



«УТВЕРЖДАЮ»

Заместитель директора
по научной работе
ФИЦ ПХФ и МХ РАН
д-р хим. наук Е.В. Золотухина

«22» мая 2026 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии Российской академии наук (ФИЦ ПХФ и МХ РАН)
на диссертационную работу

Короля Артема Алексеевича

на тему: «Материалы на основе многокомпонентных гидридообразующих сплавов для водородной энергетики: синтез, физико-механические и водородсорбционные свойства»,
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 2.6.17 – Материаловедение

Актуальность темы работы

Одной из главных проблем в области водородных технологий является обеспечение безопасности хранения и транспортировки водорода, поскольку водород обладает высокой реакционной и диффузионной активностью. Перспективным решением рассматривается разработка компактных и безопасных методов хранения водорода в виде гидридов металлов и сплавов, в которых можно обратимо хранить водорода больше, чем в баллонах с газообразным водородом или в криогенных системах со сжиженным водородом. К тому же металлогидридное хранение позволит существенно снизить риск возникновения пожароопасных ситуаций и потерь водорода. Но у металлогидридного способа хранения имеются и существенные недостатки, связанные с образованием активных высокодисперсных порошков при обратимом гидрировании, которые имеют невысокую теплопроводность, могут «разбухаться» и спекаться при гидрировании и выноситься с потоком водорода из системы хранения. Для устранения этих недостатков в диссертационной работе предлагается применять водород-аккумулирующие материалы с объемными пористыми структурами.

Хорошо изучены гидридообразующие интерметаллические соединения редкоземельных и 3d-металлов типа AB_5 , AB_2 и AB , на основе которых разрабатываются металлогидридные аккумуляторы водорода. В диссертации особое внимание уделено многокомпонентным сплавам-накопителям водорода, иногда называемым «высокоэнтропийными» сплавами. Они представляют собой однофазные твердые растворы, содержащие четыре и более компонентов с атомной долей от 5 до 35%. По сравнению с интерметаллическими соединениями «высокоэнтропийные» сплавы проще в изготовлении, обладают пластичностью и потенциально могут иметь большую водородоемкость. Для выявления перспектив таких сплавов как накопителей водорода в диссертации изучены фазовые и структурные состояния в процессе обратимого гидрирования, выявлены зависимости физико-механических характеристик и термодинамических параметров взаимодействия с водородом от способов получения материалов с объемными пористыми структурами. Выявленные закономерности важны для разработки новых водород-аккумулирующих материалов на основе многокомпонентных сплавов для водородных технологий, в том числе – для водородной

энергетики. Таким образом, разработка научных основ синтеза и технологии создания металлгидридных материалов с высоким содержанием обратимого водорода является важной и актуальной проблемой водородного материаловедения. В этой связи тематика диссертационного исследования представляется актуальной и имеет важное фундаментально-прикладное значение в области водородного материаловедения.

Основные новые результаты и их значимость

В работе А.А. Короля получен целый ряд новых результатов, на основании которых сформулированы научные основы синтеза и технологии новых металлгидридных многокомпонентных материалов, отличающихся повышенной водородоемкостью и циклической стабильностью и улучшенной кинетикой гидрирования, что расширяет **теоретические** представления в области водородного материаловедения и имеет **практическую ценность** для создания отечественной технологии изготовления гидридообразующих многокомпонентных сплавов.

Среди полученных в ходе диссертационного исследования результатов особый интерес представляют:

1. Уточнение механизма обратимых структурных превращений в ходе гидрирования «высокоэнтропийных» сплавов и разложения гидридных фаз на их основе. Выявление температуры как главного фактора, определяющего пути прямой и обратной реакций.

2. Разработанные методики формирования объёмных пористых структур лазерным плавлением порошков гидридообразующих сплавов, обладающих повышенной теплопроводностью.

3. Установление положительного влияния малых добавок хрома и серы на активацию интерметаллида TiFe.

4. Отработка методики формирования объёмных структур на основе гидридообразующих сплавов с использованием аддитивной технологии и обоснованные предложения по путям дальнейшего усовершенствования данного метода. Интересным (хотя и отрицательным) результатом является обнаружение неустойчивости структур при использовании TiFe, полученного дуговой плавкой с последующим гидридным диспергированием.

5. Методика приготовления и характеристика механических свойств металл-полимерных гидридообразующих композитов.

6. Установление перспективности использования объёмных структур как материалов для металлгидридного хранения водорода.

Результаты, полученные в работе, могут быть **рекомендованы к использованию** как в научно-исследовательских и образовательных организациях, проводящих работу и обучение по материаловедению и водородным технологиям, так и в коммерческих компаниях, использующих водород для нефтепереработки, для синтеза химических соединений, для восстановления оксидов, для получения энергии: ФИЦ ПХФ и МХ РАН, ИФХЭ РАН, ОИВТ РАН, МГУ им. М.В. Ломоносова, ТПУ, Сколтех, СПбГУ, МЭИ, МФТИ, МИФИ, ГИРЕДМЕТ, АО «Газпром», ГК «Росатом», АО «Роснефть», ООО «ИНК», АО «Евросибэнерго», ЦВЭ и ЦВТ АФК «Система» и другие.

Степень достоверности полученных результатов и обоснованность выводов и заключений

Достоверность полученных в диссертационной работе результатов обеспечивается использованием современных методов исследований и испытаний с большим количеством проведенных экспериментов, воспроизводимостью результатов и их согласованностью с современными представлениями в области материаловедения и с результатами других исследований по схожей тематике.

Основные положения диссертации, выводы и сделанные заключения прошли апробацию на российских и международных научных конференциях и опубликованы в рецензируемых журналах из списка ВАК. Автором по теме диссертации опубликовано 8 статей в изданиях, входящих в базы данных Web of Science и Scopus, с квартилем Q1 и Q2.

Объем и уровень публикационной активности диссертанта в полной мере соответствуют требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям.

Общая характеристика диссертации

Диссертационная работа Короля Артема Алексеевича изложена на 179 страницах, включает 6 глав, 67 рисунков, 26 таблиц и 267 источников литературы.

Содержание диссертационной работы и автореферата соответствуют паспорту научной специальности 2.6.17 – Материаловедение. Автореферат диссертации в полной мере отражает ее основное содержание диссертации, научные результаты и выводы.

Изложение материала выполнено логично, работа выглядит завершенной. Логика представления материала соответствует этапам решения поставленных научных задач. Выводы по работе не противоречат приведенным результатам.

Замечания

1. Неверная формулировка причины «разбухания» гидридообразующего материала: это не локальный перегрев (как приведено в тексте диссертации), а расширение металлической матрицы при внедрении водорода в ее междоузлия.

2. Не вполне обоснованной является подразумеваемая связь между малой теплопроводностью ультрадисперсных порошков металлогидрида и их пиррофорностью (стр. 21). Обе особенности действительно присущи тонкодисперсным металлическим порошкам, но они никак не связаны и должны быть упомянуты в отдельных пунктах.

3. Не совсем верным является утверждение, что гидриды интерметаллидов на основе фаз Лавеса слишком стабильны, чтобы иметь практическое значение (стр. 29). На самом деле, в зависимости от состава гидриды фаз Лавеса имеют чрезвычайно широкий диапазон стабильностей, соответствующий диапазону равновесных давлений водорода от 10^{-5} до 1000 атм при температурах 20–150°C (Yartys V.A., Lototsky M.V. J. Alloys Compd. 2022. V. 916. Article 165219).

4. Объяснение «снижения водородоемкости в механоактивированном сплаве $\text{LaNi}_{2.5}\text{Co}_{2.4}\text{Mn}_{0.1}$ (стр. 111) за счет внедрения атомов кислорода в междоузлия кристаллической решетки интерметаллида» не совсем правильно: более вероятно, что к неполному гидрированию механоактивированных сплавов приводит загрязнение поверхности кислородом.

5. Если с утверждением о замещении железа на хром в TiFe (стр. 120) безусловно можно согласиться, то для серы такое утверждение является сомнительным – тем более, что, согласно полученным результатам, сера присутствует в виде включений Ti_2S по границам зерен. Образование Ti_2S сопровождается выведением титана из TiFe , т.е. уменьшением атомного соотношения $\text{Ti}:\text{Fe}$, что и приводит к снижению водородоемкости серосодержащего интерметаллида (рис. 48). Другой причиной наблюдаемого явления может быть образование TiFe_2 в сплаве, обедненном по титану.

6. В тексте диссертации имеются неточности и опечатки, например:

- стр. 17: приведена объемная плотность водорода в композитных баллонах, равная 80 г/л (т.е. выше, чем 70 г/л для жидкого водорода); в реальности при давлении водорода в баллоне 70 МПа и комнатной температуре, объемная плотность равна 40 г/л.

- стр. 19: написано «строительные материалы», имеются в виду «конструкционные материалы».

- стр. 22: термин «негорючий гидрид» – жаргон.

- стр. 40: Al, Co и Mn в малых концентрациях используются не в качестве «заменителя» Ni, а частично замещают его в структуре AB_5 .

- стр. 46: легирование палладия серебром, иттрием, золотом и прочими металлами осуществляют не только для снижения стоимости мембраны, но и для улучшения эксплуатационных характеристик мембран – увеличения водородопроницаемости, подавления образования гидридной фазы для предотвращения растрескивания и т.п.

- стр. 124: в табл. 21 не указаны единицы приведенных значений предела прочности. Отмеченные замечания не снижают общего положительного впечатления от работы.

Заключение

Диссертация Короля Артема Алексеевича на тему: «Материалы на основе многокомпонентных гидридообразующих сплавов для водородной энергетики: синтез, физико-механические и водородсорбционные свойства» представляет собой завершённую научно-квалификационную работу, в которой разработаны научные основы технологии синтеза многокомпонентных сплавов с объемной структурой и металлгидридных материалов.

По уровню научной новизны, практической значимости, объёму выполненных исследований и публикационной активности работа соответствует критериям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, Положения о присуждении ученых степеней ВАК Российской Федерации, а также отвечает всем требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней в НИТУ МИСИС П 710.05-22, предъявляемым к диссертациям на присуждение степени кандидата технических наук, а ее автор, Король Артем Алексеевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.17 – Материаловедение.

Отзыв составил: доктор химических наук (специальности 1.4.4. – Физическая химия и 1.4.15 – Химия твердого тела (химические науки)) Тарасов Борис Петрович, главный научный сотрудник, руководитель комплексом лабораторий водородного материаловедения отдела функциональных материалов для химических источников энергии ФИЦ ПХФ и МХ РАН.

Диссертация и отзыв обсуждены на заседании секции № 6 Ученого совета ФИЦ ПХФ и МХ РАН 19 мая 2026 года (протокол № 6).

Председатель
Секции № 6 Ученого совета
ФИЦ ПХФ и МХ РАН,
кандидат химических наук
Ученый секретарь
Секции № 6 Ученого совета
ФИЦ ПХФ и МХ РАН,
кандидат химических наук

«19» мая 2026 г.



Лысков

Лысков Николай Викторович

Писарева

Писарева Анна Владимировна

Контактная информация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской
химии Российской академии наук, 142432, г. Черноголовка, Московская область, проспект
Академика Семенова, д. 1
www.icp-ras.ru, director@icp.ac.ru, zolek@icp.ac.ru, +7(496)5224476.

СОТРУДНИК
КАНЦЕЛЯРИИ

Лысков Н. В.
Писаревой А. В.
Жу