ эВ}$  – к Si(OH)<sub>4</sub>. Максимуму Si 2p-линии (компонента  $E_{\text{св}} \text{ Si } 2p = 103,8 \text{ эВ}$ ) соответствует фаза SiO<sub>2</sub>.

**Таблица 2.** Интегральные интенсивности основных компонент Fe2p<sub>3/2</sub>-линий образцов нанокompозита Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub> по энергиям связей (ошибка ± 1,0)

Образец	E=707,6 эВ	E=709,3 эВ	E=710,8 эВ	E=711,9 эВ
	I, % Fe – Si	I, % Fe – O – Si	I, % Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	I, % Fe <sup>3+</sup>
SiFe-3	10,6	19,1	17,2	23,3
SiFe-1	7,7	17,4	24,2	18,5
ZG	3,0	35,4	41,3	0

Согласно данным РФА для образцов кремнезема, модифицированного Fe(асас)<sub>3</sub> из изопропилового спирта (SiFe-1), при термообработке до 600 °С на воздухе характерно образование маггемита в составе нанокompозитов. Оксид железа, образующийся при 400 °С на воздухе, из перекристаллизованного в ИПС Fe(асас)<sub>3</sub> приводит к образованию γ-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. При повышении температуры до 600 °С происходит полное превращение оксида железа в α-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (рис. 3). При химическом модифицировании кремнезема ацетил-ацетонатом железа в растворе тетрахлорида углерода (образец SiFe-3), оксид железа изначально формируется только в виде гематита (рис. 3, табл. 3).

Термостабилизацию γ-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, наблюдающуюся в кремнеземной матрице, объясняют влиянием пористой структуры, которая предотвращает рост наночастиц данной фазы и, как следствие, препятствует фазовому переходу в α-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [17]. Мы предполагаем, что еще одним фактором, стабилизирующим кубическую структуру γ-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, может служить образование связей Si – O – Fe.



**Рис. 3.** Дифрактограммы образцов (а) SiFe-2 – 1, SiFe-3 – 2, перекристаллизованного Fe(асас)<sub>3</sub> из ИПС и после термообработки при 600 °С – 3 и SiFe-1 – 4; (б): исходного магнетита – 1 и образцов FeSi-1 – 2, FeSi-2 – 3, FeSi-3 – 4.

Приведенные в табл. 3 результаты рентгенофазового анализа образцов с 50 %-ным содержанием Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и индивидуальных Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, полученных прокаливанием перекрис-

таллизованных из различных растворителей порошков  $\text{Fe}(\text{асас})_3$ , демонстрируют повышение термической стойкости магнетита в составе кремнеземного нанокompозита. При этом наблюдается и существенное влияние условий проведения синтеза на конечное соотношение  $\gamma$ - и  $\alpha$ -формы оксидов железа.

**Таблица 3.** Влияние кремнеземной матрицы, растворителя и температуры прокаливания на фазовый состав оксида железа, полученного из  $\text{Fe}(\text{асас})_3$

Общее содержание оксидов железа, % масс.	Растворитель	Температура отжига, °С	Фазовый состав	Количественный фазовый состав оксида железа, % масс.
50	ИПС	300	$\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$	85 15
50	ИПС	400	$\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$	70 30
50	ИПС	500	$\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$	62 38
50	ИПС	600	$\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$	45 55
50	$\text{CCl}_4$	400	$\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$	100
100	ИПС	400	$\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$	100
100	ИПС	600	$\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$	100
100	$\text{CCl}_4$	400	$\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$	100

В полученном нанокompозите  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$  также наблюдается повышение термической устойчивости кубической формы оксида железа. На рис. 3, б представлены дифрактограммы образца исходного магнетита (кривая 1) и образцов магнетита, модифицированных соединением кремния с различным его содержанием (кривые 2 – 4). На дифрактограммах магнетита, модифицированного ТЭОС с содержанием  $\text{SiO}_2$  16,7 – 33 % и отожженного при 400 °С в атмосфере аргона, наблюдаются пики, соответствующие только фазе магнетита. При минимальном содержании модифицирующего агента (9 %) на дифрактограмме появляются также пики, соответствующие фазе  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ . Наличие модифицирующего кремнеземсодержащего покрытия на образцах магнетита, начиная с содержания 16,7 %, способствует сохранению фазы магнетита при дальнейшей термической обработке образцов до 400 °С. Это позволяет предположить, что для данных образцов модифицирующее покрытие является достаточно плотным, что сопровождается повышением температуры изменения кубической структуры  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  в тригональную  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$  за счет геометрического капсулирования частиц оксида железа наночастицами кремнезема и образования межчастичных связей  $\text{Si} - \text{O} - \text{Fe}$ .

### Выводы

В нанокompозитах состава  $\text{Fe}_x\text{O}_y/\text{SiO}_2$ , полученных химическим модифицированием поверхности пирогенного кремнезема  $\text{Fe}(\text{асас})_3$  и поверхности магнетита ТЭОС, отмечено образование связей  $\text{Si} - \text{O} - \text{Fe}$ . Существенно большее количество этих связей формируется в образце, полученном золь-гель методом из хлорида железа и ТЭОС. В присутствии аморфной фазы  $\text{SiO}_2$  и связей  $\text{Si} - \text{O} - \text{Fe}$ , наблюдается повышение температуры трансформации кубической сингонии нанокристаллитов оксидов железа в тригональную.

## Литература

1. Silica-Maghemite Nanocomposites / A. Bourlinos, A. Simopoulos, D. Petridis, H. Okumura, G. Hadjipanayis // *Advanced Materials*. – 2001. – V. 13, Is. 4. – P. 289 – 291.
2. Magneto-Optical Properties of Silica Gel Containing Magnetite Fine Particles / A. Yasumori, H. Matsumoto, S. Hayashi, K. Okada // *J. Sol-Gel Sci. and Tech.* – 2000. – V. 18, № 3. – P. 249 – 258.
3. Оптические свойства наночастиц  $\gamma$ -оксида железа в матрице мезопористого оксида кремния / М.В. Харламова, М.А. Саполетова, А.А. Елисеев, А.В. Лукашин // *Письма в ЖТФ*. – 2008. – Т. 34, № 7. – С. 36 – 42.
4. Preparation of silica-magnetite nanoparticle mixed hemimicelle sorbents for extraction of several typical phenolic compounds from environmental water samples / X. Zhao, Y. Shi, T. Wang, Y. Cai, G. Jiang // *J Chromatogr A*. – 2008. – V. 1188, № 2. – P. 140 – 147.
5. Zhang M., Cushing B.L., O'Connor C.J. Synthesis and characterization of monodisperse ultra-thin silica-coated magnetic nanoparticles // *Nanotechnology*. – 2008. – V. 19, № 8. – P. 085601.1 – 085601.5.
6. Gas-phase production of nanoparticles / A. Gutsch, M. Kramer, G. Michael, H. Mühlenweg, M. Pridöhl, G. Zimmermann // *KONA*. – 2002. – №. 20. – P. 24 – 37.
7. Sol-Gel  $\text{Fe}_x\text{O}_y - \text{SiO}_2$  Nanocomposites / M. Răileanu, M. Crisan, C. Petrache, D. Crisan, A. Jitianu, M. Zaharescu, D. Predoi, V. Kuncser, G. Filoti // *Rom. J. Phys.* – 2005. – V. 50, № 5 – 6. – P. 595 – 606.
8. How to tailor maghemite particle size in  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  nanocomposites / C. Cannas, G. Concas, D. Gatteschi, A. Musinu, G. Piccaluga, C. Sangregorio // *J. Mater. Chem.* – 2002. – V. 12, Is. 10. – P. 3141 – 3146.
9. Айлер Р. Химия кремнезема. – М.: Мир, 1982. – Ч. 2. – 712 с.
10. Cornell R.M., Schwertmann U. The iron oxides. Structure, properties, reactions, occurrences and uses. Wiley-VCH GmbH & Co. KGaA, 2003. – 664 p.
11. Battishaa, Afifya H.H., Ibrahim M. Synthesis of  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  concentrations and sintering temperature on FTIR and magnetic susceptibility measured from 4 to 300 K of monolith silica gel prepared by sol-gel technique // *J. Magn. and Magn. Mat.* – 2006. – V. 306, № 2. – P. 211 – 217.
12. An X-ray adsorption spectroscopy study of the Fe K edge in nanosized maghemite and in  $\text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$  nanocomposites / A. Corrias, G. Ennas, G. Mountjoy, G. Paschina // *Phys. Chem. Chem. Phys.* – 2000. – V. 2. – P. 1045 – 1050.
13. Synthesis of nanocomposites  $\text{M}_x\text{O}_y/\text{SiO}_2$ : chemical modification of silica with acetylacetonates of iron and cerium / V.M. Bogatyrov, M.V. Borysenko, M.V. Gayeva, O.I. Oranska, T.V. Cherniavska, E.N. Poddenezhny // *Nanosystems, Nanomaterials, Nanotechnologies*. – 2007. – V. 5, № 2 – P. 425 – 433.
14. Kytökiivi Arla, Haukka Suvi Reaction of HMDS,  $\text{TiCl}_4$  and  $\text{AlCl}_3$  with silica as interpreted from low-frequency diffuse reflectance infrared spectra // *J. Phys. Chem.* – 1997. – V. 101. – P. 10365 – 10372.
15. Briggs D., Seach M.P., Practical surface analysis by Auger and X-ray photoelectron spectroscopy. – Chichester – New York, 1983.
16. Нефедов В.И. Рентгеноэлектронная спектроскопия химических соединений – М.: Химия, 1984. – 256 с.
17. An X-ray adsorption spectroscopy study of the Fe K edge in nanosized maghemite and in  $\text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{Si}_2$  nanocomposites / A. Corrias, G. Ennas, G. Mountjoy, G. Paschina // *Phys. Chem. Chem. Phys.* – 2000. – V. 2. – P. 1045 – 1050.

## **ABOUT Si – O – Fe BOUNDS IN IRON OXIDE – SILICA NANOCOMPOSITES**

**V.M. Bogatyrov<sup>1</sup>, M.V.Galaburda<sup>1</sup>, L.P. Storozhuk<sup>1</sup>,  
E.I. Oranskaya<sup>1</sup>, O.M. Korduban<sup>2</sup> P.P. Gorbyk<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Chuiko Institute of Surface Chemistry of National Academy of Sciences of Ukraine  
General Naumov Str. 17, 03164 Kyiv-164*

<sup>2</sup>*Kurdyumov Institute of Metal Physics of National Academy of Sciences of Ukraine  
Vernadsky Ave 36, 03142 Kyiv-142*

*The conditions have been studied for Si – O – Fe bonds forming and peculiar structure of iron oxides in iron oxide – silica systems by means of IR-spectroscopy, XPS and XRD. Thermal stabilities of  $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> was found to increase in the presence of amorphous silica what could be related to appearance of Si – O – Fe bonds in nanocompounds.*