

Можжухин Сергей Александрович

**Водород-аккумулирующие композиты магния с
Ni-графеноподобными материалами**

1.4.4. Физическая химия (химические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата химических наук

Черноголовка 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии Российской академии наук» (ФИЦ ПХФ и МХ РАН).

Научный руководитель: доктор химических наук
Тарасов Борис Петрович

Официальные оппоненты: Богдан Виктор Игнатьевич
доктор химических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт органической химии им. Н.Д. Зелинского Российской академии наук, ведущий научный сотрудник

Дуников Дмитрий Олегович
кандидат физико-математических наук,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, заведующий лабораторией

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

Защита состоится 16 декабря 2026 г. в 10:30 на заседании диссертационного совета 24.1.108.01 при ФИЦ ПХФ и МХ РАН по адресу: 142432, г. Черноголовка Московской обл., пр-т акад. Семенова, д. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФИЦ ПХФ и МХ РАН и на сайте: <https://icp-ras.ru/>

Автореферат разослан « ____ » _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета, д.х.н.



Джардималиева Г. И.

Актуальность работы

Увеличение концентрации углекислого газа, приводящее к потеплению климата, обуславливает необходимость уменьшения сжигания углеводородов и перехода к экологически чистой и ресурсосберегающей энергетике. В связи с этим все бóльшую актуальность приобретает водородная энергетика, где в качестве энергоносителя выступает водород. Одной из важнейших задач, от решения которой зависит масштабное развитие водородных технологий, является организация эффективного и безопасного способа хранения водорода. В этом отношении особое внимание уделяется металлгидриднему способу хранения водорода. Для этого метода характерна не только высокая безопасность эксплуатации, но и значительно большее количество запасенного водорода на единицу объема системы хранения.

Одним из наиболее перспективных материалов-сорбентов водорода является магний благодаря его низкой стоимости, высоким массовому (7.6 мас.%) и объемному ($0.11 \text{ г H}_2 \text{ на } 1 \text{ см}^3$) содержаниям водорода в гидриде. Однако низкая скорость гидрирования магния и высокая температура дегидрирования MgH_2 (более 300°C) препятствуют его эксплуатации как водород-аккумулирующего материала.

Для активации реакции образования MgH_2 часто применяется метод механического воздействия на порошок магния в мельницах различной конструкции. Благодаря такой обработке получают частицы микронного размера с высокодефектной структурой, гораздо легче вступающие в реакцию гидридообразования. При механообработке магния в водороде удастся осуществить реакцию гидрирования при комнатной температуре (механосинтез). В отличие от пластичного магния, получаемый в процессе механосинтеза хрупкий MgH_2 измельчается до субмикронного размера частиц, что увеличивает скорость гетерогенной реакции обратимого гидрирования. Кроме того, механообработка – быстрый и качественный способ получения композитных материалов.

Механообработка магния в водороде с различными добавками (d-металлы, оксиды, соли, аллотропные формы углерода) ведет к значительному росту его реакционной способности. Наибольший эффект достигается при введении углеродных добавок (графит, углеродные нанотрубки и нановолокна, графеноподобные материалы, металлоорганические каркасные структуры и т.д.) с наночастицами металлов (М/С). Помимо каталитического эффекта металл-углеродные добавки предотвращают спекание наночастиц Mg при температуре дегидрирования MgH_2 .

Среди углеродных добавок особого внимания заслуживает графеноподобный материал (ГПМ), представляющий собой стопки из

нескольких искаженных графеновых листов. Протяженная структура ГПМ способствует равномерному распределению по ее поверхности мелких частиц, образующихся при помоле, тем самым предотвращая их агломерацию. Важным преимуществом ГПМ является наличие функциональных групп на его прекурсор – оксиде графита (ОГ). Это позволяет проводить адсорбцию солей металлов на его поверхности с последующим их восстановлением до активных наноразмерных частиц.

Анализ имеющихся данных по модификации MgH_2 как водород-аккумулирующего материала позволяет рассматривать в качестве катализатора гидрирования магния систему, состоящую из наноразмерных частиц Ni, равномерно распределенных по поверхности ГПМ. Такой подход является наиболее перспективным для решения актуальной проблемы улучшения кинетики реакций образования и разложения MgH_2 .

Цели и задачи диссертационной работы

Целью работы являлась разработка водород-аккумулирующих композитов магния с никель-графеновыми материалами с высоким содержанием обратимо хранимого водорода.

Для достижения цели поставлены **следующие задачи:**

1. Синтез и формирование композита никеля с ГПМ с регулируемой дисперсностью и с различным содержанием кластеров Ni, установление оптимальных методик.

2. Формирование композитов MgH_2 +ГПМ и MgH_2 +Ni/ГПМ, установление оптимальных методик, определение водород-аккумулирующих характеристик.

3. Определение кинетических характеристик абсорбции и десорбции водорода полученными композитами, разработка композитов с высокими скоростями обратимого гидрирования.

4. Определение стабильности водород-аккумулирующих характеристик композитов MgH_2 +Ni/ГПМ при многократном повторении циклов гидрирования/дегидрирования, установление наиболее перспективных составов композитов для обратимого хранения водорода.

5. Определение водород-генерирующих свойств композитов при их взаимодействии с водой и растворами кислот для получения компримированного водорода.

Научная новизна полученных результатов:

1. Предложен оригинальный способ получения композитов Ni/ГПМ одновременным восстановлением Ni^{2+} и оксида графита; в композитах частицы Ni около 5 нм равномерно распределены на поверхности ГПМ.

2. Получены новые водород-аккумулирующие композиты MgH_2 +Ni/ГПМ механохимической обработкой Mg и Ni/ГПМ в водородной среде; композиты Mg с Ni/ГПМ в 3–4 раза быстрее

гидрируются с образованием $\text{MgH}_2 + \text{Ni/ГПМ}$, водород-аккумулирующие характеристики не ухудшаются при многократном повторении циклов сорбции/десорбции.

3. Установлено и объяснено синергетическое влияние Ni/ГПМ на процесс гидрирования магния в композите: частицы Ni катализируют процесс диссоциации молекул H_2 , ГПМ предотвращает спекание мелкодисперсных частиц и повышает теплообмен между частицами.

4. Разработаны и запатентованы составы $\text{Mg/MgH}_2 + \text{Ni/ГПМ}$, способные обратимо хранить более 6.5 мас.% водорода; установлены оптимальные условия гидрирования (давление 1–10 атм, температура 250–300°C) и дегидрирования (давление 1 атм, температура 300–350°C).

5. Показана перспективность композитов как высокоэффективных водород-генерирующих материалов для получения компримированного водорода.

Основные научные результаты, выносимые на защиту:

1. Оригинальный метод получения наноразмерных частиц никеля на поверхности ГПМ путем одновременного восстановления оксида графита и нанесенной на него соли никеля в токе водорода.

2. Установленный синергетический эффект добавок металл-графенового композита на процесс обратимого гидрирования магния: катализ диссоциации H_2 , предотвращение спекания частиц, увеличение теплообменных процессов.

3. Запатентованные метод и установка получения водород-аккумулирующего композита магния с Ni/ГПМ путем механохимической обработки в водородной среде.

4. Выявленные стабильность водород-аккумулирующих характеристик композитов $\text{Mg} + \text{Ni/ГПМ}$ при многократном проведении циклов гидрирования/дегидрирования и улучшение кинетики обратимого гидрирования с увеличением числа таких циклов.

5. Запатентованный состав водород-генерирующих композитов MgH_2 с Ni/ГПМ и установка получения компримированного водорода до давления 100 атм.

Теоретическая и практическая значимость. Предложена модель каталитического действия Ni/ГПМ на процесс гидрирования магния. Показана эффективность ГПМ как носителя наноразмерных металлических катализаторов гидрирования магния. Разработан и обоснован метод формирования водород-аккумулирующих композитов магния с добавкой Ni/ГПМ . Доказано, что такие композитные материалы могут применяться для создания аккумуляторов водорода многократного действия либо использоваться в качестве водород-генерирующих материалов при их взаимодействии с растворами кислот.

Методология и методы исследования. Работа относится к области хранения водорода в виде гидрида магния. Синтез MgH_2 осуществлялся

методом механохимической обработки порошка магния либо его смеси с углеродсодержащей добавкой в планетарно-шаровой мельнице под давлением водорода. Ключевой особенностью предложенного подхода являлись одновременный помол и гидрирование промышленного порошка магния, а также использование катализаторов – наноразмерных частиц металлов, нанесенных на углеродные наноструктуры. Эффективность применяемой методики оценивалась по кинетическим данным, получаемым при измерении падения давления водорода в размольном термостатированном стакане в ходе механосинтеза гидрида магния. В качестве объекта сравнения использовался магний без добавок. Этот же подход был использован при проведении нескольких циклов гидрирования/дегидрирования в стационарных условиях в автоклаве при повышенных температурах (300–350°C).

В работе применялись следующие методы исследования: сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) (Zeiss LEO SUPRA 25 с и EDX приставкой) и просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ) (JEM 2100), инфракрасная спектроскопия (ИКС) (Perkin-Elmer Spectrum 100 FTIR с Фурье преобразованием); спектроскопия комбинационного рассеяния (КР) (Horiba Jobin Yvon T64000 с аргоновым лазером 514.5 нм); дифференциальная сканирующая калориметрия и термогравиметрический анализ (ДСК/ТГА) (STA 449 F3 Jupiter, NETZSCH); элементный анализ CHNS/O (Vario Micro cube); рентгенофазовый анализ (РФА) (ДРОН-УМ2 и ARLX'TRA; излучение CuK_α); анализ удельной площади поверхности по методу БЭТ (QUADRASORB SI). Для проведения механосинтеза композитов использовалась планетарно-шаровая мельница Pulverisette 6 (материал размольного стакана и шаров – сталь). Стабильность характеристик композитов в нескольких циклах дегидрирования/гидрирования проверялась в волюмометрической установке. Все операции по разгрузке размольного стакана и автоклава проводились в аргоновом боксе (MBraun) с содержанием O_2 и паров воды не более 10 ppm.

Паспорт научной специальности. Область исследования соответствует Специальности 1.4.4. Физическая химия (химические науки): п.12. Физико-химические основы процессов химической технологии и синтеза новых материалов; п.9. Связь реакционной способности реагентов с их строением и условиями протекания химической реакции; п.8. Динамика элементарного акта химических реакций. Механизмы реакции с участием активных частиц.

Степень достоверности результатов. Достоверность полученных в диссертационной работе результатов обеспечивается использованием современных физико-химических методов анализа, современного сертифицированного оборудования, согласованностью полученных результатов с данными, известными из научно-технической литературы.

Результаты работы подвергались многократной независимой положительной экспертизе и опубликованы в ведущих рецензируемых изданиях, индексируемых в Scopus, Web of Science, RSCI.

Апробации результатов. Основные результаты диссертации неоднократно обсуждались на российских и международных конференциях: 10 Международная конференция «Физико-химические проблемы возобновляемой энергетики» (Черноголовка, 2014); V Международная конференция с элементами научной школы для молодежи «Функциональные наноматериалы и высокочистые вещества» (Суздаль, 2014); I, II и III российские конференции «Графен: молекула и 2D-кристалл» (Новосибирск, 2015, 2017 и 2019); X Всероссийская школа-конференция молодых ученых «Теоретическая и экспериментальная химия жидкофазных систем» (Иваново, 2015); V и VI конференции с элементами научной школы для молодежи «Органические и гибридные наноматериалы» (Иваново, 2015 и 2017); Научные конференции фестиваля студентов, аспирантов и молодых ученых (Иваново, 2015 и 2016); IX Международная научная конференция «Фуллерены и наноструктуры в конденсированных средах» (Минск, 2016); XXVIII Симпозиум «Современная химическая физика» (Туапсе, 2016); II Всероссийская научная конференция (с международным участием) «Актуальные проблемы адсорбции и катализа» (Плещ, 2017); Тринадцатая, шестнадцатая и семнадцатая российские конференции «Физико-химические проблемы возобновляемой энергетики» (Санкт-Петербург, 2017, 2021 и 2022); III Всероссийская научная конференция (с международным участием) «Актуальные проблемы теории и практики гетерогенных катализаторов и адсорбентов» (Кострома, 2018); II Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Водород. Технологии. Будущее» (Томск, 2021); Научная конференция с международным участием и III Всероссийская школа-семинар молодых ученых «Водородные энерготехнологии с использованием металлгидридов» (Черноголовка, 2024); IV Всероссийская школа-семинар молодых ученых «Водородные и металлгидридные энерготехнологии» (Иваново, 2025).

Работа выполнена в рамках Государственного задания (№ 124013000692-4, № АААА-А19-119061890019-5), а также Мегагранта (Соглашение № 075-15-2022-1126) и госконтрактов (№ 14.740.11.1103, № 075-15-2024-654).

Публикации. По результатам работы опубликовано 11 статей в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК РФ, 4 патента на изобретения, а также 1 глава в коллективной монографии, 2 статьи в сборнике, 20 тезисов докладов на международных и российских научных конференциях.

Личный вклад автора. Автором были проанализированы и систематизированы литературные данные по тематике работы. Им лично экспериментально получены результаты по механосинтезу гидрида магния, по формированию и исследованию водород-аккумулирующих характеристик композитов магния с Ni/ГПМ, по анализу кинетических и термодинамических данных процессов обратимого гидрирования, по определению химического и фазового состава продуктов гидрирования, по определению стабильности характеристик при многократном повторении циклов гидрирования/дегидрирования, по созданию композитных материалов для хранения водорода. Автором лично разработано устройство размольного стакана для проведения механосинтеза и сконструирована волюмометрическая установка для проведения обратимой реакции гидрирования. Анализ и обработка экспериментальных данных, а также установление механизма синергетического эффекта добавок Ni/ГПМ на процесс гидрирования магния проведены совместно с д.х.н. Тарасовым Б.П. и к.х.н. Лотоцким М.В. Совместно с к.х.н. Арбузовым А.А. проведен синтез ГПМ и композитов Ni/ГПМ с различным содержанием никеля. В Аналитическом центре коллективного пользования ФИЦ получены термограммы ДСК (Блиновой Л.Н.), дифрактограммы (к.х.н. Колесниковой А.М. и к.ф.-м.н. Шиловым Г.В.), микрофотографии СЭМ (к.ф.-м.н. Дремовой Н.Н.), элементный состав (Коршуновой Л.А. и Гусевой Г.В.).

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, литературного обзора, экспериментальной части, обсуждения результатов, выводов и списка литературы. Диссертация содержит 109 страниц, 8 таблиц, 33 рисунка, 172 наименования литературных источников.

Содержание работы

Во введении показана актуальность выполняемой работы, сформулирована цель, поставлены задачи научного исследования, раскрыты степень новизны, основные положения и практическая значимость полученных результатов.

В первой главе приводится анализ литературы по способам синтеза MgH_2 и по исследованиям механизма реакций гидрирования Mg и дегидрирования MgH_2 . Особое внимание уделено анализу работ по катализаторам гидрирования магния и по влиянию углеродных добавок на процесс гидрирования. Рассмотрен механохимический метод формирования композитных материалов и установлена его перспективность для формирования водород-аккумулирующих композитов магния для металлгидридного хранения водорода. Проанализированы стадии процесса гидрирования магния, выявлены проблемы и предложены методы их решения (табл. 1).

Во второй главе описаны методики формирования и исследования композитов магния с Ni/ГПМ. Отмечены особенности механосинтеза гидрида магния в планетарно-шаровой мельнице Pulverizette 6 и построения кинетических кривых в волюмометрической установке Сивертса. Описано определение содержания C, N, H, O на элементном анализаторе Vario EL cube (Elementar GmbH) и на установке Прегля по сжиганию навески в токе кислорода, определение удельной площади поверхности на сорбционном анализаторе (Quadrasorb SI, Quantachrome), разложение MgH_2 на синхронном термическом анализаторе (STA 449 F3 Jupiter, NETZSCH), определение фазового состава методом порошковой рентгеновской дифракции (дифрактометры ДРОН-УМ2 и ARLX'TRA с использованием CuK_{α} -излучения). Подробно описана оригинальная методика получения никельсодержащего катализатора (Ni/ГПМ) методом лиофильной сушки замороженной суспензии ОГ и ацетата Ni с последующим восстановлением в токе Ar/H_2 . Проанализированы и обсуждены микрофотографии порошков, полученных методом сканирующей (Zeiss LEO SUPRA) и просвечивающей электронной микроскопии (JEM 2100)

Таблица 1 – Схема стадий гидрирования магния, проблемы и методы их решения

Стадия процесса $Mg + H_2 \leftrightarrow MgH_2$	Проблема	Решение
Диссоциация водорода	Высокая энергия активации диссоциации H_2	Использование катализаторов (Ni, Fe, Pd, Pt ...)
Химическая реакция на поверхности Mg. Образование и рост зародышей MgH_2	Невысокая скорость реакции. Медленный теплообмен ($\lambda \approx 1$ Вт/м·К)	Равномерное распределение наноразмерного катализатора по поверхности Mg. Увеличение теплообмена (использование ГПМ)
Диффузия атомов H через слой MgH_2	Диффузия атомов – <u>лимитирующая стадия</u> ($D \approx 10^{-18}$ м ² /с)	Получение частиц Mg/MgH_2 субмикронного размера (<u>механосинтез</u>)
Дегидрирование MgH_2 с образованием Mg	Спекание частиц магния при высоких температурах	Использование ГПМ для предотвращения спекания частиц магния

В третьей главе подробно представлены экспериментальные результаты и проведено их обсуждение.

Синтез ГПМ и Ni/ГПМ. В качестве прекурсора для синтеза ГПМ и Ni/ГПМ использовалась водная суспензия ОГ, представляющего собой искаженные листы графена с различными кислородсодержащими группами, такими как эпоксидная, гидроксидная и др.

ГПМ получали сушкой ОГ с его последующим термическим восстановлением в токе аргона в трубчатой печи, разогретой до 900°C. При этом происходило взрывообразное разложение ОГ, сопровождающееся выделением CO, CO₂ и паров воды, а сам материал значительно увеличивался в объеме. Затем проводили дополнительный отжиг полученного материала при 900°C в токе аргона в течение 3 ч. Полученный порошок имеет структуру, представляющую собой несколько искаженных графеновых листов, что подтверждается данными БЭТ ($S_{уд} \approx 620 \text{ м}^2/\text{г}$) и СЭМ (рис. 1а). По результатам элементного анализа состав содержит С – 96 мас.%; Н – 1 мас.%; О – 3 мас.%. По данным РФА рефлекс [002], соответствует межслоевому расстоянию $d = 0.822 \text{ нм}$ для ОГ, которое уменьшается до $d = 0.462 \text{ нм}$ для ГПМ (рис. 1б).

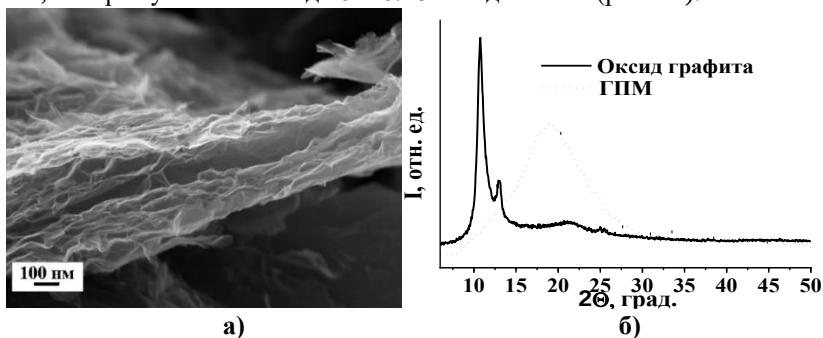


Рисунок 1 – а) Микрофотография (СЭМ) ГПМ; б) дифрактограммы ОГ и ГПМ

Композит $x\text{Ni/ГПМ}$ ($x = 11; 16 \text{ и } 25 \text{ мас.}\%$) получали одновременным восстановлением ацетата никеля и ОГ, предварительно проведя лиофильную сушку. Условия восстановления: смесь газов Ar/H_2 (скорость потока 200 мл/мин), температура печи 400°C. По данным элементного анализа, содержание кислорода находится в пределах 2–7 мас.% (для ОГ содержание кислорода составляет 46 мас.%).

Синтезированный материал характеризуется равномерным распределением частиц Ni по поверхности ГПМ (рис. 2а), а также однородным распределением по размеру (2–5 нм).

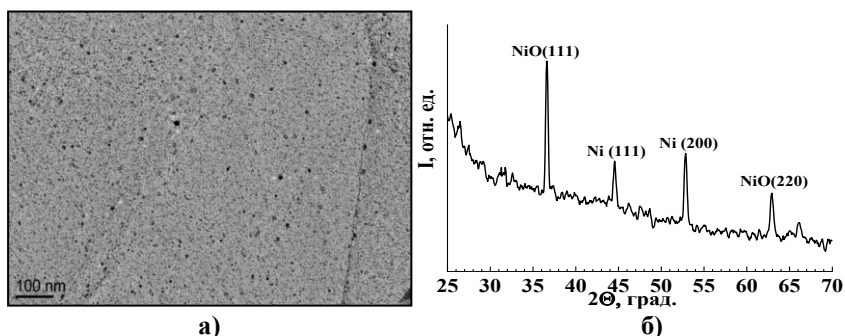


Рисунок 2 – а) Микрофотография (ПЭМ) Ni/ГПМ; б) дифрактограмма Ni/ГПМ

Полученные наноразмерные частицы Ni легко окисляются на воздухе, поэтому на дифрактограмме присутствуют рефлексы оксида, пики при $2\theta = 44.6^\circ$ и 52.9° подтверждают наличие Ni (рис. 2б).

Влияние ГПМ и Ni/ГПМ на скорость механосинтеза MgH_2 . Для получения порошка гидроксида магния субмикронных размеров из промышленного порошка магния МПФ-3 дисперсностью 0.2–0.5 мкм применяли метод механосинтеза под давлением водорода в планетарно-шаровой мельнице. Композит MgH_2 +Ni/ГПМ получали механохимической обработкой смеси Mg и Ni/ГПМ в водородной среде. Добавка ГПМ и композитов Ni/ГПМ в количестве 10 мас.% приводит к увеличению скорости гидрирования (рис. 3). Так, в случае добавки ГПМ реакция проходит в 2 раза быстрее и заканчивается через 5 ч; при добавке x%Ni/ГПМ – за 2–3 ч.

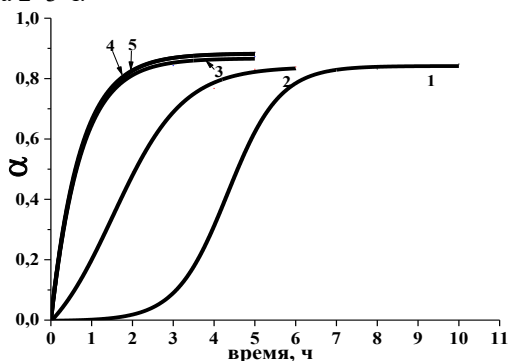


Рисунок 3 – Зависимость степени превращения от времени в реакции $Mg \rightarrow MgH_2$ (1) и в композите с 10 мас.% ГПМ (2), 11%Ni/ГПМ (3), 16%Ni/ГПМ (4) и 25%Ni/ГПМ (5)

Такой подход позволил получить высокодисперсные частицы гидроксида магния (рис. 4а).

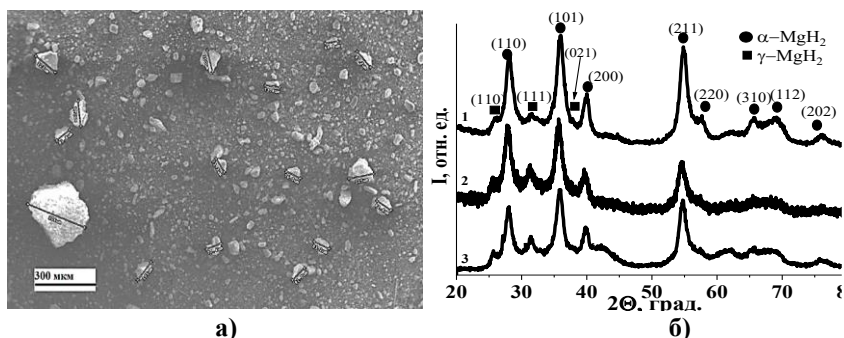


Рисунок 4 – а) Микрофотография (СЭМ) композита $\text{MgH}_2+\text{Ni}/\text{ГПМ}$ после механосинтеза; б) дифрактограммы: 1 – MgH_2 ; 2 – $\text{MgH}_2 + 10$ мас. % (25% $\text{Ni}/\text{ГПМ}$); 3 – $\text{MgH}_2 + 10$ мас. % ГПМ

Рентгенофазовый анализ (рис. 4б) показал наличие двух фаз гидрида: стабильной фазы $\alpha\text{-MgH}_2$ (тетрагональная сингония, $a = 0.4515$ нм, $c = 0.3019$ нм) и метастабильной фазы $\gamma\text{-MgH}_2$ (орторомбическая сингония, $a = 0.4526$ нм, $b = 0.5448$ нм, $c = 0.4936$ нм) в соотношении 4:1. При исследовании циклической устойчивости композита наличие γ -фазы сказывается только для первой десорбции, позволяя начать разложение гидрида при более низких температурах (разница составляет 40–60°C). При последующем гидрировании в автоклаве γ -фаза среди продуктов не обнаруживается.

Влияние ГПМ на гидрирование Mg и дегидрирование MgH_2 в стационарных условиях. Для оценки влияния ГПМ на реакционную способность в системе Mg-H_2 механохимическим методом синтезированы композиты MgH_2 с добавкой ГПМ в количестве 1, 5 и 10 мас.%. Полученные композиты загружали в автоклав для проведения реакции дегидрирования при 350°C и давлении водорода 1.1 атм. Оказалось, что композит с 10 мас. % ГПМ выделяет водород в 1.5 раза быстрее, чем композит с 5 мас. % ГПМ; количество выделенного водорода в 3 раза больше, чем для композита с 1 мас. % ГПМ (рис. 5а). В композитах после дегидрирования в таких условиях остается небольшое количество фазы MgH_2 (рис. 5б).

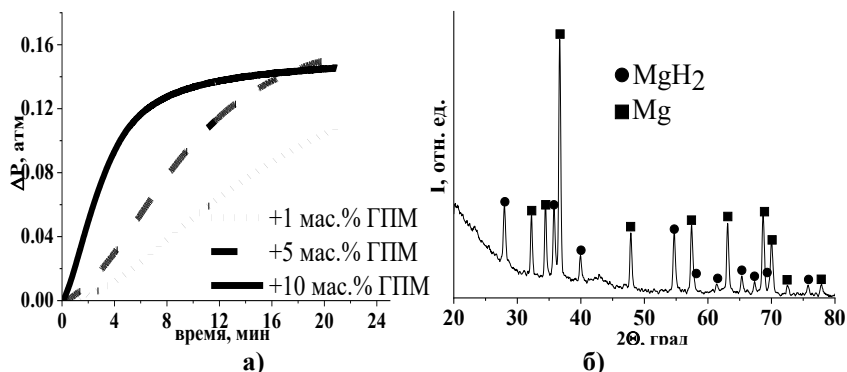


Рисунок 5 – а) Зависимость изменения давления водорода в реакции разложения MgH_2 от времени при разных количествах добавки ГПМ; б) дифрактограмма продукта дегидрирования (350°C, 20 мин) композита $MgH_2 + 1$ мас.% ГПМ

Положительное влияние ГПМ на гидрирование вызвано тем, что в процессе механосинтеза образующиеся субмикронные частицы MgH_2 покрываются углеродными слоями. Наличие углеродного слоя на частицах Mg , образующихся при дегидрировании MgH_2 , предотвращает агломерацию и сохраняет их в мелкодисперсном состоянии, что важно для последующего гидрирования магния из-за лимитирующей стадии диффузии атомов водорода через слой MgH_2 .

Синергетический эффект Ni/ГПМ на процесс гидрирования магния. Проведены сравнительные исследования процессов гидрирования магния в стационарных условиях (в автоклаве) с различными добавками:

- Ni , полученного восстановлением NiO водородом при 400°C;
- ГПМ;
- смеси Ni +ГПМ;
- Ni /ГПМ (Ni нанесен на ГПМ);
- без добавок (для сравнения).

Для получения указанных материалов проводили смешение составляющих компонентов – коммерческого гидрида магния и соответствующей добавки – в планетарно-шаровой мельнице при 300 об/мин в течение 1 ч в атмосфере водорода, соотношение масс навески и шаров 1/80. Затем образец перемещали в автоклав и проводили дегидрирование при давлении H_2 1 атм и температуре 350°C. При дегидрировании чистого MgH_2 происходит спекание магниевых частиц, что приводит к значительному уменьшению скорости поглощения водорода при проведении второй и последующих реакций гидрирования. Добавка ГПМ предотвращает их спекание за счет устранения контакта между частицами магния, что приводит к более высокой скорости гидрирования во втором цикле гидрирования/дегидрирования (рис. 6).

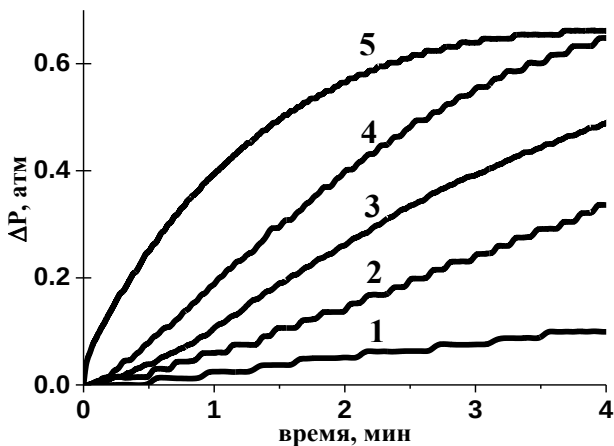


Рисунок 6 – Зависимость изменения давления водорода от времени реакции повторного гидрирования Mg (1), Mg+(Ni+ГПМ) (2), Mg+ГПМ (3), Mg+Ni (4) и Mg+Ni/ГПМ (5)

Наличие смеси Ni+ГПМ в композите с MgH_2 оказывает менее выраженное влияние на скорость повторного гидрирования магния по сравнению с композитом Ni/ГПМ (рис. 6, кривые 2 и 5 соответственно). Сильно выраженный эффект Ni/ГПМ на процесс повторного гидрирования связан с каталитическим действием нанесенных на ГПМ наночастиц Ni (~ 5 нм), имеющих намного меньший размер, чем частицы Ni (~ 2 мкм) в смеси с ГПМ (рис. 7).

Такое же преимущество дает добавка 10 мас.% Ni/ГПМ перед 10 мас.% Ni: меньший размер частиц и, как следствие, большее их число, несмотря на то, что металла в Ni/ГПМ только 25 мас.% (2.5 мас.% в пересчете на композит). На увеличение каталитической эффективности Ni/ГПМ влияет также равномерность его распределения по поверхности MgH_2 в процессе механосинтеза, а при добавке микронного размера частиц Ni такого распределения добиться невозможно. Другой причиной повышения эффективности добавок Ni/ГПМ на повторное гидрирование магния является предотвращение спекания частиц Mg из-за покрытия их углеродным слоем. Такое покрытие также интенсифицирует теплообменные процессы, поскольку реакция гидрирования протекает с выделением тепла, а ГПМ обладает большей теплопроводностью, чем MgH_2 . Таким образом, установлен синергетический эффект Ni/ГПМ на процесс обратимой реакции гидрирования магния.

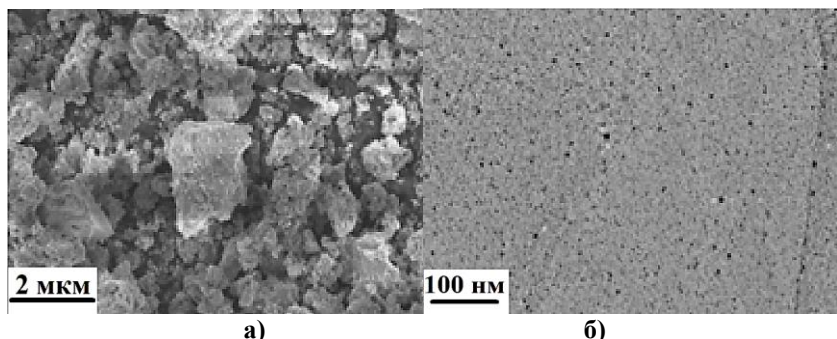


Рисунок 7 – Микрофотографии: а) никеля, использованного для приготовления смеси (Ni+ГПМ); б) композита Ni/ГПМ

Влияние количества циклов гидрирования/дегидрирования на водород-аккумулирующие характеристики композитов Mg+Ni/ГПМ. Для таких исследований выбраны наиболее перспективные для металлгидридного хранения водорода композиты магния с добавками 10 мас.% ГПМ и Ni/ГПМ. Особое внимание уделено характеру влияния количества циклов гидрирования/дегидрирования на водородоемкость и скорость гидрирования.

Оказалось, что при дегидрировании степень превращения α , равная 0.8, достигается для всех образцов за примерно одно и то же время (около 10 мин), при этом для композитов характерны более высокие скорости реакции на начальном этапе разложения гидрида и отсутствие инкубационного периода (рис. 8а).

Для MgH_2 без добавок характерно его постепенное спекание в циклах гидрирование-дегидрирование, проводимых при высоких температурах, а для композитов с ГПМ из-за покрытия частиц углеродными слоями этого процесса удается избежать. Благодаря применению наноразмерного никеля были достигнуты высокие скорости гидрирования по сравнению с Mg без добавок (рис. 8б).

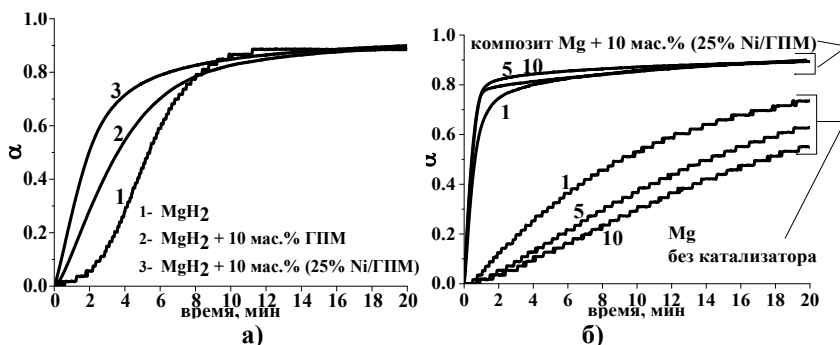


Рисунок 8 – Зависимость степени превращения от времени реакции:
а) дегидрирования; б) гидрирования (цифрами указан номер цикла гидрирования/дегидрирования)

Уменьшение количества осажденного никеля на ГПМ с 25 мас.% до 16 мас.% и 11 мас.% не сказалось на изменении скоростей реакций дегидрирования (рис. 9а), а также на устойчивости композитов $\text{MgH}_2 + 10 \text{ мас.}\% \text{ 11\%Ni/ГПМ}$ к 10 циклам гидрирования-дегидрирования (рис. 9б).

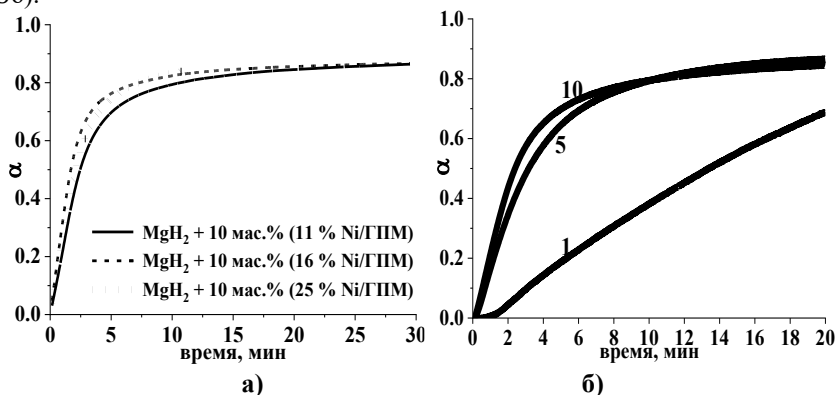


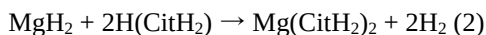
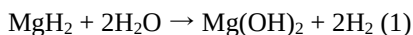
Рисунок 9 – Зависимость степени превращения от времени дегидрирования: а) для композитов с разным содержанием Ni; б) при циклировании композита $\text{MgH}_2 + 10 \text{ мас.}\% \text{ (11\%Ni/ГПМ)}$ (цифрами указан цикл гидрирования-дегидрирования)

При проведении нескольких циклов гидрирования/дегидрирования в этих образцах имеет место водородное охрупчивание, приводящее к измельчению материала. Это явление вызвано заметным увеличением объема при внедрении водорода в решетку металла и, как следствие, появлением напряжений в ней, что приводит к измельчению образца. По данным метода БЭТ удельная площадь поверхности для $\text{MgH}_2 + \text{Ni/ГПМ}$ при циклировании увеличивается с 5 до $20 \text{ м}^2/\text{г}$. Этим можно объяснить постепенную активацию образца, завершающуюся через 5 циклов гидрирования/дегидрирования (рис. 9б).

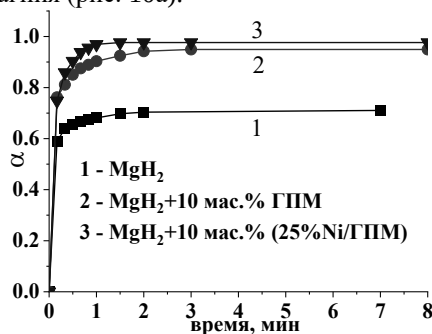
Аналогичные закономерности были получены при исследовании водород-аккумулирующих композитов магния с металлоорганическими каркасными структурами.

Водород-генерирующие свойства композитов MgH_2 +ГПМ и MgH_2 +Ni/ГПМ. Высокую перспективность полученные композиты имеют и как водород-генерирующие материалы, способные за короткий промежуток времени заполнять газовый баллон водородом до требуемого давления либо создавать постоянный поток газа к топливному элементу.

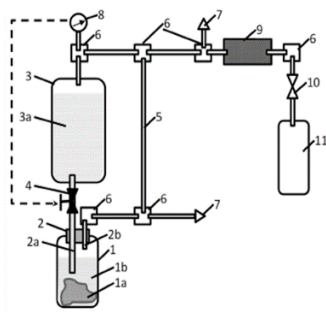
Реакцию взаимодействия MgH_2 и композитов с водой (1) и раствором лимонной кислоты $\text{H}(\text{CitH}_2)$ (2) проводили в волюмометрической установке при комнатной температуре в инертной атмосфере. Скорость выделения и количество выделяющегося газа измеряли по изменению высоты столба жидкости в бюретке.



Присутствие углеродной и металл-углеродной добавок в композите увеличивает выход водорода в 1.4 раза по сравнению с чистым гидридом магния (рис. 10а).



а)



б)

Рисунок 10 – а) Зависимость степени превращения от времени реакции MgH_2 с 0.3M раствором лимонной кислоты; б) схема установки генерирования и компримирования водорода

Максимальная скорость реакции регистрируется на начальном этапе в течение 0.5 мин из-за бурного взаимодействия с раствором кислоты, постепенно останавливаясь после 2 мин вследствие образования пленки нерастворимой $\text{Mg}(\text{OH})_2$. В случае чистого MgH_2 реакция протекает на 70%, а в случае MgH_2 с ГПМ и Ni/ГПМ – почти полностью. Это связано с большей дисперсностью MgH_2 в композите и удалением $\text{Mg}(\text{OH})_2$ с поверхности. Такой эффект позволяет уменьшить вдвое количество лимонной кислоты в описываемом процессе. Малое отличие в реакциях MgH_2 +ГПМ и MgH_2 +Ni/ГПМ с раствором кислоты, по-видимому, связано

с увеличением количества дефектов и уменьшением размера частиц в процессе механохимического синтеза из-за наличия углеродной добавки, препятствующей их агломерации. Наличие никеля для этой реакции разложения не существенно, однако имеет ключевую роль в скорости получения композита при механосинтезе (рис. 3).

Свойство необратимости реакций (1)–(2) позволяет генерировать и компримировать водород под давлением в замкнутом объеме, что было использовано в проектировании установки (рис. 10б) для заполнения композитного баллона водородом до давления 100 атм без энергозатрат. Для практического применения важно, что все расходоуемые компоненты – гидрид магния и лимонная кислота – могут храниться в герметичных контейнерах неограниченно долго.

Обработка кинетических кривых методом Авраами-Ерофеева.

Для оценки кинетических параметров были использованы следующие уравнения:

$$\alpha = A(1 - \exp[-(k\tau)^n]), \quad (3)$$

$$\alpha = A_1\{1 - \exp[-(k_1\tau)^{n_1}]\} + A_2\{1 - \exp[-(k_2\tau)^{n_2}]\}, \quad (4)$$

где α – степень превращения реакции гидрирования-дегидрирования; A – асимптотическое значение α при $t \rightarrow \infty$; k – константа скорости реакции; τ – время, за которое достигнуто определенное значение α ; n – показатель, косвенно характеризующий механизм реакции (параметр Авраами), индексы 1 и 2 в уравнении (4) относятся к быстрой (начальной) и медленной (конечной) стадиям реакции, соответственно.

Уравнение Авраами-Ерофеева (3) было использовано для обработки кинетических кривых дегидрирования MgH_2 и $\text{MgH}_2/\text{ГПМ}$, а для реакции гидрирования композита $\text{Mg}+\text{Ni}/\text{ГПМ}$ более подходящим оказалось уравнение (4), позволяющее разделить процесс на быструю (1) и медленную (2) стадию. Оказалось, что для композита $\text{Mg}+\text{Ni}/\text{ГПМ}$ константа скорости быстрой стадии k более чем в 3 раза больше, чем для Mg : 2.3 и 0.7 мин⁻¹ соответственно. Для $\text{Mg}+\text{Ni}/\text{ГПМ}$ установлено постепенное уменьшение вклада медленной стадии в процесс гидрирования композита с увеличением числа циклов гидрирование-дегидрирование: для первого цикла доля медленной стадии $\frac{A_2}{A_1+A_2}$ составляет 29%, для десятого цикла – 16%.

Для оценки кажущейся энергии активации E_a реакции дегидрирования было использовано уравнение Аррениуса:

$$k = K_0 \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right), \quad (5)$$

где K_0 – предэкспоненциальный множитель; T – температура, R – газовая постоянная.

Для композита $\text{MgH}_2+\text{Ni}/\text{ГПМ}$ (с содержанием 10% Ni на ГПМ) построены кинетические кривые при 4 температурах (рис. 11а). По константам скорости, вычисленным по (3) и указанным в табл. 2,

используя уравнение (5), получено значение $E_a = 76$ кДж/моль (рис. 11б). Эти значения k были получены при проведении реакций дегидрирования при фиксированном давлении 1.1 атм для каждой температуры, что не учитывает движущую силу реакции по давлению. Учет этого фактора осуществляли путем представления предэкспоненциального множителя K_0 в уравнении (5) в виде:

$$K_0 = K'_0 \cdot K_P, \quad (6)$$

где K'_0 – Аррениусовский предэкспонент, не зависящий от давления; K_P – движущая сила по давлению, которая для реакций дегидрирования, контролируемых диффузией, рассчитывается как:

$$K_P = T \left(1 - \left(\frac{P}{P_D} \right)^{1/2} \right), \quad (7)$$

где T – температура, P – давление водорода, P_D – равновесное давление водорода при температуре T .

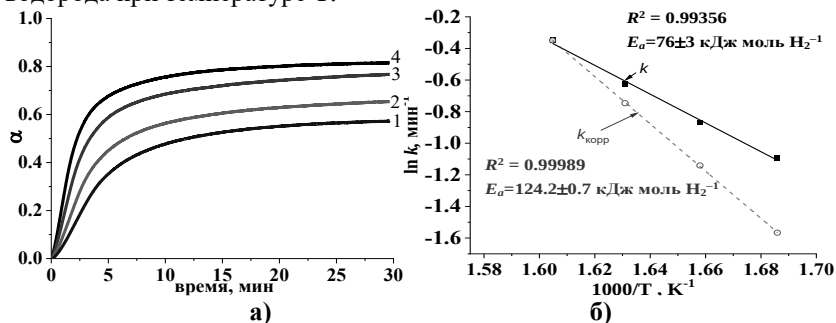


Рисунок 11 – а) Кривые дегидрирования композита $MgH_2+Ni/ГПМ$ при температурах 320 (1), 330 (2), 340 (3) и 350 °С (4); б) оценка E_a по Аррениусу

Скорректированное с учетом движущей силы по давлению значение константы скорости $k_{корр}$ рассчитывалось по формуле:

$$k_{корр} = k \left(\frac{K_P(T)}{K_P(T=350^\circ C)} \right). \quad (8)$$

Значения наблюдаемой (k) и скорректированной ($k_{корр}$) констант скорости дегидрирования композита $MgH_2+Ni/ГПМ$ (10% Ni), рассчитанные по формулам (3) и (7–8), приведены в табл. 2.

Таблица 2 – Наблюдаемые (k) и скорректированные ($k_{корр}$) значения константы скорости дегидрирования композита $MgH_2+Ni/ГПМ$ при различных температурах

Температура, °С	k , мин ⁻¹	$P_{равн}$, атм	$K_P(T)/K_P(350^\circ C)$	$k_{корр}$, мин ⁻¹
320	0.3359	3.10	0.62	0.2089
330	0.4196	3.98	0.76	0.3196
340	0.5342	5.07	0.89	0.4739
350	0.7054	6.41	1.00	0.7054

ВЫВОДЫ

1. Предложен оригинальный способ получения композитов Ni/ГПМ (ГПМ – графеноподобный материал) одновременным восстановлением соли никеля (Ni^{2+}) и оксида графита; установлено равномерное распределение на поверхности ГПМ частиц Ni размером около 5 нм.

2. Впервые сформированы композиты MgH_2 +Ni/ГПМ в условиях механохимической обработки смесей Mg с Ni/ГПМ в среде водорода; показано появление метастабильной фазы γ - MgH_2 с низкой температурой разложения.

3. Впервые получены высокодисперсные частицы MgH_2 , покрытые ГПМ, механохимическим синтезом в водороде из смеси Mg и ГПМ; установлено отсутствие спекания частиц Mg при температуре дегидрирования полученного композита.

4. Установлен синергетический эффект увеличения скорости гидрирования частиц Mg, покрытых Ni/ГПМ, по сравнению с механохимическим гидрированием Mg в присутствии порошков Ni, ГПМ или их смесей.

5. Определены кинетические характеристики реакции дегидрирования композита MgH_2 +Ni/ГПМ. Показано снижение энергии активации дегидрирования более чем на 30% для синтезированного композита по сравнению с чистым MgH_2 : 124 и 160 кДж/моль соответственно.

6. Впервые разработаны водород-аккумулирующие композиты магния с Ni/ГПМ с обратимой емкостью по водороду более 6 мас.%; показана перспективность их использования в качестве материалов для создания среднетемпературных аккумуляторов водорода.

7. Впервые разработаны водород-генерирующие композитные материалы MgH_2 +Ni/ГПМ, которые при реакции с водным раствором лимонной кислоты выделяют водород; показана их перспективность для компримирования водорода до давления 100 атм.

ПУБЛИКАЦИИ

Статьи в рецензируемых журналах:

1. Арбузов А.А. Синтез графеноподобных структур и формирование на их основе катализаторов и водород-аккумулирующих композитов / А.А. Арбузов, С.А. Можжухин, А.А. Володин, П.В. Фурсиков, Б.П. Тарасов // Известия АН. Серия химическая. – 2016. – № 8. – С. 1893-1901.

2. Тарасов Б.П. Никель-графеновый катализатор гидрирования магния и синтеза углеродных наноструктур / Б.П. Тарасов, А.А. Арбузов, А.А. Володин, С.А. Можжухин, М.В. Клюев // Известия высших учебных заведений. Серия: химия и химическая технология. – 2017. – Т. 60, № 8. – С. 43-46.

3. Тарасов Б.П. Композиты с 2D-графеновыми структурами для водородной энергетики и катализа процессов с участием водорода / Б.П. Тарасов, А.А. Арбузов, С.А. Можжухин, А.А. Володин, П.В. Фурсиков // Журнал структурной химии. – 2018. – Т. 59, № 4. – С. 867-875.

4. Tarasov B.P. Hydrogen storage behavior of magnesium catalyzed by nickel-graphene nanocomposites / B.P. Tarasov, A.A. Arbuzov, **S.A. Mozhhuhin**, A.A. Volodin, P.V. Fursikov, M.V. Lototskiy, V.A. Yartys // International Journal of Hydrogen Energy. – 2019. – V. 44, N 55. – P. 29212-29223.
5. Тарасов Б.П. Особенности гидрирования магния с Ni-графеновым покрытием / Б.П. Тарасов, **С.А. Можжухин**, А.А. Арбузов, А.А. Володин, Э.Э. Фокина, П.В. Фурсиков, М.В. Лотоцкий, В.А. Яртис // Журнал физической химии. – 2020. – Т. 94, № 5. – С. 772-777.
6. Tarasov B.P. Metal hydride – graphene composites for hydrogen based energy storage / B.P. Tarasov, A.A. Arbuzov, A.A. Volodin, P.V. Fursikov, **S.A. Mozhhuhin**, M.V. Lototskiy, V.A. Yartys // Journal of Alloys and Compounds. – 2022. – V. 896. – Article 162881.
7. Lototskiy M.V. Tailoring of hydrogen generation by hydrolysis of magnesium hydride in organic acids solutions and development of generator of the pressurised H₂ based on this process / M.V. Lototskiy, M.W. Davids, T.K. Sekgobela, A.A. Arbuzov, **S.A. Mozhhukhin**, Y. Zhu, R. Tang, B.P. Tarasov // Inorganics. – 2023. – V. 11, N 8. – Article 319.
8. Tarasov B. Metal hydride hydrogen storage (compression) units operating at near-atmospheric pressure of the feed H₂ / B. Tarasov, A. Arbuzov, **S. Mozhhukhin**, A. Volodin, P. Fursikov, M.W. Davids, J. Adeniran, M. Lototskiy // Inorganics. – 2023. – V. 11, N 7. – Article 290.
9. Арбузов А.А. Магниево-водород-генерирующие материалы и устройство для генерации водорода / А.А. Арбузов, **С.А. Можжухин**, М.В. Лотоцкий, Б.П. Тарасов // Журнал прикладной химии. – 2023. – Т. 96, № 2. – С. 217-224.
10. Fursikov P.V. Phase transformations and kinetics peculiarities in hydrogen desorption by composites based on magnesium–nickel eutectic alloy / P.V. Fursikov, V.N. Fokin, E.E. Fokina, A.A. Arbuzov, **S.A. Mozhhuhin**, B.P. Tarasov // High Energy Chemistry. – 2024. – V. 58, Suppl. 4. – S491-S495.
11. Lototskiy M.V. Metal–organic frameworks and their derivatives as catalysts of magnesium hydrogenation / M.V. Lototskiy, B.P. Tarasov, R.K. Baimuratova, **S.A. Mozhhukhin**, G.I. Dzhardimalieva, V.L. Sidorov, A.A. Arbuzov, P.V. Fursikov, I.I. Khodos, S. Pasupathi, V.M. Linkov // Journal of Physics: Energy. – 2025. – V. 7. – Article 045016.

Патенты РФ:

1. Патент № 2660232 Российская Федерация, МПК B01J 23/755 (2006.01), C01B 6/04 (2006.01), B82B 3/00 (2006.01), B01J 37/04 (2006.01), B01J 37/18 (2006.01). Никель-графеновый катализатор гидрирования и способ его получения: № 2016123445: заявл. 15.06.2016: опубл. 10.07.2018 / Арбузов А.А., **Можжухин С.А.**, Володин А.А., Фурсиков П.В., Тарасов Б.П.: заявитель ИПХФ РАН. – 8 с.
2. Патент № 2675882 Российская Федерация, МПК C01B 6/04 (2006.01), C01B 32/194 (2017.01), B82B 3/00 (2006.01), B82Y 40/00 (2011.01). Водород-аккумулирующие материалы и способ их получения: № 2016150246: заявл. 21.12.2016: опубл. 22.06.2018 / Арбузов А.А., **Можжухин С.А.**, Володин А.А., Фурсиков П.В., Тарасов Б.П.: заявитель ИПХФ РАН. – 7 с.
3. Патент № 2735285 Российская Федерация, МПК C01B 3/08 (2006.01) F17C 5/06 (2006.01) B01J 7/02 (2006.01). Способ получения компримированного водорода и устройство для его осуществления: № 2019141982: заявл. 18.12.2019: опубл. 29.10.2020 / Арбузов А.А., Шимкус Ю.Я., **Можжухин С.А.**, Сон В.Б., Тарасов Б.П.: заявитель ИПХФ РАН. – 11 с.
4. Патент № 2835092 Российская Федерация, МПК C01B 32/192 (2017.01) C01B 32/194 (2017.01) B01J 23/755 (2006.01) B01J 37/04 (2006.01) B01J 37/08 (2006.01) B01J 37/18 (2006.01). Способ получения никель-графенового катализатора гидрирования: № 2024110169: заявл. 15.04.2024: опубл.: 21.02.2025 / Арбузов А.А., **Можжухин С.А.**, Володин А.А., Фурсиков П.В., Ахременков Б.В., Лотоцкий М.В., Тарасов Б.П.: заявитель ФИЦ ПХФ и МХ РАН. – 8 с.

Глава в коллективной монографии:

1. **Можжухин С.А.** Водород-аккумулирующие материалы на основе магния (с. 79-103) / **С.А. Можжухин**, А.А. Арбузов, М.В. Клюев, Б.П. Тарасов // Органические и гибридные наноматериалы: тенденции и перспективы. Под ред. В.Ф. Разумова и М.В. Клюева. – Иваново: Изд. Иван. гос. ун-т. – 2017. – 516 с.

Статьи в Сборнике:

1. Тарасов Б.П. Графеноподобные наноструктуры и функциональные композиты на их основе / Б.П. Тарасов, А.А. Арбузов, **С.А. Можжухин**, А.А. Володин // Сборник научных статей «Наноструктуры в конденсированных средах». – Минск: Институт тепло- и массообмена им. Лыкова. – 2016. – С. 141-147.

2. Володин А.А. Углерод-металлогидридные композиты для аккумуляторов водорода и электрохимических источников тока многократного действия / А.А. Володин, А.А. Арбузов, **С.А. Можжухин**, Б.П. Тарасов // Сборник научных статей «Наноструктуры в конденсированных средах». – Минск: Институт тепло- и массообмена им. Лыкова. – 2016. – С. 148-154.

Тезисы докладов:

1. **Можжухин С.А.** Металлогидридные материалы для компримирования водорода / **С.А. Можжухин**, М.С. Бочарников, Б.П. Тарасов // 10-ая Международная конференция «Физико-химические проблемы возобновляемой энергетики». – Черногоровка. – 2014. – С. 52.

2. **Можжухин С.А.** Водородсорбирующие интерметаллические соединения для компримирования водорода / **С.А. Можжухин**, М.С. Бочарников, Б.П. Тарасов // V Международная конференция с элементами научной школы для молодежи «Функциональные наноматериалы и высокочистые вещества». – Суздаль. – 2014. – С. 248-250.

3. **Можжухин С.А.** Влияние добавки восстановленного оксида графита и композитов на его основе на скорость гидрирования магния / **С.А. Можжухин**, А.А. Арбузов // X Всероссийская школа-конференция молодых ученых «Теоретическая и экспериментальная химия жидкофазных систем». – Иваново. – 2015. – С. 140-141.

4. **Можжухин С.А.** Каталитическое гидрирование магния с использованием Ni-графеновых композитов / **С.А. Можжухин**, А.А. Арбузов, Б.П. Тарасов // V конференция с элементами научной школы для молодежи «Органические и гибридные наноматериалы». – Иваново. – 2015. – С. 142-146.

5. **Можжухин С.А.** Влияние восстановленного оксида графита на скорость гидрирования магния // Научные конференции фестиваля студентов, аспирантов и молодых ученых. – Иваново. – 2015. – С. 155.

6. Арбузов А.А. Композиты на основе графеноподобных структур / А.А. Арбузов, С.Д. Куш, Н.С. Куянок, А.А. Володин, **С.А. Можжухин**, Б.П. Тарасов // Первая российская конференция «Графен: молекула и 2D-кристалл». – Новосибирск. – 2015. – С. 71.

7. **Можжухин С.А.** Водород-аккумулирующие композиты магния с Ni/BOG / **С.А. Можжухин** // Научные конференции фестиваля студентов, аспирантов и молодых ученых. – Иваново. – 2016. – С. 120.

8. **Можжухин С.А.** Влияние никеля и восстановленного оксида графита на процесс гидрирования магния // XXVIII Симпозиум «Современная химическая физика». – Туапсе. – 2016. – С. 49.

9. Тарасов Б.П. Композиты с 2D-графеновыми структурами для водородной энергетики и катализа процессов с участием водорода / Б.П. Тарасов, А.А. Арбузов, **С.А. Можжухин**, А.А. Володин, П.В. Фурсиков // Вторая Российская конференция «Графен: молекула и 2D кристалл». – Новосибирск. – 2017. – С. 143.

10. Тарасов Б.П. Никель-графеновый катализатор гидрирования магния и синтеза углеродных наноструктур / Б.П. Тарасов, А.А. Арбузов, А.А. Володин, **С.А. Можжухин**,

М.В. Клюев // II Всероссийская научная конференция (с международным участием) «Актуальные проблемы адсорбции и катализа». – Плещ. – 2017. – С. 346-347.

11. **Можжухин С.А.** Формирование и исследование водород-аккумулирующих композитов $Mg + Ni/GPM$ / **С.А. Можжухин**, А.А. Арбузов, М.В. Клюев, Б.П. Тарасов // VI Всероссийская школа-конференция молодых ученых «Органические и гибридные наноматериалы». – Иваново. – 2017. – С. 147-151.

12. **Можжухин С.А.** Водород-аккумулирующие композиты Mg с Ni/GPM / **С.А. Можжухин**, А.А. Арбузов, М.В. Клюев, Б.П. Тарасов // Тринадцатая российская конференция «Физико-химические проблемы возобновляемой энергетики». – Санкт-Петербург. – 2017. – С. 27-28.

13. Тарасов Б.П. Металл-графеновые катализаторы: получение и перспективы применения / Б.П. Тарасов, А.А. Арбузов, А.А. Володин, **С.А. Можжухин**, М.В. Клюев // III Всероссийская научная конференция (с международным участием) «Актуальные проблемы теории и практики гетерогенных катализаторов и адсорбентов». – Кострома. – 2018. – С. 269-271.

14. Тарасов Б.П. Графеноподобные материалы для водородного аккумулирования электроэнергии / Б.П. Тарасов, А.А. Арбузов, **С.А. Можжухин**, А.А. Володин, П.В. Фурсиков // Третья российская конференция «Графен: молекула и 2D-кристалл». – Новосибирск. – 2019. – С. 99.

15. Тарасов Б.П. Магний-графеновые материалы для аккумулирования и генерирования водорода / А.А. Арбузов, **С.А. Можжухин**, Б.П. Тарасов // II-ая Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Водород. Технологии. Будущее». – Томск. – 2021. – С. 47.

16. Тарасов Б.П. Магний-графеновые композиты для водородной энергетики / Б.П. Тарасов, А.А. Арбузов, **С.А. Можжухин** // XVI-ая российская конференция «Физико-химические проблемы возобновляемой энергетики». – Санкт-Петербург. – 2021. – С. 28-29.

17. **Можжухин С.А.** Металлогидридный аккумулятор водорода из высокотемпературного электролизного генератора / **С.А. Можжухин**, Г.С. Сафронов, Б.П. Тарасов, А.А. Арбузов // Семнадцатая российская конференция «Физико-химические проблемы возобновляемой энергетики». – Санкт-Петербург. – 2022. – С. 135-136.

18. **Можжухин С.А.** Влияние катализаторов Ni/GPM и Pd/MOF на гидрирование магния // Третья Всероссийская школа-семинар (3–4 октября) молодых ученых «Водородные энерготехнологии с использованием металлогидридов». – Черноголовка. – 2024. – С. 89-94.

19. **Можжухин С.А.** Влияние Ni катализатора на кинетику обратимой реакции разложения MgH_2 // Третья Всероссийская школа-семинар (3–4 октября) молодых ученых «Водородные энерготехнологии с использованием металлогидридов». – Черноголовка. – 2024. – С. 151-152.

20. **Можжухин С.А.** Формирование и исследование водород-аккумулирующих свойств композитов Mg с Ni/GPM // IV молодежная школа «Водородные и металлогидридные энерготехнологии». – Иваново. – 2025. – С. 56.