



УДК: 620.93

ОСОБЕННОСТИ ФЕРРИТА НИКЕЛЯ, СИНТЕЗИРОВАННОГО НА СОЛНЕЧНОЙ ПЕЧИ

Пайзуллаханов Мухаммад-Султанхан – доктор технических наук DSc,
ORCID 0000-0003-1156-6459, e-mail fayz@bk.ru

Парпиев Одилхужа Раимхужаевич - кандидат физико-математических наук, e-mail o.parpiev@imssolar.uz,

Шерматов Жавахир Зафарович – доктор философии PhD,
shermatov-82@bk.ru

Институт материаловедения АН РУз, Узбекистан, 100084, г.Ташкент, ул.Бодомзор йули 2-Б

Для контактов: Пайзуллаханов Мухаммад-Султанхан – доктор технических наук,
E-mail: fayz@bk.ru

Аннотация. Введение. Метод синтеза играет важную роль в получении материала с заданным размером частиц, структурой, микроструктурой и удельной поверхностью, фазовой стабильностью. Эти параметры в совокупности обуславливают определенные свойства. Основными методами синтеза являются твердофазные реакции, термическое разложение, гидротермальные и сольвотермические методы, совместное осаждение, золь-гель и микроволновая обработка. При этом каждый метод имеет свои преимущества и недостатки и нет оптимального способа получения высококачественных ферритовых материалов из шпинели. Поэтому изучение структуры и свойств феррита никеля $NiFe_2O_4$, синтезированного из расплава смеси $Fe_2O_3 + NiO$ на солнечной печи

Методы и материалы. Смесь перемалывали в агатовой ступке с добавкой этилового спирта (10 мас.%), формовали в форме таблеток диаметром 12мм и высотой 15мм. Таблетки помещали на плавильный столик, находящегося на фокальном пятне формы круга диаметром 30мм солнечной печи. Расплав охлаждали путем слива в воду. Закаленные отливки мололи, формовали, спекали при 1100°C.

Результаты. Получен однофазный материал представляющий кубическую модификацию феррита никеля $NiFe_2O_4$ с параметром решетки 8,87 Å. Свеже синтезированный материал проявлял магнитомягкий характер с параметрами $H_c=60$ Э, $M_s=30$ ети/г. В то время как обожженный при 1100°C материал проявил повышенные параметры $H_c=80$ Э, $M_s=50$ ети/г.

Заключение. Материал, полученный синтезом из расплава на солнечной печи по структуре и магнитным параметрам может быть использован в каталитических процессах синтеза водорода риформингом органического сырья.

Ключевые слова: шпинели, синтез из расплава, ферриты, кобальт, никель, топливный элемент, магнитный гистерезис, катализатор.

Дата поступления: 30.01.2024. После обработки: 11.03.2024. Принято печать: 14.03.2024

UDC 620.93

FEATURES OF NICKEL FERRITE SYNTHESIS IN A SOLAR FURNACE

Paizullakhanov Muhammad-Sultankhan – Doctor of Technical Sciences DSc,
ORCID 0000-0003-1156-6459, e-mail fayz@bk.ru





Parpiev Odilhuzha Raimkhuzhaevich - candidate of physical and mathematical sciences,
e-mail o.parpiev@imssolar.uz
Shermatov Zhavakhir Zafarovich – Doctor of philosophy PhD,
e-mail shermatov-82@bk.ru

Institute of Materials Science of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan,
Uzbekistan, 100084, Tashkent, Bodomzor Yuli street 2-B

Abstract. Introduction. *The synthesis method plays an important role in obtaining a material with a given particle size, structure, microstructure and specific surface area, and phase stability. These parameters together determine certain properties. The main synthesis methods are solid-phase reactions, thermal decomposition, hydrothermal and solvothermal methods, co-precipitation, sol-gel and microwave processing. However, each method has its own advantages and disadvantages, and there is no optimal way to obtain high-quality ferrite materials from spinel. Therefore, the study of the structure and properties of nickel ferrite NiFe₂O₄, synthesized from a melt of a mixture of Fe₂O₃ + NiO in a solar furnace*

Methods and materials. *The mixture was ground in an agate mortar with the addition of ethyl alcohol (10 wt.%) and molded into tablets with a diameter of 12 mm and a height of 15 mm. The tablets were placed on a melting table located on the focal spot of a circle shaped with a diameter of 30 mm of the solar furnace. The melt was cooled by pouring into water. Hardened castings were ground, molded, and sintered at 1100°C.*

Results. *A single-phase material representing a cubic modification of nickel ferrite NiFe₂O₄ with a lattice parameter of 8.87 Å was obtained. The freshly synthesized material exhibited a soft magnetic character with parameters H_c=60 Oe, M_s=30 emu/g. While the material fired at 1100°C showed increased parameters H_c=80 Oe, M_s=50 emu/g.*

Conclusion. *The material obtained by synthesis from a melt in a solar oven can be used in catalytic processes of hydrogen synthesis by reforming organic raw materials due to its structure and magnetic parameters.*

Key words: *spinels, melt synthesis, ferrites, cobalt, nickel, fuel cell, magnetic hysteresis, catalyst*

UO‘K 620.93

QUYOSH PECHINDA NIKEL FERRIT SINTEZI XUSUSIYATLARI

Payzullaxonov Muhammad-Sultonxon – texnika fanlari doktori (DSc)

ORCID 0000-0003-1156-6459, e-mail fayz@bk.ru

Parpiev Odilxuja Raimxujaevich – fizika-matematika fanlari nomzodi,

e-mail o.parpiev@imssolar.uz

Shermatov Javahir Zafarovich – falsafa doktori PhD,

shermatov-82@bk.ru

O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Materialshunoslik instituti,

O‘zbekiston, 100084, Toshkent sh., Bodomzor yo‘li ko‘chasi 2-B

Muloqot uchun: *Payzullaxonov Muhammad-Sultonxon – texnika fanlari doktori,*

E-mail: fayz@bk.ru

Annotatsiya. Kirish. *Sintez usuli ma‘lum zarracha o‘lchami, tuzilishi, mikro tuzilishi va o‘ziga xos sirt maydoni va faza barqarorligiga ega bo‘lgan materialni olishda muhim rol o‘ynaydi. Ushbu parametrlar birgalikda ma‘lum xususiyatlarni aniqlaydi. Asosiy sintez usullari: qattiq fazali reaksiyalar, termik parchalanish, gidrotermik va solvotermik usullar, birgalikda cho‘ktirish, sol-gel*



va mikroto'ldinli ishlov berish. Biroq, har bir usul o'zining afzalliklari va kamchiliklariga ega va shpineldan yuqori sifatli ferrit materiallarini olishning optimal usuli yo'q. Shuning uchun quyosh pechida $Fe_2O_3 + NiO$ aralashmasi eritmasidan sintez qilingan $NiFe_2O_4$ nikel ferritining tuzilishi va xususiyatlarini o'rganish.

Usullar va materiallar. Aralash agat ohakchasida etil spirti (10 og'irlik) qo'shilgan holda maydalangan va diametri 12 mm va balandligi 15 mm bo'lgan tabletkalarga solingan. Tabletkalar quyosh pechining diametri 30 mm bo'lgan doira shaklidagi markazlashtirilgan nuqtada joylashgan eritish stoliga qo'yildi. Eritma suvga quyilishi bilan sovutilgan. Qattiqlashtirilgan quymalar 1100 °C da maydalangan, qoliplangan va sintirlangan.

Natijalar. 8,87 Å panjara parametri bilan nikel ferrit $NiFe_2O_4$ ning kubik modifikatsiyasini ifodalovchi bir fazali material olindi. Yangi sintez qilingan material $H_c=60$ Oe, $M_s=30$ emu/g parametrlari bilan yumshoq magnit xarakterga ega bo'ldi. 1100 °C da pishirilgan material $H_c = 80$ Oe, $M_s = 50$ emu / g ko'tarilgan parametrlarni ko'rsatdi.

Xulosa. Quyosh pechida eritmadan sintez yo'li bilan olingan material tuzilishi va magnit parametrlari tufayli organik xom ashyoni isloh qilish orqali vodorod sintezining katalitik jarayonlarida qo'llanilishi mumkin.

Kalit so'zlar: shpinel, eritma sintezi, ferritlar, kobalt, nikel, yonilg'i xujayrasi, magnit histerezis, katalizator.

Для цитирования: Пайзуллаханов М.С., Партиева О.Р., Шерматов Ж.З. Особенности феррита никеля, синтезированного на солнечной печи // Альтернативная энергетика. 2024. №1(12). С. 26-36.

Введение

Соединения, соответствующие химической формуле AB_2O_4 , где А и В катионы металлов в тетраэдрическом (А) и октаэдрическом (В) положениях, называемые шпинель структурами представляют большой интерес для исследования [1]. Например, ферриты кобальта или никеля проявляют высокую диэлектрическую проницаемость в области высоких частот и высокое электрическое сопротивление [2]. Поэтому они имеют широкий спектр применения, например, в катализе [3], высокочастотной электронике [4], газовом зондировании [5], в спинтронике и биомедицинских приложениях [6,7]. Очевидно, что основными характеристиками этих приложений являются настройка электросопротивления, мягкие ферромагнитные свойства при комнатной температуре, снижение потерь мощности из-за вихревых токов и химическая стабильность материала в различных средах [8]. Свойства ферритов во многом определяются особенностями их микроструктуры. Размер и форма частиц могут различаться для ферритов, синтезированных разными способами [9]. Еще одной особенностью таких структур, например, $CoFe_2O_4$, является смешанная проводимость, что позволяет использовать их в качестве каталитических материалов, заменяющих дорогостоящую платину в твердооксидных топливных элементах (ТОТЭ).

Интерес к материалам этого класса особо возрастает в условиях бурно развивающейся водородной энергетики [10, 11]. Однако такой материал хорошо взаимодействует с углекислым газом и разлагается на карбонаты и оксиды, что ограничивает его применимость [12]. Шпинели используются в твердооксидных топливных элементах для преобразования химической энергии в электричество [13,14]. При этом такие устройства имеют высокий КПД (более 80%) и очень низкий уровень выбросов вредных газов. с высокой эффективностью, низким уровнем выбросов и топливной гибкостью [15].

В работе [16] показано, что кислород проводящие материалы на основе фосфогипса значительно повышают эффективность получения, обогащенного водородом синтез-газа (72,51 %) при температуре реакции около 1023 К.





Метод синтеза играет важную роль в получении материала с заданным размером частиц, структурой, микроструктурой и удельной поверхностью, фазовой стабильностью. Эти параметры в совокупности обуславливают определенные свойства. Основными методами синтеза являются твердофазные реакции, термическое разложение, гидротермальные и сольвотермические методы, совместное осаждение, золь-гель и микроволновая обработка. При этом каждый метод имеет свои преимущества и недостатки и нет оптимального способа получения высококачественных ферритовых материалов из шпинели [17, 18].

В данной работе изучены электрические и магнитные свойства феррита никеля NiFe_2O_4 , синтезированного из расплава смеси $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{NiO}$ на солнечной печи.

Методология

Для синтеза феррита никеля использовали смесь в стехиометрическом соотношении компонентов - оксидов железа и никеля квалификации ч.д.а. ($\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{NiO}$). Смесь перемалывали в агатовой ступке с добавкой этилового спирта (10мас.%), формовали в форме таблеток диаметром 12мм и высотой 15мм. Таблетки помещали на плавильный столик, находящегося на фокальном пятне формы круга диаметром 30мм солнечной печи [19-21].

Плотность потока солнечного излучения, необходимая для нагрева материала до температуры плавления определяется формулой Стефана-Больцмана

$$Q = \varepsilon \sigma T^4,$$

где ε – интегральная поглощательная способность тела (степень черноты), T – температура; σ – постоянная Стефана-Больцмана, равная $5.67 \times 10^{-8} \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Так при плотности потока $200 \text{Вт}/\text{см}^2$ температура материала может достигать до 2100°C , что достаточно для его плавления.

Капли расплава падали с высоты 0,70 м в воду с комнатной температурой и охлаждались со скоростью 10^3 град/с [22]. Такие условия охлаждения позволили зафиксировать высокотемпературные структурные состояния материала [23].

Капли расплава загружаясь в воду растрескивались на мелкие стеклоподобные частицы произвольной формы. Для исследования такого материала мололи его до тонины 60 мкм, сушили при 400°C , формовали образцы в виде цилиндров $\varnothing 8\text{мм}$ высотой 15мм. Образец такого материала обозначили как свежесинтезированный – С1. Образец «С1», обожженный при температуре 1100°C с последующим произвольным охлаждением, обозначили как С2.

На полученных образцах проводили микроструктурный анализ на растровом электронном микроскопе JEOL, и рентгеноструктурный анализ на дифрактометре Panalytical Empyrean с анодом из меди с $\text{K}\alpha$ излучением в геометрии отражения Брэгга-Брентано с $\text{CuK}\alpha$ излучения ($\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$). Данные были получены между $20 \leq 2\theta \leq 60^\circ$. Щелевая система была выбрана для обеспечения того, чтобы рентгеновские лучи пучок полностью находился в пределах образца во всем диапазоне 2θ .

Намагниченность насыщения (M_s), коэрцитивную силу (H_c) и остаточную намагниченность (M_r) определяли на коэрцитиметре КИМ-2М.

Плотность образцов С2 определяли пикнометрически как

$$\rho_{ef} = \frac{m}{V_{ef}},$$

значения, которого составило $4.87 \text{ г}/\text{см}^3$ ю А образцы С1 представляли рыхлую структуру и имели плотность $1,82 \text{ г}/\text{см}^3$.

Рентгеновская плотность рассчитывалась по формуле:

$$d_x = \frac{8M}{a^3 N_A}$$

где a - параметр решетки, N_A – число Авогадро, M – молярная масса. Как показывают расчеты рентгеновская плотность составляет $5,28 \text{ г}/\text{см}^3$

Для оценки степени кристалличности образцов пользовались соотношением:

$$\left(1 - \frac{I_{fon}}{I_{311}}\right) \times 100\%$$

где I_{fon} – интенсивность фонового рассеяния рентгеновского излучения, I_{311} – интенсивность рентгеновского отражения на плоскости 311.

Вклад микронапряжений в кристаллической решетке вдоль со средним размером кристаллитов, приводящим к уширению пика, рассчитывали по методу Уильямсона-Холла с использованием.

$$\beta \cos\theta = \left(\frac{K\lambda}{t}\right) + 4\epsilon \sin\theta$$

где β - полная ширина на половине высоты (FWHM full width at half maximum), θ - угол дифракции, K - коэффициент формы, λ - излучение длина волны, t - средний размер кристаллитов, ϵ - размер микронапряжения. Линейная аппроксимация графика зависимости $\beta \cos\theta$ от $4\sin\theta$ дает ϵ как наклон и $K\lambda/t$ как точка пересечения.

Исследования морфологии и микроструктурных особенностей образцов материалов использовали проводили методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) Центра передовых технологий Министерства инновационного развития.

Электрическое сопротивление измеряли четырех-контактным методом в интервале температур 300 – 1300 К.

Экспериментальные результаты и их обсуждение.

Анализ показал, что микроструктура образцов материалов обнаруживала произвольно ориентированных сферолитовых и искривленных цилиндрических зерен с размерами в интервале 5 – 40 мкм [23]. Однако отжиг образца при 1100°C обуславливает увеличение среднего размера зерен до 50 мкм.

На рис.1 приведена рентгенограмма образца свежесинтезированного феррита никеля.

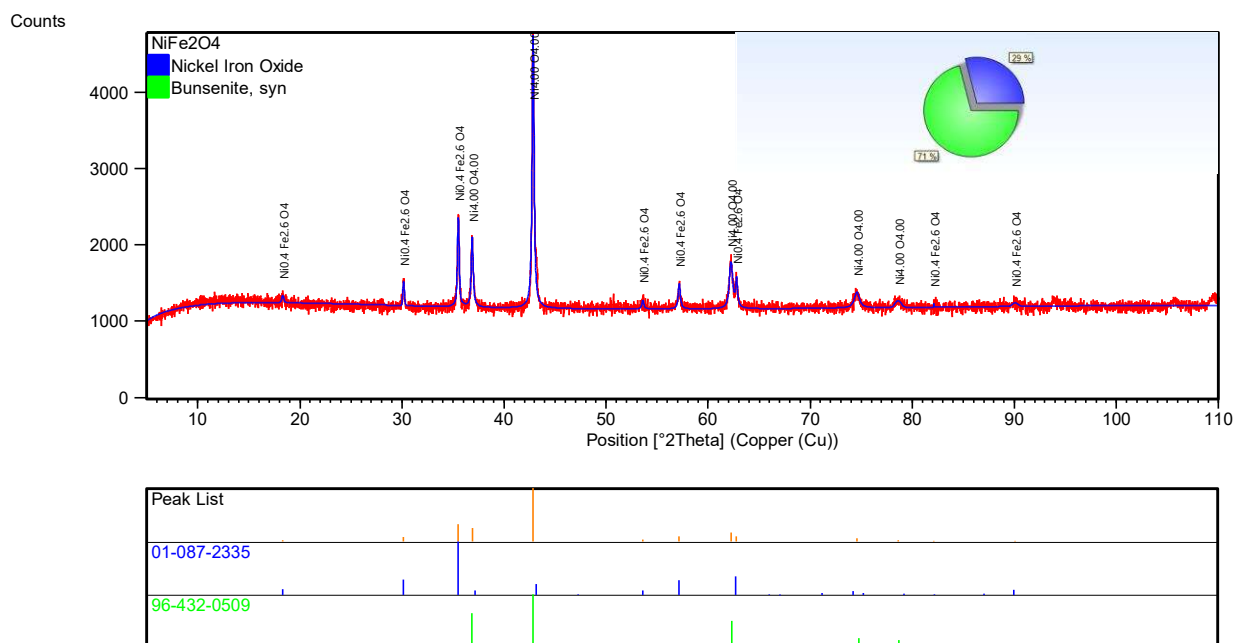
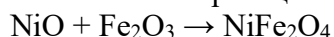


Рис.1. Рентгенограмма образца свежесинтезированного феррита никеля.
Fig.1. X-ray diffraction pattern of a sample of freshly synthesized nickel ferrite.

Анализ рентгенограммы показал, что дифракционная картина описывает структуру однофазной кубической шпинели феррита никеля. По-видимому, процесс плавления смеси исходных реагентов сопровождается химической реакцией



с образованием феррита никеля.



Наблюдаемые дифракционные отражения при углах рассеяния $2\theta = 29,10, 34,12, 44,02, 54,34, 55,84$ и $61,40$ относились к плоскостям решетки (220), (311), (222), (422), (511) и (440), соответственно. Картина в целом соответствует картотеке JCPDS 10-0325.

Структуру рассчитывали по формуле

$$a = d\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}$$

Определено, что кристаллическая решетка имеет постоянную $a=8,87 \text{ \AA}$. Для феррита никеля, синтезированного из расплава на солнечной печи значение рентгеновской плотности, оставило $5,28 \text{ г/см}^3$.

На рис.2 приведены кривые магнитного гистерезиса для образцов феррита никеля типа С1 (кривая 1) и типа С2 (кривая 2).

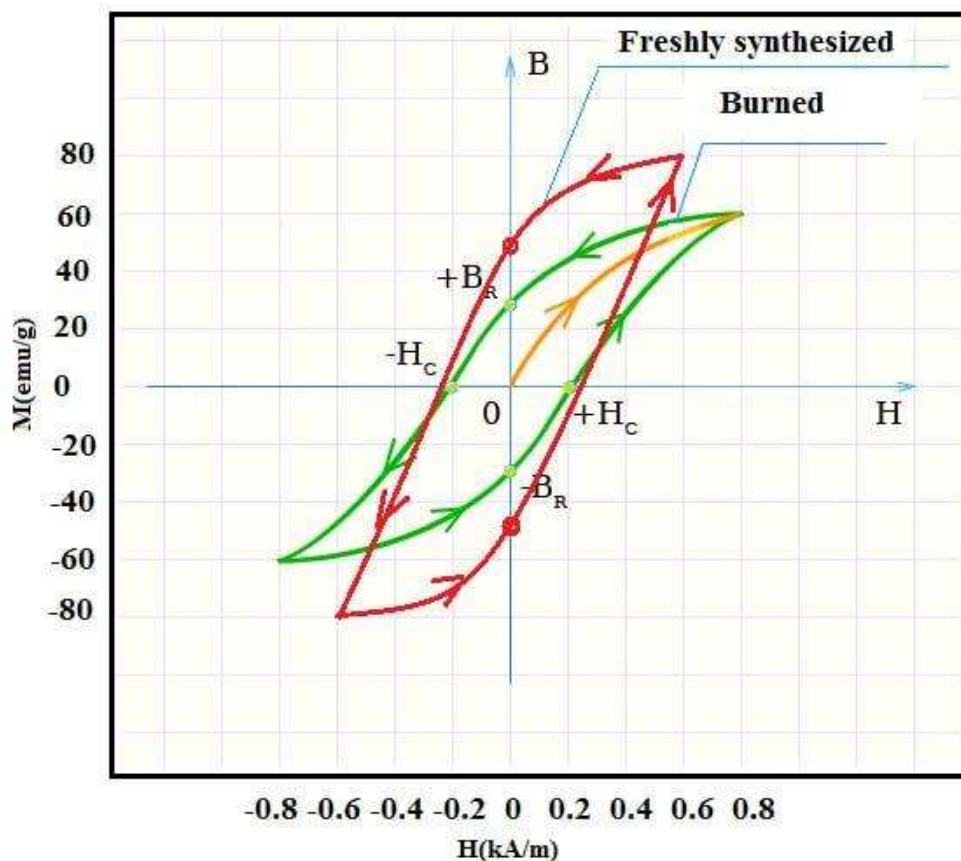


Рис.2. Магнитный гистерезис для образцов свеж синтезированного (кривая 1) и обожженного при 1100°C (кривая 2) феррита никеля.

Fig.2. Magnetic hysteresis for samples of freshly synthesized (curve 1) and nickel ferrite fired at 1100°C (curve 2).

Из рис.2 видно, что коэрцитивная сила (H_c) для обоих типа образцов составляет 200 А/м . Намагниченность насыщения (M_s) и остаточная намагниченность (M_r) разнятся для образцов свеж синтезированного из расплава (кривая 1) и обожженного при 1100°C феррита никеля (кривая 2). Так по кривой 1 можно определить, что $M_s=80 \text{ emu/g}$ и $M_r=50 \text{ emu/g}$. В то время как по кривой 2 следует, что $M_s=60 \text{ emu/g}$ и $M_r=30 \text{ emu/g}$. Образец типа С1 проявляет более высокую намагниченность, нежели образец типа С2.

На рис.3 приведена зависимость электрической проводимости образца, обожженного при 1100°C от температуры. Как видно из рис.3, электрическая проводимость на постоянном токе увеличивается с повышением температуры. Можно предположить, что механизм электрической проводимости связан с прыжками поляронов [24]. По-видимому, при достаточно большой тепловой энергии электроны пересекают барьер и участвуют в прыжках.

С увеличением температуры скорость успешных прыжков увеличивается, что в свою очередь приводит к увеличению проводимости [15]. С другой стороны, повышение температуры также стимулирует увеличение количества вакансий, которые априори ответственны за увеличение проводимости по модели скачкообразной релаксации [16].

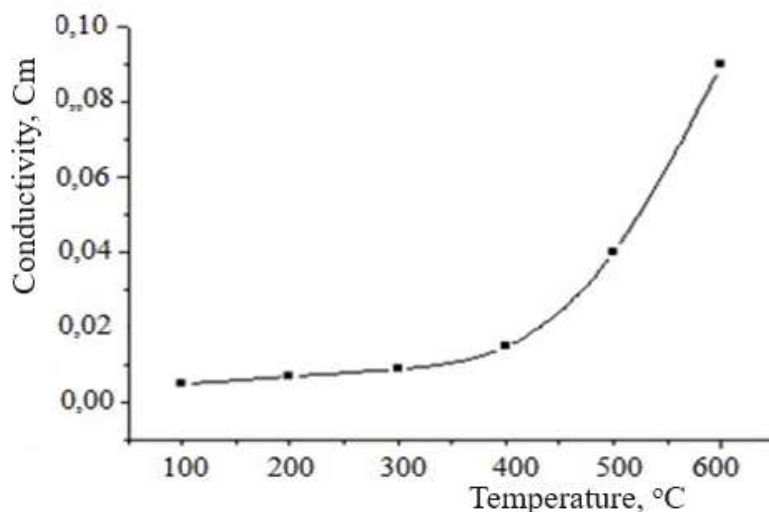
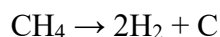


Рис.3. Зависимость электрической проводимости образца, обожженного при 1100°C от температуры.

Fig.3. Dependence of the electrical conductivity of a sample fired at 1100°C on temperature.

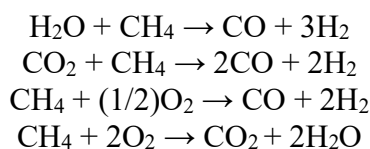
Как показывает анализ данных [25], добавка водорода в топливные смеси способна существенно повысить КПД двигателей внутреннего сгорания, снизить химический недожог и уменьшить содержание вредных примесей в отходящих газах. В этом отношении перспективной технологией, позволяющей получать водородсодержащее топливо с высокой концентрацией водорода без примесей оксидов углерода, является каталитический пиролиз углеводородов:



Пиролиз проводят с использованием проточной каталитической установки Autoclave Engineers BTRS-Jn в трубчатом металлическом реакторе при температуре процесса 675 °C и давлениях 1 и 5 атм.

Из вышеприведенной реакции видно, что помимо водорода, в ходе данного процесса образуется также углерод. Получаемый при этом углерод представляет собой нановолокнистый продукт с уникальными физико-химическими свойствами [26].

Следуя выводам работ [27,28], можно предположить, что состава NiFe₂O₄ может быть использован как катализатор при получении водорода посредством риформинга и окислении метана:



Предварительные опыты по получению синтез-газа показали, что шпинель структуры композиции по эффективности не уступают фосфогипсу [16]. Однако реализация таких подходов требует разработки и создания специальной аппаратуры, позволяющей управлять потоками газов и воды в реакционную камеру, облучаемую концентрированным потоком солнечного излучения высокой плотности. Однако реализация таких подходов требует разработки и создания специального оборудования, позволяющего контролировать потоки газов и воды в реакционную камеру, облучаемой концентрированным потоком солнечного излучения высокой плотности [29,30].



Заклучение

Синтезирован никель-ферритовый материал методом плавки на солнечной печи смеси исходных оксидных компонентов. Материал представлял собой однофазной кубической шпинель феррита никеля NiFe_2O_4 с параметром решетки 8,87 Å. Синтезированный материал проявлял магнитомягкий характер с параметрами $H_c=60$ Э, $M_s=30$ emu/g. В то время как обожженный при 1100°C материал проявил повышенные параметры $H_c=80$ Э, $M_s=50$ emu/g. Такие значения структуры и магнитных параметров позволяют предположить, что материал, синтезированный из расплава на солнечной печи, может быть использован в каталитических процессах получения сингаза риформингом органического сырья.

Литература

- [1] Subramanian Yuvaraj, Ramakrishnan Kalai Selvan and Yun Sung Lee. An Overview of AB_2O_4 - and A_2BO_4 -Structured Negative Electrodes for Advanced Li-Ion Batteries// See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/291186670>
- [2] Alan Fernando Ney Boss, Antonio Carlos da Cunha Migliano Ingrid Wilke. Terahertz frequency electrical properties of nickel cobalt ferrites// Conference: 2016 41st International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz waves (IRMMW-THz DOI: [10.1109/IRMMW-THz.2016.7758775](https://doi.org/10.1109/IRMMW-THz.2016.7758775))
- [3] Atiq S., Majeed M., Ahmad A., Abbas S.K., Saleem M., Riaz S., Naseem S. Synthesis and investigation of structural, morphological, magnetic, dielectric and impedance spectroscopic characteristics of Ni-Zn ferrite nanoparticles. *Ceram. Int.* 2017. V.43. p.2486–2494
- [4] Balgude, S.D., Barkade, S.S. and Mardikar, S.P., 2020. Metal Oxides for High-Performance Hydrogen Generation by Water Splitting. In *Multifunctional Nanostructured Metal Oxides for Energy Harvesting and Storage Devices*, CRC Press, PP. 169-194.
- [5] Pablo Korth Pereira Ferraz, Robert Schmidt, Delf Kober, Julia Kowal. 2018. A high frequency model for predicting the behavior of lithium-ion batteries connected to fast switching power electronics. *Journal of Energy Storage*, 18: 40-49.
- [6] Satish Meshram, Sagar Balgude, Imtiaz Mulla, Parag Adhyapak. 2015. Fabrication of WO_3/PANI nanocomposites for ammonia gas sensing application. In *2015 2nd International Symposium on Physics and Technology of Sensors (ISPTS)*, IEEE, pp. 196-199.
- [7] Mallesh Kurakula, G. S. N. Koteswara Rao. 2020. Moving polyvinyl pyrrolidone electrospun nanofibers and bioprinted scaffolds toward multidisciplinary biomedical applications. *European Polymer Journal*, 136: 109919
- [8] Durgadsimi, S., Kattimani, V., Maruti, N., Kulkarni, A., & Mathad, S. (2021). Синтез и структурный анализ феррита никеля, синтезированного методом со-осаждения. *Eurasian Physical Technical Journal*, 18(4(38)), 14–19.
- [9] Вызулин С.А., Каликинцева Д.А., Мирошниченко Е.Л., Бузько В.Ю., Горячко А.И.. Радиопоглощающие свойства никель-цинковых ферритов, синтезированных различными способами// *Известия РАН. Серия физическая*, 2018, том 82, No 8, с. 1045–1047
- [10] Bouwmeester, H.J.M. and Burggraaf, A.J. (1997) Dense Ceramic Membranes for Oxygen Separator. In: Gellings, P.J. and Bouwmeester, H.J.M., Eds., *The CRC Handbook of Solid State Electrochemistry*, CRC Press, New York, 481-553.
- [11] Mingchen Tang, Long Xu and Maohong Fan. Progress in oxygen carrier development of methane-based chemical-looping reforming: A review. *Applied Energy*, 2015, vol. 151, issue C, 143-156.
- [12] Zeng Q., Zuo Y., Fan C., Chen C. CO₂-tolerant oxygen separation membranes targeting CO₂ capture application // *J. Membr. Sci.* – 2009. – V. 335. – P. 140-144.
- [13] Gazdala M., Jasinski P., Kusz B., Bochentyn B., Gdula-Kasica K., Lendze T. Lewandowska-Iwaniak W., Mielewczyk-Gryn A., Molin S. Perovskites in Solid Oxide Fuel Cells// *Solid State Phenomena Vol. 183* (2012) pp 65-70

- [14] Online available since 2011/Dec/22 at www.scientific.net © (2012) Trans Tech Publications, Switzerland doi:10.4028/www.scientific.net/SSP.183.65
- [15] Felix N. Büchi, Mathias Reum Stefan A. Freunberger¹ and Antonio Delfino On the Efficiency of Automotive H₂/O₂ PE Fuel Cell Systems//3rd European PEFC Forum, Session B09, Thursday, 7 July, 09:00h, File No. B091
- [16] Qinghuan Pan, Liping Ma, Wang Du, Jie Yang, Ran Ao, Xia Yin, Sancheng Qi ng Hydrogen-enriched syngas production by lignite chemical looping gasification with composite oxygen carriers of phosphogypsum and steel slag//Energy. V.241, 2022
- [17] Ismael M. Solar energy materials and solar cells ferrites as solar photocatalytic materials and their activities in solar energy conversion and environmental protection: A review, Sol. Energy Mater. Sol. Cells 219 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2020.110786>.
- [18] Miftahu Gambo Idris, Hafeez Yusuf Hafeez, Mohammed, Abdussalam Balarabe Suleiman, Chifu Ebenezer Ndikilar. A review on recent development in the spinel ferrites-based materials for efficient solar fuel (hydrogen) generation via photocatalytic water-splitting//Applied Surface Science Advances 18 (2023) 100468 <https://doi.org/10.1016/j.apsadv.2023.100468>
- [19] Akbarov R.Y., Paizullakhanov M.S. Characteristic features of the energy modes of a Large Solar Furnace with a capacity of 1000 kW//Applied Solar Energy, 2018. V. 54.m P. 99-109
- [20] Paizullakhanov M.S., Suvonova L.S. & Cherenda N.N. Synthesis of silicon carbide from natural raw material in a solar furnace//High Temperature Material Processes 28(1):19–25 (2024)
- [21] Paizullakhanov, M.S., Shermatov, Zh.Z., Nodirmatov, E.Z., Rajamatov, O.T., Ernazarov, F.N., Sulaimanov, M.T.Nurmatov, Sh.,Cherenda, N.N. Synthesis of materials by the concentrated solar radiation.// High Temperature Material Processes 25(2):17–29 (2021)
- [22] Payzullakhanov M.S., Payziyev S.D., Suleymanov S.K. Modeling of processes of heating and cooling of materials in a solar furnace//Applied Solar Energy, 2019. V.55.iss..5. P.404-408.
- [23] Paizullakhanov, M.S., Karshieva, N.K., Ernazarov, F.N. et al. Studying the Possibility of Applying Barium-Strontium Cobaltite in Hydrogen Energy. Therm. Eng. 71, 280–284 (2024). <https://doi.org/10.1134/S0040601524030054>
- [24] Шкловский Б.И., Эфрос А.Л. Современное состояние теории прыжковой электропроводности. УФН, 1983, т.141, вып.4, с.711-744
- [25] Funke K. Jump relaxation model and coupling model-a comparison, J. Non-Cryst. Solids., 172 (1994) 1215-1221.
- [26] Torres D., De Llobet S., Pinilla J.L., Lázaro M.J., Suelves I., Moliner R. Hydrogen production by catalytic decomposition of methane using a Fe-based catalyst in a fluidized bed reactor. J. Nat. Gas. Chem. 2012; 21:367–73.
- [27]. Gudyma T.S, Lapekin N.I., Popov M.V., Bannov A.G. Application of ice to the synthesis of graphite oxide: a modified hummers method// Solid Fuel Chemistry, Volume 56, pp 347-352.
- [28] Shao Z., Yang W., Cong Y., Dong H., Tong J., Xiong G. Investigation of the permeation behavior and stability of a Ba_{0.5}Sr_{0.5}Co_{0.8}Fe_{0.2}O_{3-x} oxygen membrane // J. Membrane Sci. 2000. – V. 172. – P. 177-188.
- [29] Enrique Juste, Aurélie Julian, G. Etchegoyen, Pierre-Marie Geffroy, Thierry Chartier, et al. Oxygen permeation, thermal and chemical expansion of (La,Sr)(Fe,Ga)O_{3-δ} perovskite membranes. Journal of Membrane Science, 2008, 319, pp.185-191.
- [30] Zeng Q., Zuo Y., Fan C., Chen C. CO₂-tolerant oxygen separation membranes targeting CO₂ capture application //J. Membr. Sci. 2009. V. 335. P. 140-144.

References

- [1] Subramanian Yuvaraj, Ramakrishnan Kalai Selvan and Yun Sung Lee. An Overview of AB₂O₄- and A₂BO₄-Structured Negative Electrodes for Advanced Li-Ion Batteries// See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/291186670>



[2] Alan Fernando Ney Boss, Antonio Carlos da Cunha Migliano Ingrid Wilke. Terahertz frequency electrical properties of nickel cobalt ferrites//Conference: 2016 41st International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz waves (IRMMW-THz DOI: [10.1109/IRMMW-THz.2016.7758775](https://doi.org/10.1109/IRMMW-THz.2016.7758775))

[3] Atiq S., Majeed M., Ahmad A., Abbas S.K., Saleem M., Riaz S., Naseem S. Synthesis and investigation of structural, morphological, magnetic, dielectric and impedance spectroscopic characteristics of Ni-Zn ferrite nanoparticles. *Ceram. Int.* 2017. V.43. p.2486–2494

[4] Balgude, S.D., Barkade, S.S. and Mardikar, S.P., 2020. Metal Oxides for High-Performance Hydrogen Generation by Water Splitting. In *Multifunctional Nanostructured Metal Oxides for Energy Harvesting and Storage Devices*, CRC Press, PP. 169-194.

[5] Pablo Korth Pereira Ferraz, Robert Schmidt, Delf Kober, Julia Kowal. 2018. A high frequency model for predicting the behavior of lithium-ion batteries connected to fast switching power electronics. *Journal of Energy Storage*, 18: 40-49.

[6] Satish Meshram, Sagar Balgude, Imtiaz Mulla, Parag Adhyapak. 2015. Fabrication of WO₃/PANI nanocomposites for ammonia gas sensing application. In 2015 2nd International Symposium on Physics and Technology of Sensors (ISPTS), IEEE, pp. 196-199.

[7] Mallesh Kurakula, G. S. N. Koteswara Rao. 2020. Moving polyvinyl pyrrolidone electrospun nanofibers and bioprinted scaffolds toward multidisciplinary biomedical applications. *European Polymer Journal*, 136: 109919

[8] Durgadsimi, S., Kattimani, V., Maruti, N., Kulkarni, A., & Mathad, S. (2021). Синтез и структурный анализ феррита никеля, синтезированного методом со-осаждения. *Eurasian Physical Technical Journal*, 18(4(38)), 14–19.

[9] Вызулин С.А., Каликинсева Д.А., Миросниченко Ye.L., Бузко V.Yu., Горьячко А.И. Радиопоглощающие свойства никель-цинковых ферритов, синтезированных различными способами//*Izvestiya RAN. Seriya fizicheskaya*, 2018, том 82, No 8, s. 1045–1047. (In Rus.)

[10] Bouwmeester, H.J.M. and Burggraaf, A.J. (1997) Dense Ceramic Membranes for Oxygen Separator. In: Gellings, P.J. and Bouwmeester, H.J.M., Eds., *The CRC Handbook of Solid State Electrochemistry*, CRC Press, New York, 481-553.

[11] Mingchen Tang, Long Xu and Maohong Fan. Progress in oxygen carrier development of methane-based chemical-looping reforming: A review. *Applied Energy*, 2015, vol. 151, issue C, 143-156.

[12] Zeng Q., Zuo Y., Fan C., Chen C. CO₂-tolerant oxygen separation membranes targeting CO₂ capture application // *J. Membr. Sci.* – 2009. – V. 335. – P. 140-144.

[13] Gazdala M., Jasinski P., Kusz B., Bochentyn B., Gdula-Kasica K., Lendze T. Lewandowska-Iwaniak W., Mielewczyk-Gryn A., Molin S. Perovskites in Solid Oxide Fuel Cells// *Solid State Phenomena Vol. 183* (2012) pp 65-70

[14] Online available since 2011/Dec/22 at www.scientific.net © (2012) Trans Tech Publications, Switzerland doi:10.4028/www.scientific.net/SSP.183.65

[15] Felix N. Büchi, Mathias Reum Stefan A. Freunberger and Antonio Delfino On the Efficiency of Automotive H₂/O₂ PE Fuel Cell Systems//3rd European PEFC Forum, Session B09, Thursday, 7 July, 09:00h, File No. B091

[16] Qinghuan Pan, Liping Ma, Wang Du, Jie Yang, Ran Ao, Xia Yin, Sancheng Qi ng Hydrogen-enriched syngas production by lignite chemical looping gasification with composite oxygen carriers of phosphogypsum and steel slag//*Energy*. V.241, 2022

[17] Ismael M. Solar energy materials and solar cells ferrites as solar photocatalytic materials and their activities in solar energy conversion and environmental protection: A review, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 219 (2021). [https:// doi.org/10.1016/j.solmat.2020.110786](https://doi.org/10.1016/j.solmat.2020.110786).

[18] Miftahu Gambo Idris, Hafeez Yusuf Hafeez, Mohammed, Abdussalam Balarabe Suleiman, Chifu Ebenezer Ndikilar. A review on recent development in the spinel ferrites-based materials for efficient solar fuel (hydrogen) generation via photocatalytic water-splitting//*Applied Surface Science Advances* 18 (2023) 100468 <https://doi.org/10.1016/j.apsadv.2023.100468>



- [19] Akbarov R.Y., Paizullakhanov M.S. Characteristic features of the energy modes of a Large Solar Furnace with a capacity of 1000 kW//Applied Solar Energy, 2018. V. 54.m P. 99-109
- [20] Paizullakhanov M.S., Suvonova L.S. & Cherenda N.N. Synthesis of silicon carbide from natural raw material in a solar furnace//High Temperature Material Processes 28(1):19–25 (2024)
- [21] Paizullakhanov, M.S., Shermatov, Zh.Z., Nodirmatov, E.Z., Rajamatov, O.T., Ernazarov, F.N., Sulaimanov, Nurmatov M.T., Cherenda Sh., N.N. Synthesis of materials by the concentrated solar radiation.// High Temperature Material Processes 25(2):17–29 (2021)
- [22] Payzullakhanov M.S., Payziyev S.D., Suleymanov S.K. Modeling of processes of heating and cooling of materials in a solar furnace//Applied Solar Energy, 2019. V.55.iss..5. P.404-408.
- [23] Paizullakhanov, M.S., Karshieva, N.K., Ernazarov, F.N. et al. Studying the Possibility of Applying Barium-Strontium Cobaltite in Hydrogen Energy. Therm. Eng. 71, 280–284 (2024). <https://doi.org/10.1134/S0040601524030054>
- [24] Shklovskiy B.I., Efros A.L. Sovremennoye sostoyaniye teorii pryjkovoy elektroprovodnosti. UFN, 1983, t.141, вып.4, s.711-744. (In Rus.)
- [25] Funke K. Jump relaxation model and coupling model-a comparison, J. Non-Cryst. Solids., 172 (1994) 1215-1221.
- [26] Torres D., De Llobet S., Pinilla J.L., Lázaro M.J., Suelves I., Moliner R. Hydrogen production by catalytic decomposition of methane using a Fe-based catalyst in a fluidized bed reactor. J. Nat. Gas. Chem. 2012; 21:367–73.
- [27]. Gudyma T.S, Lapekin N.I., Popov M.V., Bannov A.G. Application of ice to the synthesis of graphite oxide: a modified hummers method// Solid Fuel Chemistry, Volume 56, pp 347-352.
- [28] Shao Z., Yang W., Cong Y., Dong H., Tong J., Xiong G. Investigation of the permeation behavior and stability of a Ba_{0.5}Sr_{0.5}Co_{0.8}Fe_{0.2}O_{3-x} oxygen membrane // J. Membrane Sci. 2000. – V. 172. – P. 177-188.
- [29] Enrique Juste, Aurélie Julian, G. Etchegoyen, Pierre-Marie Geffroy, Thierry Chartier, et al. Oxygen permeation, thermal and chemical expansion of (La, Sr) (Fe, Ga) O_{3-δ} perovskite membranes. Journal of Membrane Science, 2008, 319, pp.185-191.
- [30] Zeng Q., Zuo Y., Fan C., Chen C. CO₂-tolerant oxygen separation membranes targeting CO₂ capture application //J. Membr. Sci. 2009. V. 335. P. 140-144.

For citation: Paizullakhanov M.S., Parpiev O.R., Shermatov Zh.Z. Features of nikel ferrite, synthesis in a solar furnace. Alternative Energy. 2024. 1 (12). Pp. 26 – 36. (In Rus.)

Correspondence: Payzullakhanov Muxammad-Sultyanxan – Doctor of sciences (DSc),
E-mail: fayz@bk.ru

