АННОТАЦИЯ

диссертации на соискание степени доктора философии (PhD)
по специальности «8D07112 – Наноматериалы и нанотехнологии»

СУЛТАНГАЗИНА МАРЖАН НУРЛАНҚЫЗЫ

ОСОБЕННОСТИ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО СИНТЕЗА В ЖИДКОЙ ФАЗЕ ФЕРРОМАГНИТНЫХ НАНОЧАСТИЦ, ИММОБИЛИЗОВАННЫХ В УГЛЕРОДНУЮ МАТРИЦУ

Общая характеристика работы. Диссертационная работа посвящена экспериментальным исследованиям по получению ферромагнитных наночастиц, иммобилизованных в углеродную матрицу плазмохимическим методом в жидкой среде.

Актуальность исследования. Развитие нанотехнологий оказало существенное влияние на совершенствование методов синтеза функциональных наночастиц, среди которых особое внимание уделяется ферромагнитным наночастицам. Обладая уникальными магнитными, физико-химическими и структурными свойствами данные частицы нашли широкое применение в биомедицине, фотокатализе, системах хранения данных, энергетике и современных электронных устройства.

Наночастицы на основе ферромагнитных переходных металлов, таких как железо, никель и кобальт (Fe, Ni, Co), характеризуются повышенными магнитными свойствами по сравнению с их объемными аналогами или оксидными формами. Однако их синтез сопряжен с рядом технологических сложностей, включая склонность наночастиц к поверхностному окислению, коррозии и агломерации. Для сохранения металлического состояния и предотвращения агломерации применяются методы иммобилизации наночастиц в защитные покрытия.

Одним из наиболее перспективных путей решения является иммобилизация наночастиц в защитные покрытия, среди которых углеродные структуры характеризуются высокой термической и химической устойчивостью, механической прочностью и способностью формировать упорядоченные оболочки. Существующие подходы к иммобилизации включают нанесение покрытий на заранее синтезированные частицы (например, методом CVD), а также формирование оболочки непосредственно в процессе синтеза, как в случае лазерной абляции. Однако оба подхода ограничены сложностью масштабирования и значительной технологической сложностью процесса.

Особенностью плазмохимического метода в жидкой среде является возможность одностадийного, быстрого и экологически чистого синтеза металлических наночастиц, иммобилизованных в углеродную матрицу. Источником компонентов для формирования наноструктур служат как сами электроды, так и жидкая среда, что открывает возможность иммобилизации наночастиц с применением металлических электродов переходных металлов

(Fe, Ni, Co), графитовых электродов в сочетании с углеродсодержащими жидкостями.

Плазмохимический синтез в жидкой фазе представляет собой инновационный подход к получению функциональных наноматериалов. Генерация плазмы с использованием дугового электрического разряда обеспечивает высокую энергоэффективность процесса и способствует протеканию реакций в экстремальных условиях, благоприятных для формирования устойчивых углеродных оболочек. Метод отличается высокой селективностью, высокой степенью иммобилизации и позволяет направленно формировать наноструктуры заданного состава.

Особое значение имеет возможность синтеза углеродных оболочек, содержащих сложные магнитные фазы, такие как Fe–Co и Co–Ni, что расширяет функциональные свойства получаемых наночастиц и делает данный метод особенно перспективным для задач, связанных с магнитными, каталитическими и биомедицинскими приложениями.

Комплекс преимуществ, присущих плазмохимическому синтезу в жидкой среде, определяет его научную и практическую значимость. Проведение экспериментальных исследований по иммобилизации наночастиц данным методом не только способствует развитию направлений синтеза многофункциональных материалов, но и позволяет углубить понимание фундаментальных аспектов взаимодействия плазмы с жидкой фазой, что, в свою очередь, открывает перспективы для новых технологических решений, таких как очистка сточных вод и получение чистого водорода.

Целью диссертационной работы является экспериментальное исследование синтеза ферромагнитных наночастиц никеля и железа, иммобилизованных в углеродную матрицу методом плазмохимического синтеза в жидких диэлектрических средах и исследование их морфологических, структурных и магнитных свойств.

Объектом исследования являются ферромагнитные наночастицы, иммобилизованные в углеродную матрицу и метод плазмохимического синтеза в жидкой среде.

Предметом исследования Синтез ферромагнитных наночастиц, иммобилизованных в углеродную матрицу методом плазмохимического синтеза в жидкой среде, в частности в среде дистиллированной воды и углеродсодержащих жидкостях (спирт, толуол).

Для реализации указанной цели были поставлены следующие **задачи:**

1. Определение оптимальных условий синтеза ферромагнитных наночастиц, иммобилизованных углеродной оболочкой методом электродугового разряда в жидкой среде.
2. Исследование морфологии и структуры углеродной оболочки синтезируемых наночастиц в дистиллированной воде, спирте и толуоле.
3. Изучение магнитных свойств чистых и иммобилизованных в углеродную оболочку ферромагнитных наночастиц.

Методы исследования.

Для достижения цели работы и выполнения поставленных задач применены следующие методы исследования синтезируемых иммобилизованных наночастиц: методы исследования размеров и структуры с использованием аналитического оборудования, такого как сканирующий электронный микроскоп (Quanta 3D200i SEM FEI, оптический микроскоп DM 6000M (Leica), просвечивающий электронный микроскоп (TEM, JEOL JEM - 1400 Plus), методы структурной характеризации комбинационного рассеяния света (Solver Spectrum, NT-MDT, длиной волны лазера 473 нм)

Научная новизна работы

1. Впервые установлены закономерности формирования иммобилизованных нанокомпозитов металл–оксид–углерод, полученных дуговым плазмохимическим синтезом в деионизированной воде. Показано, что никель и железо образуют устойчивые сферические частицы с различной степенью сохранения металлической фазы и выходом продукта, при этом рост графитизации углеродной матрицы напрямую связан с условиями разряда и природой металла;

2. Выявлены особенности структуры частиц никеля и железа при синтезе в углеродосодержащей среде (спирт, толуол). Впервые показано, что синтез в жидкой среде толуол способствует формированию устойчивых Ni-C и Fe-C нанокомпозитов;

3. Установлены различия в магнитных характеристиках нанокомпозитов Ni–C и Fe–C при нагреве, а также впервые получено и сопоставлено экспериментальное значение температуры Кюри для иммобилизованных ферромагнитных частиц в углеродную матрицу с теоретическими моделями, основанными на энергии когезии.

Положения, выносимые на защиту

Положения, выносимые на защиту

1. Формирование иммобилизированных нанокомпозитов металл–оксид–углерод на основе никеля и железа, полученных плазмохимическим дуговым методом в деионизированной воде, сопровождается образованием частиц сферической морфологии с размерами 250–300 нм (Ni) и 29–115 нм (Fe), при этом никель сохраняет доминирование металлической FCC-фазы с долей чистого Ni 56,8 ат.%, тогда как железосодержащие структуры демонстрируют существенно более высокий массовый выход 0,08 г/мин по сравнению с 0,027 г/мин для никеля, одновременно уменьшение I_D/I_G до 0,33–0,45 для Ni и 0,34–0,47 для Fe свидетельствует о росте степени графитизации и формировании более упорядоченной углеродной матрицы в синтезированных композитах

2. Плазмохимический синтез в спиртовой и толуольной углеродосодержащей жидкой среде приводит к формированию иммобилизованных наночастиц никеля и железа с характерной структурой, при которой в спирте никель образует частицы порядка 0,28 мкм, демонстрирующие после отжига сочетание FCC и HCP фаз, а железо формирует более мелкие сферические наночастицы около 0,06 мкм, содержащие оксидные формы Fe_3O_3, тогда как в толуоле никель синтезируется в виде частиц около 0,11 мкм с временным формированием карбида Ni_3C и

высокой степенью графитизации углеродной матрицы, а железо дает частично инкапсулированные углеродом ядра размером 10–20 нм с преобладанием низкоокисленных фаз FeO и металлического α Fe.

3. Наночастицы Ni–C при нагреве до 196 °C сохраняют практически неизменную удельную намагниченность насыщения, тогда как для композитов Fe–C повышение температуры приводит к выраженному снижению данного параметра. При этом зарегистрированные значения температуры Кюри — 353 °C для частиц Ni размером 112 нм и 771 °C для частиц Fe размером 67 нм — согласуются с теоретическими расчётами.

Теоретическая и практическая значимость исследования

Результаты, полученные в рамках настоящей диссертационной работы, обладают как фундаментальной, так и прикладной ценностью и представляют интерес для международного научного сообщества в областях физики плазмы, материаловедения, нанотехнологий, химии и электроники. Разработка и экспериментальное обоснование одностадийного, технологически упрощённого и экономически эффективного метода синтеза ферромагнитных наночастиц, иммобилизованных в углеродную матрицу, позволяет значительно удешевить получение функциональных наноматериалов с заданной морфологией и свойствами.

Практическая значимость работы обусловлена возможностью применения полученных наночастиц на основе переходных металлов (Fe, Ni, Co) в ряде высокотехнологичных направлений. Среди них — каталитические процессы, в которых данные наночастицы могут рассматриваться как альтернатива дорогостоящим катализаторам на основе благородных металлов, а также биомедицинские технологии: неинвазивная биовизуализация, фотодинамическая терапия и таргетированная доставка лекарственных средств и генетического материала.

Теоретическая значимость исследования заключается в исследовании механизмов роста и формирования ферромагнитных наночастиц в условиях плазмохимического синтеза в жидкой среде, а также в выявлении влияния параметров электрической дуги и свойств плазмы на морфологию и физико-химические характеристики синтезируемых наноматериалов. Анализ этих процессов способствует глубокому пониманию взаимодействия плазмы с жидкой средой и расширяет представления о закономерностях формирования углеродных наноструктур, иммобилизирующих частицы.

Необходимость проведения подобных исследований на национальном уровне продиктована широким спектром потенциальных применений полученных результатов, в том числе в приоритетных для Казахстана отраслях — энергетике, электронике, нанотехнологиях и плазменных технологиях. Особое значение представляют углеродные наноматериалы, получаемые в результате предложенного подхода, которые могут быть использованы в качестве модельных систем для изучения наномасштабных магнитных явлений, процессов взаимодействия между наночастицами и углеродной матрицей, а также влияния иммобилизации на магнитные и электронные свойства.

Достоверность и обоснованость полученых результатов подтвержаются экспериментальными данными, полученными в процессе выполнения диссертации. Кроме того достоверность подтвержается наличием публикаций в журналах дальнего зарубежья с высоким импакт фактором и в трудах международных научных конференций ближнего и дальнего зарубежья.

Личный вклад автора

Синтез и исследование свойств полученных наночастиц были проведены автором самостоятельно. Формулировка задач и обсуждение полученных экспериментальных результатов проводились совместно с научными консультантами.

Публикации

По материалам диссертационной работы опубликовано 5 публикаций в журналах входящих в базу данных Scopus и Web of Knowledge и 7 тезисов, опубликованных на национальных и международных научных конференциях.

Апробация диссертационной работы

Результаты, полученные при выполнении диссертационной работы, докладывались и обсуждались на следующих международных конференциях: «XVI международная конференция «Водородное материаловедение и химия углеродных наноматериалов» ICHMS'2019 (Киев,2019)», «18th series of Advanced Energy Materials conference (6-8 April,2022, Imperial College London)», «X ежегодная конференция нанотехнологического общества России (2019)», «XI ежегодной конференции нанотехнологического общества России (2020)», IV Міжнародна конференція «Функціональні матеріали для інноваційної енергетики — ФМІЕ-2023», (Киев,Украина), Международная научная конференция студентов и молодых ученых «ФАРАБИ ӘЛЕМІ» Алматы, Казахстан, 6-8 апреля 2022 года, Международная научная конференция студентов и молодых ученых «ФАРАБИ ӘЛЕМІ» Алматы, Казахстан, 6-9 апреля 2019 года,Международные Сатпаевские чтения «Инновационные технологии -ключ к успешному решению фундаментальных и прикладных задач в рудном и нефтегазовом секторах экономики РК», Алматы, Казахстан, апрель 2019 года, Международная научная конференция студентов и молодых ученых «ФАРАБИ ӘЛЕМІ» Алматы, Казахстан, 6-9 апреля 2024 года.

Связь темы диссертации с планами научных работ

Диссертационная работа выполнена в соответствии с планами научно-исследовательского проекта № AP09260730 «Генерация водорода на основе композиционных наночастиц, полученных плазмохимическим методом»

Объем и структура диссертации

Диссертационная работа содержит перечень условных обозначений и сокращений, введение, основную часть из 3-х разделов, заключение и список литературы. Работа представлена на 106 страницах, содержит 51 рисунков, 8 таблиц и 180 библиографических ссылок.