

О синтезе нанокompозита FeNi₃/C под действием ИК нагрева и возможности его применения для высокоплотной магнитной записи информации

А.В. Костикова¹, Л.В. Кожитов¹, В.Г. Костишин¹, Нгуен Хонг Вьет¹, В.В. Козлов¹, А.П. Кузьменко²

¹Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»;

²Юго-Западный государственный университет

Введение

Для развития электроники перспективен нанокompозит [1,2] FeNi₃/C, который является дисперсией наночастиц пермаллоя (FeNi₃) ($d < 100$ нм) в углеродном материале (УМ) [3-9]. Нанокompозит FeNi₃/C сочетает выгодные свойства FeNi₃ (магнитная проницаемость – $50000 \div 3000000$ отн. ед.; коэрцитивная сила – $0,1 \div 200$ Э; магнитострикция – $0,003$ %; магниторезистивный эффект – ~ 4 % [5]) и УМ (плотность – ~ 2 г/см³; теплопроводность – до 1700 Вт/(м·К); термическая стабильность на воздухе до 300 °С; биосовместимость). Такой материал может найти применение в производстве высокочастотных магнитооптических устройств обработки и хранения информации, а также в производстве магнитооптических дисков. Структурирование полиакрилонитрила (ПАН) при ИК нагреве способствует образованию УМ, содержащего различные углеродные формы (графено-, тубулено-, фуллерено- и кольцоподобные структуры), и обладающего перспективными физическими и химическими свойствами [3-7]. Синтез наночастиц FeNi₃ под действием ИК нагрева в УМ на основе ПАН модифицирует свойства УМ и создает возможность синтезировать нанокompозит FeNi₃/C с контролируемыми электрофизическими и магнитными свойствами.

Новые материалы на основе нанокompозита FeNi₃/C перспективны для изготовления эффективных электромагнитных (ЭМ) экранов, так как

постоянное увеличение интенсивности техногенных ЭМ излучений приводит к повышению требований экологической защиты человека, ЭМ совместимости радиоэлектронных средств и обеспечения защиты информации [10-12]. Синтезируемый материал перспективен также и в качестве материала для высокоплотной магнитной записи информации.

Синтез нанокompозита FeNi_3/C с помощью ИК нагрева является экономически эффективным методом, так как он основан на принципе самоорганизации системы и характеризуется высокой скоростью химических превращений при низких температурах благодаря синергетическому эффекту ИК нагрева [8, 9, 13].

Целью работы является синтез нанокompозита FeNi_3/C на основе ПАН, $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ и $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ под действием ИК нагрева.

Экспериментальная часть

Для приготовления нанокompозита FeNi_3/C использовали ПАН, произведенный ОАО «Полимер», г. Новополоцк, Витебская обл. ($M_n=80000$ а.е.); $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, х.ч.; $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, х.ч.; диметилформамид, х.ч. На первой стадии синтеза готовился совместный раствор $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ и ПАН в диметилформамиде (ДМФА) при 70°C [14]. Полученный раствор помещали в сушильный шкаф при 70°C для удаления растворителя, или предварительно наносили на поверхность подложки с помощью центрифуги ($\omega=100$ об/мин) для синтеза нанокompозита FeNi_3/C в виде пленки. Полученный твердый остаток $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}/\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}/\text{ПАН}$ подвергали ИК нагреву на установке «Фотон» и QНС-P610CH (Ulvac-Riko, Япония) при $P=1$ Па. Были изготовлены композиты FeNi_3/C с $C_{\text{Fe}}=C_{\text{Ni}}=5; 10; 15; 20; 25$ масс. %.

УФ спектр композита $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}/\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}/\text{ПАН}$ записан с помощью спектрометра UV-1700 Pharma Speed Shimadzu. Кинетические и термохимические зависимости были исследованы методами термогравиметрического анализа (ТГА) и дифференциальной сканирующей

калориметрии (ДСК) на установках Discovery TGTM (TA Instruments, США) и Q20 (TA Instruments, США), соответственно, со скоростью нагрева 10 °С/мин при потоке N₂, равном 50 мл/мин [12].

Морфологию поверхности нанокompозита FeNi₃/C исследовали с помощью метода сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), используя низковакуумный растровый двухлучевой электронный микроскоп Quanta 3D FEG с ускоряющим напряжением от 200 до 30 кВ и сканирующий микроскоп JSM-6610LV фирмы JEOL. Поверхность анализировали методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) на микроскопе «Solver Next» с кремниевым кантилевером марки NSG10.

Структуру композита исследовали методами рентгенофазового анализа (РФА) и комбинационного рассеяния света (КРС) с помощью дифрактометра ДРОН-1,5 (CuK_α-излучения) с модернизированной коллимацией и спектрометра Renishaw Invia Raman microscope, оснащенный Ar⁺ - лазером с длиной волны λ=514,4 нм, соответственно [11].

Результаты и их обсуждение

На основе расчетов методом минимизации свободной энергии Гиббса были проанализированы химические реакции, происходящие при синтезе нанокompозита FeNi₃/C. Образование FeNi₃ происходит посредством восстановления промежуточного соединения NiFe₂O₄ с помощью H₂, выделяющегося при ИК нагреве ПАН (таблица 1).

УФ спектр композита FeCl₃·6H₂O/NiCl₂·6H₂O/ПАН, записанный с помощью спектрометра UV-1700 Pharma Speed Shimadzu, характеризуется областью поглощения с λ_{max}=320 нм, связанной с электронным переходом n-d-типа, характеризующим образование донорно-акцепторных комплексов Fe и Ni с нитрильными группами ПАН, что способствует однородному распределению Fe и Ni в нем. Эти комплексы обусловлены взаимодействием d-орбитали переходного металла с электронной парой атома N.

Термодинамические параметры химических реакций, происходящих при ИК нагреве $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}/\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}/\text{ПАН}$

№ п/п	Реакция	T, °C	ΔG , кДж/моль
1	$\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{FeCl}_3 + 6\text{H}_2\text{O}$	150	-15,58
2	$\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{NiCl}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$	150	-18,85
3	$4\text{FeCl}_3 + 3\text{O}_2 \rightarrow 2\text{Fe}_2\text{O}_3 + 6\text{Cl}_2$	250	-222,12
4	$3\text{NiCl}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow 3\text{NiO} + 2\text{FeCl}_3$	250	-217,61
5	$\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{NiO} \rightarrow \text{NiFe}_2\text{O}_4$	400	-22,2
6	$2\text{NiFe}_2\text{O}_4 + 10\text{NiO} + 18\text{H}_2 \rightarrow 4\text{FeNi}_3 + 18\text{H}_2\text{O}$	400	-381,88

Установлено, что при 100 °C в композите $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}/\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}/\text{ПАН}$ протекает эндотермический процесс (рис.1, кривая 2), связанный с дегидратацией композита, так как H_2O активно адсорбируется нитрильными группами ($-\text{C}\equiv\text{N}$) полимера. Такой вывод подтверждают кривые ДСК для $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (рис.1, кривая 3) и $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (рис.1, кривая 4), на которых не наблюдается подобного пика. При 150 °C на кривых ТГА и ДСК установлен пик (рис.1, кривая 1, 2), связанный с эндотермическими реакциями разложения кристаллогидратов $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ и $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, подтверждением чего являются кривые ДСК для $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ и $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (рис.1, кривая 3, 4), а также проведенные термодинамические расчеты (таблица 1, реакции 1, 2).

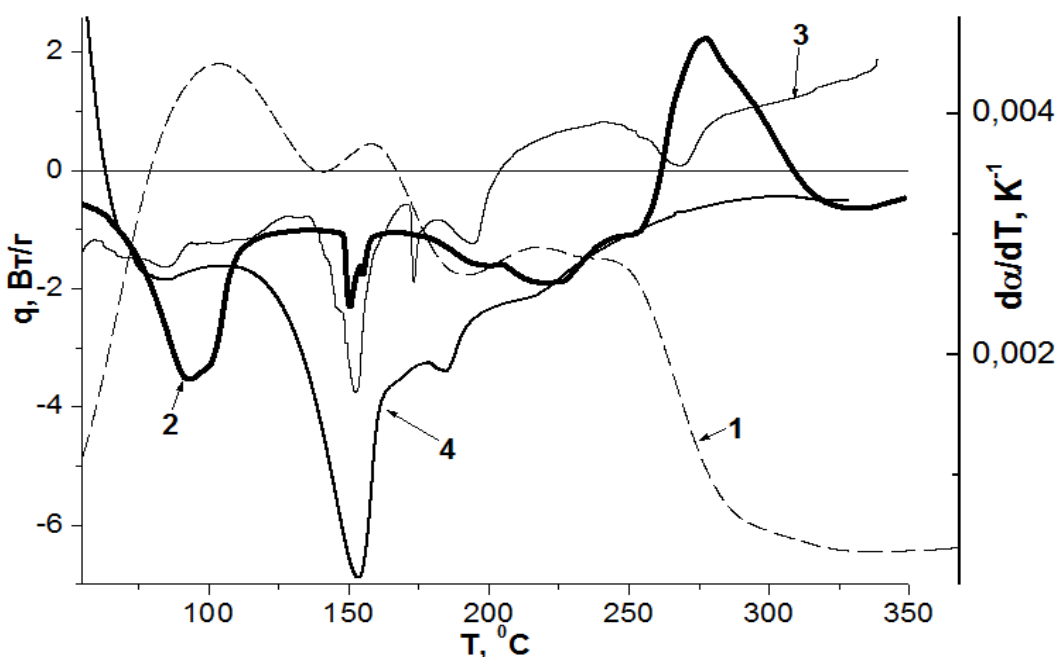


Рис. 1. – Зависимости производной степени превращения по температуре $d\alpha/dT(T)$ для композита $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}/\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}/\text{ПАН}$ (кривая 1) и теплоты реакции от температуры $q(T)$ для композита 2 - $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}/\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}/\text{ПАН}$, 3 - $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, 4 - $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$

Таким образом, пики на кинетической кривой композита $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}/\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}/\text{ПАН}$ при нагреве до 250°C (рис.1, кривая 1) характеризуют процессы дегидратации исходных компонентов композита. Из рассчитанных значений энергии активации ($E_a > 40$ кДж/моль) (таблица 2) дегидратация композита $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}/\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}/\text{ПАН}$ лимитируется кинетической стадией. Экзотермический пик при 275°C для композита $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}/\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}/\text{ПАН}$ (рис.1, кривая 2) соответствует процессу образования полисопряженной системы термообработанного ПАН.

Таблица № 2

Кинетические параметры процессов превращений в композитах $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}/\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}/\text{ПАН}$, $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}/\text{ПАН}$ и $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}/\text{ПАН}$ при ИК нагреве

№ п/п	Состав образца	$T_{\text{преврац.}}, ^\circ\text{C}$	$E_a,$ кДж/моль	$k_0, \text{мин}^{-1}$
1	$\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}/\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}/\text{ПАН},$ $C_{\text{Fe}}=C_{\text{Ni}}=20$ масс. %	100	166,7	$6,5 \cdot 10^{14}$
2		150	92,5	$6,0 \cdot 10^8$
3		225	90,8	$5,2 \cdot 10^8$
4	$\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}/\text{ПАН},$ $C_{\text{Ni}}=10$ масс. %	100	153,2	$1,4 \cdot 10^{14}$
5		160	126,0	$1,9 \cdot 10^9$
6	$\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}/\text{ПАН},$ $C_{\text{Fe}}=10$ масс. %	225	109,2	$1,7 \cdot 10^9$

На спектре КРС полоса в области $1560 \div 1580 \text{ см}^{-1}$ (рис.2) получила название G-пик, который присутствует в монокристаллическом графите и соответствует продольным колебаниям C-C связей углерода с sp^2 -типом гибридизации. Для графеновых структур положение этого пика смещено в

область 1600 см^{-1} . В исследуемых образцах этот пик расположен в области 1596 см^{-1} (рис.2, кривая 1).

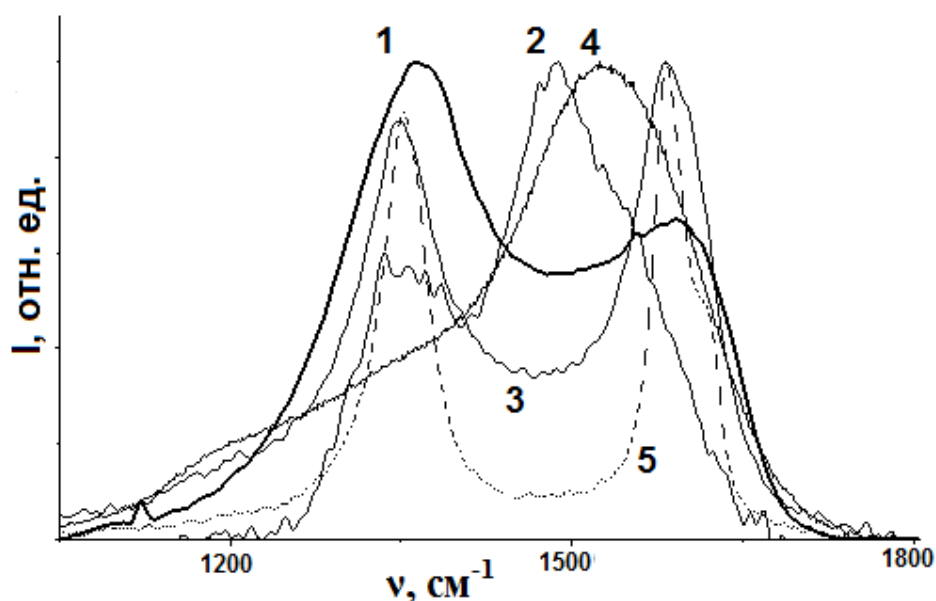


Рис. 2. – Спектр КРС нанокompозита FeNi_3/C с $C_{\text{Fe}}=C_{\text{Ni}}=10$ масс. %, полученного при $600\text{ }^\circ\text{C}$ (кривая 1), в сравнении со спектрами различных углеродных форм: 2 - нанокристаллический алмаз; 3 - нанокристаллический графит; 4 – аморфный алмазоподобный углерод; 5- поликристаллический графит

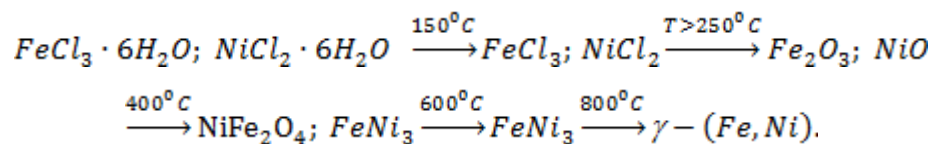
Таким образом, в нанокompозите FeNi_3/C присутствуют образования в виде графеновых структур, наблюдаемых также с помощью метода СЭМ (рис.3, б). В области $1340\text{--}1358\text{ см}^{-1}$ присутствует D-пик, который соответствует поликристаллическому графиту (рис. 2, кривая 5). По мере уменьшения размеров кристаллитов положение максимума смещается в область меньших значений волновых чисел. На спектре КРС (рис. 2, кривая 1) нанокompозита FeNi_3/C положение максимума D-пика соответствует значению $\nu=1358\text{ см}^{-1}$, что указывает на присутствие микрокристаллов графитоподобной фазы. Увеличенная ширина полосы 1358 см^{-1} определяет наличие нанокристаллических образований графитоподобной фазы. Сравнение спектров, а также полученные ранее результаты РФА позволили сделать предположение, что структура УМ нанокompозита представляет собой смесь аморфных, микро- и

нанокристаллических графитоподобных, а также графеновых углеродных фаз.

Активная деструкция ПАН в процессе ИК нагрева в присутствии Fe и Ni сопровождается газовой выделением H_2 , CO, CO_2 , NH_3 , H_2O , C_3H_6 , $C_2H_4=NH$, при этом образуется пористая структура углеродного материала с наночастицами $FeNi_3$ (рис.3, а, в, д). На снимке АСМ можно наблюдать, что УМ имеет фибриллярную структуру (рис.3, г). Образование искривленных углеродных структур при ИК нагреве следует из результатов квантово-химического моделирования (таблица 3) и подтверждается фотографиями, полученными с помощью метода СЭМ (рис.3, б).

Установлено с помощью метода РФА, что при $400\text{ }^\circ\text{C}$ образуется фаза $NiFe_2O_4$ (рис.4). Кроме того, уже при этой температуре образуются наночастицы $FeNi_3$. При $500\text{ }^\circ\text{C}$ происходит увеличение интенсивности рефлексов на спектрах РФА, соответствующих $FeNi_3$. При $600\text{ }^\circ\text{C}$ исчезает $NiFe_2O_4$ и наблюдается только фаза $FeNi_3$ с размером частиц около 14 нм. При повышении температуры до $800\text{ }^\circ\text{C}$ образуется твердый раствор $\gamma-(Fe,Ni)$.

На основе проведенных исследований предложен механизм образования нанокompозита $FeNi_3/C$. В соответствие с результатами проведенных исследований можно построить следующий ряд фазовых превращений $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ и $NiCl_2 \cdot 6H_2O$ в УМ при ИК нагреве:



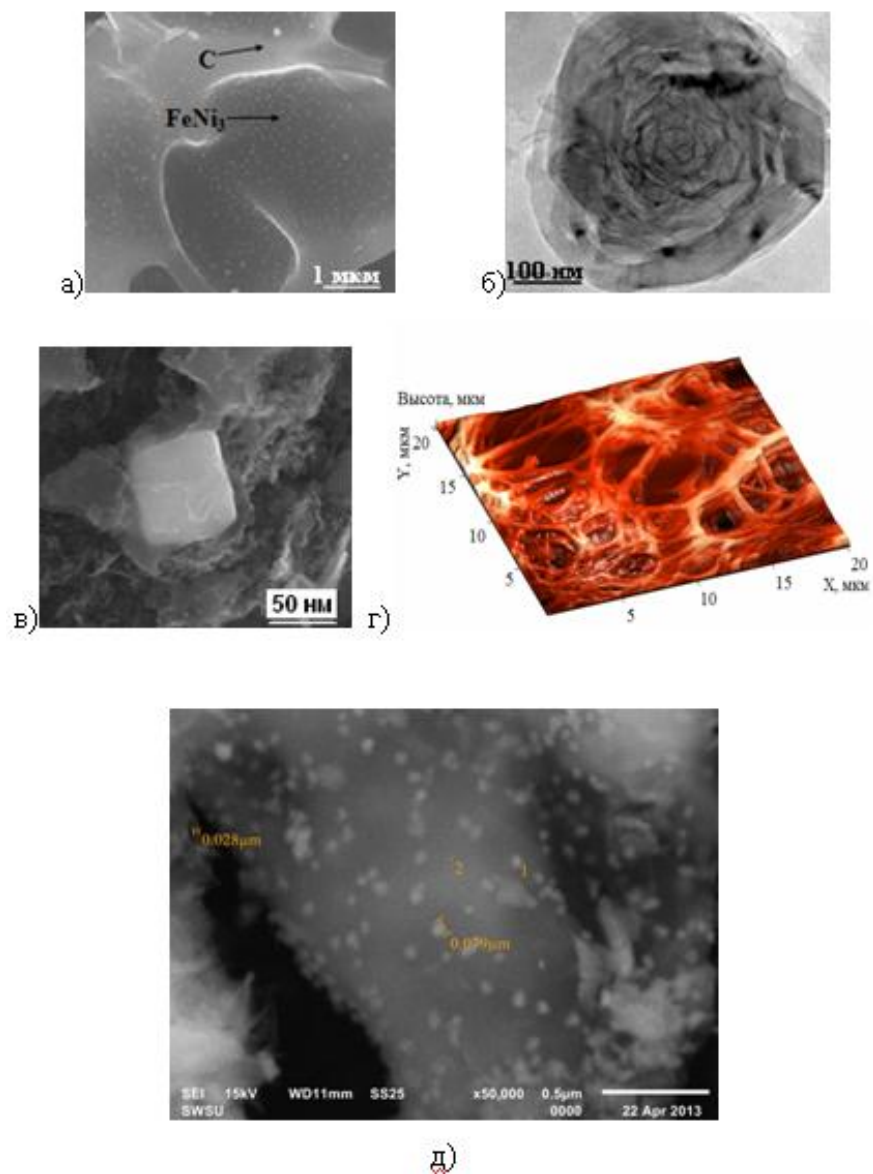


Рис. 3. – Фотографии нанокompозита FeNi_3/C , полученные с помощью методов а), б) СЭМ, $C_{\text{Fe}}=C_{\text{Ni}}=10$ масс. %, 600°C ; в) СЭМ, $C_{\text{Fe}}=C_{\text{Ni}}=20$ масс. %, 700°C ; г) АСМ, $C_{\text{Fe}}=C_{\text{Ni}}=10$ масс.%, 600°C ; д) СЭМ, $C_{\text{Fe}}=C_{\text{Ni}}=20$ масс. %, 700°C

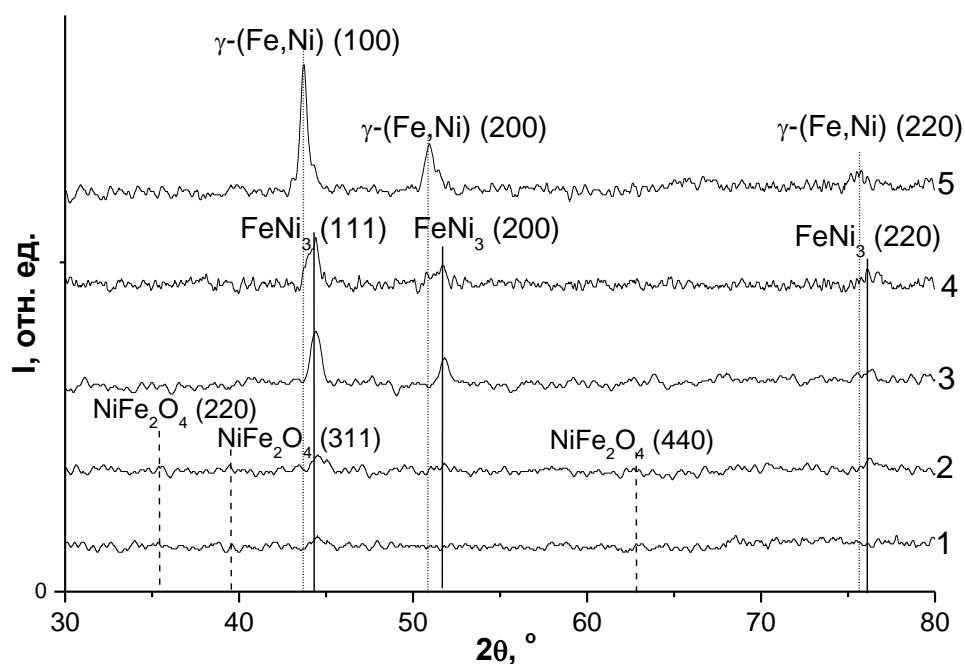


Рис. 4. – Спектры РФА композита FeNi₃/C ($C_{Fe}=C_{Ni}=10$ масс. %) после ИК нагрева при температуре, °C: 1 – 400; 2 – 500; 3 – 600; 4 – 700; 5 – 800

Измерения удельной электропроводности (σ) образцов проводили четырехзондовым методом на установке ВИК УЭС–07. Значение σ углеродного материала возрастает от 0,02 до 0,7 См/см с ростом температуры ИК нагрева от 600 до 800 °C из-за увеличения протяженности системы сопряженных π -связей с делокализованными электронами и возникновения графитоподобной структуры, что подтверждается результатами ИК спектроскопии. С ростом C_{Fe} и C_{Ni} от 5 до 20 масс. % σ увеличивается от 1,2 до 3,5 См/см, так как наночастицы металла, располагаясь между электропроводящими областями полисопряженных систем углеродного материала, содержащими делокализованные π -электроны, понижают энергетические барьеры для перехода электронов (рис. 5).

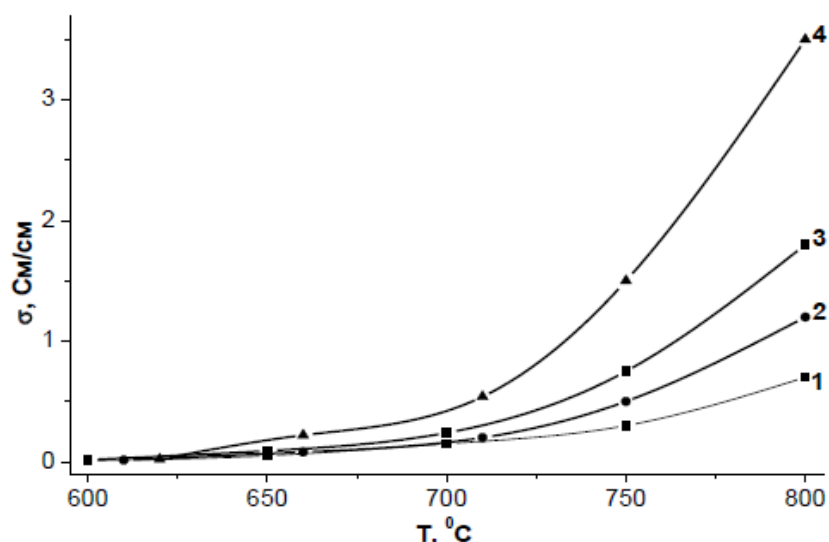


Рис. 5 – Зависимость удельной электропроводности (σ) от температуры ИК нагрева для: 1 – углеродного материала; FeNi₃/C с $C_{Fe}=C_{Ni}$, масс. %: 2 – 5; 10;

20

По мере образования наночастиц FeNi₃ с ростом температуры ИК нагрева нанокompозита FeNi₃/C от 500 до 700 °C наблюдается рост удельной намагниченности насыщения (M_s) от 3,5 до 13,5 Гс·см³/г и снижение коэрцитивной силы (H_C) от 75 до 12 Э (рис. 6, а, таблица 3).

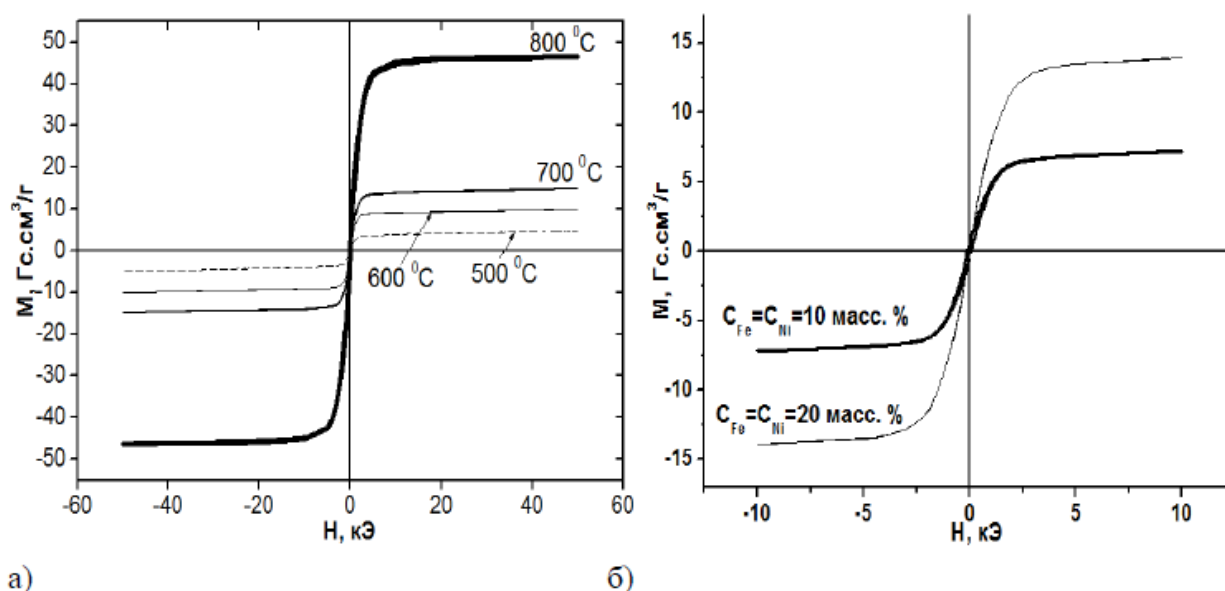


Рис. 6 – Зависимости удельной намагниченности (M) от напряженности магнитного поля (H), измеренные при 300 К для нанокompозита FeNi₃/C а) с $C_{Fe}=C_{Ni}=20$ масс. %, полученного при разных температурах ИК нагрева; б) полученного при 700 °C с разными $C_{Fe}=C_{Ni}$

Магнитные свойства нанокompозита FeNi₃/C в зависимости от температуры ИК нагрева

№ пп	T, °C	Состав частиц	d, нм	M _S , Гс·см ³ /Г	M _R , Гс·см ³ /Г	k _n (M _R /M _S)	H _C , Э
1	500	NiFe ₂ O ₄ , FeNi ₃	12	3,5	0,27	0.08	75
2	600	FeNi ₃	14	9,3	0,4	0,04	60
3	700	FeNi ₃	15	13,5	0,13	0,01	12
4	800	γ-(Fe,Ni)	40	45,1	2,4	0,05	75

С ростом температуры снижается содержание фазы NiFe₂O₄ в композите, таким образом, вклад магнитомягких свойств FeNi₃ возрастает, что приводит к снижению H_C. С ростом C_{Fe} и C_{Ni} в композите от 10 до 20 масс. % наблюдается рост M_S от 7,5 до 13,5 Гс·см³/Г (рис. 6, б).

Исследованы механические свойства нанокompозита FeNi₃/C методом наноиндентирования с помощью сканирующего нанотвердомера «НаноСкан». Установлено, что микротвердость нанокompозита FeNi₃/C (H=1,31 ГПа) выше, чем углеродного материала (H=0,53 ГПа) из-за упрочняющего эффекта наночастиц FeNi₃.

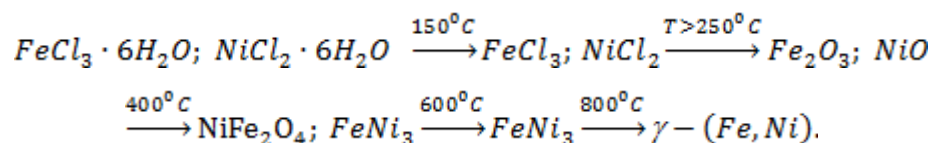
Выводы

Таким образом, разработан синтез нанокompозита FeNi₃/C на основе ПАН, FeCl₃·6H₂O и NiCl₂·6H₂O, в результате которого впервые под действием ИК нагрева при 400÷700 °C получен нанокompозит FeNi₃/C с размером частиц FeNi₃ от 10 до 80 нм, равномерно распределенных в УМ.

С помощью термодинамического расчета, основанного на минимизации энергии Гиббса, подтвержден синтез нанокompозита FeNi₃/C при T≥400 °C восстановлением ионов Fe и Ni с помощью H₂, выделяющегося в процессе карбонизации полиакрилонитрила при ИК нагреве.

Впервые изучены кинетика и механизм образования при ИК нагреве

наночастиц $FeNi_3$ в полиакрилонитриле, содержащем $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ и $NiCl_2 \cdot 6H_2O$. Экспериментально обосновано, что процессы нагрева композита $FeCl_3 \cdot 6H_2O/NiCl_2 \cdot 6H_2O/ПАН$ до $250^\circ C$ характеризуются процессами дегидратации исходных компонентов композита с лимитирующей кинетической стадией ($E_a > 40$ кДж/моль). При ИК нагреве при 600 и $700^\circ C$ образуются аморфные, микро - и нанокристаллическая графитоподобные углеродные фазы, графеновые структуры, и происходят следующие превращения $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ и $NiCl_2 \cdot 6H_2O$ в углеродном материале:



Разработанный материал в виде наноразмерных пленок может эффективно использоваться в качестве материала-носителя для сверхплотной магнитной записи информации. Плотность записи информации в таком носителе достигается $(85-100)$ Гб/дюйм².

Работа выполнена в рамках проекта «Разработка нового класса наноразмерных материалов на основе пленочных магнитных электретов и мультиферроиков для сверхплотной магнитной и магнитооптической записи информации» (ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОНТРАКТ № 11.519.11.4026, тема №7219202)

Литература:

1. Фиговский О.Л. Новейшие нанотехнологии (обзор) [Электронный ресурс] // «Инженерный вестник Дона», 2012, № 1. – Режим доступа: <http://ivdon.ru/magazine/archive/n1y2012/725> (доступ свободный) – Загл. с экрана. – Яз. рус.
2. Фиговский О.Л. Нанотехнологии для новых материалов [Электронный ресурс] // «Инженерный вестник Дона», 2012, № 3. – Режим доступа: <http://ivdon.ru/magazine/archive/n3y2012/1048> (доступ свободный) – Загл. с экрана. – Яз. рус.

3. Кожитов Л.В., Емельянов С.Г., Косушкин В.Г., Стрельченко С.С., Пархоменко Ю.Н., Козлов В.В., Кожитов С.Л. Технология материалов микро- и наноэлектроники [Текст]: Монография / Л.В. Кожитов, С.Г. Емельянов, В.Г. Косушкин и др. – Курск: Юго-Зап. гос. университет, 2012. – 862 с.

4. Губин С.П., Кокшаров Ю.А., Хомутов Г.Б., Юров Г.Ю. Магнитные наночастицы: методы получения, строение и свойства [Текст] // Успехи химии, 2005. – №6. – С.539-574.

5. S. Sun, H. Zeng, J. Am. Size-Controlled Synthesis of Magnetite Nanoparticles [Текст] // Chem. Soc., 2002. – №124. – С.124-128.

6. Кекало И.Б. Физическое материаловедение прецизионных сплавов. Сплавы с особыми магнитными свойствами [Текст]: Монография / И.Б. Кекало. – М.: Металлургия, 1989. – 496 с.

7. Кожитов Л.В., Косушкин В.Г., Крапухин В.В., Пархоменко Ю.Н. Технология материалов микро- и наноэлектроники [Текст]: Монография / Л.В. Кожитов, В.Г. Косушкин В.В. Крапухин и др. – М.: МИСиС, 2007. – 544 с.

8. Киселев Б.Г., Кожитов Л.В., Козлов В.В., Ельцина И.В., Костикова А.В. Рынок нанопродукции: перспективы и ограничения [Текст] // Известия Вузов. Цветные металлы, 2011. – №10. – С.6-9.

9. Киселев Б.Г., Козлов В.В., Добрякова Е.И., Костикова А.В., Попкова А.В. Области применения и анализ рынка потребления графена [Текст] // Известия Вузов. Цветные металлы, 2012. – №12. – С.7-10.

10. Кожитов Л.В., Костикова А.В., Козлов В.В., Хурса В.И. Синтез нанокompозита FeNi_3/C из системы $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}/\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ /полиакрилонитрил при помощи нагрева инфракрасным излучением [Текст] // Известия Вузов. Материалы электронной техники, 2011. – № 3. – С.48-52.

11. Кожитов Л.В., Костикова А.В., Козлов В.В., Тарала В.А. Структурные особенности нанокompозита FeNi_3/C , полученного при ИК-

нагреве [Текст] // Известия Вузов. Материалы электронной техники, 2012. – № 2. – С.61-64.

12. Кожитов Л.В., Козлов В.В., Костикова А.В., Попкова А.В. Новые металлоуглеродные наноккомпозиты и углеродный нанокристаллический материал с перспективными свойствами для развития электроники [Текст] // Известия Вузов. Материалы электронной техники, 2012. – №3. – С.60-68.

13. Кожитов Л.В., Костикова А.В., Козлов В.В. Способ получения наноккомпозита FeNi₃/пиролизированный полиакрилонитрил [Текст] // Патент на изобретение №2455225 от 10.07.2012.

14. Kozhitov L.V., Kostikova A.V., Kozlov V.V., Bulatov M.Ph. The FeNi₃/C Nanocomposite Formation from the Composite of Fe and Ni Salts and Polyacrylonitrile under IR-Heating [Текст] // Journal of nanoelectronics and optoelectronics, 2012. – № 7. – P.419-422.