

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации

УТВЕРЖДАЮ

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)»
(МФТИ, Физтех)

Юридический адрес: 117303, г. Москва,
ул. Керченская, дом 1А, корпус 1
Почтовый адрес: 141700, Московская обл.,
г. Долгопрудный, Институтский переулок, дом
Тел.: +7 (495) 408-42-54, факс: +7 (495) 408-68-69
info@mipt.ru

Проректор по научной работе



Баган Виталий
Анатольевич

2023 г.

№

на №

от

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертацию **Ерилина Ивана Сергеевича**
«Формирование функциональных слоев твердооксидных топливных элементов
методом аэрозольного осаждения в вакууме», представленную на соискание
ученой степени кандидата технических наук по специальности
1.3.8. Физика конденсированного состояния

Диссертация Ерилина Ивана Сергеевича посвящена исследованию свойств функциональных слоев твердооксидных топливных элементов (ТОТЭ), изготовленных методом аэрозольного осаждения в вакууме (АД). В частности, в диссертации исследуется микроструктура тонкослойной электролитной мембраны для анод-поддерживаемых ТОТЭ и функционального анода для металл-поддерживаемых ТОТЭ, а также электрохимические характеристики изготовленных ТОТЭ. На данный момент времени ТОТЭ, не смотря на их хорошо известные преимущества в эффективности и экологических показателях, не могут конкурировать с традиционными генераторами электрической энергии, такими как двигатель внутреннего сгорания, газопоршневая установка и др., в связи с их высокой стоимостью и относительно быстрой деградацией на высоких температурах работы 800 – 850 °С. Для снижения как стоимости производства ТОТЭ, так и скорости деградации необходимо снижение рабочих температур до значений порядка 500 – 750 °С. Работы на таких температурах наиболее оправданы

в случае использования тонкослоевого электролита, а также металлической подложки при создании ТОТЭ, в связи с этим тема диссертационной работы является актуальной.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы из 99 источников.

Во введении обосновывается актуальность исследования, формулируются задачи, цель, положения, выносимые на защиту, а также раскрывается новизна и значимость.

Первая глава традиционно включает обзор литературы. В данной главе описываются основные типы ТОТЭ, разъясняется его принцип работы. Приведен краткий, но тем не менее, охватывающий все основные методики изготовления ТОТЭ обзор. Описание принципа работы метода АД, а также его особенностей, связанных с низкими давлениями газа-носителя, представляют на наш взгляд особый интерес. Кроме того, в данной главе приведен обзор изготовления ТОТЭ с помощью метода АД другими исследовательскими группами, который позволяет в короткое время ознакомиться с основными мировыми результатами по данной тематике и получить более глубокое понимание преимуществ данного метода в приложениях к созданию ТОТЭ.

Во второй главе приводится описание использованных материалов, методик изготовления и исследования образцов. Особенно следует отметить специально спроектированную и созданную под поставленные задачи автором установку для метода АД, а также способ формирования металлических подложек в керамических формах, отличающийся своей простотой и эффективностью.

Третья глава посвящена анод-поддерживаемым ТОТЭ с тонкослоевым электролитом, изготовленным комбинацией метода АД и высокотемпературного обжига. Проведен подробный анализ зависимости микроструктуры электролита от параметров осаждения и высокотемпературного обжига, который позволил выделить наиболее подходящий для осаждения по свойствам порошок электролита. Путем измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) и спектров импеданса изготовленных анод-поддерживаемых ТОТЭ однозначно показано, что

осажденный методом АД электролит после обжига при температуре 1300 °С обладает отличными характеристиками по газоплотности и проводимости, а именно обеспечивает напряжение разомкнутой цепи (НРЦ) выше 1 В в температурном диапазоне 650 – 850 °С и обладает омическим сопротивлением не более 25% от полного сопротивления ТОТЭ. В главе также приведена полезная информация по проблемам масштабирования данной технологии изготовления электролита до размеров образцов 50×50 мм и более.

Четвертая глава посвящена металл-поддерживаемым ТОТЭ с функциональным анодом, изготовленным методом АД, и представляет особый интерес в том числе с точки зрения формирования металло-керамических композитов на подложках, подверженных окислению при обжиге в воздушной атмосфере. Было показано, что возможно формирование функционального металло-керамического анода с размером частиц до нескольких сотен нанометров из порошка без использования связующих на стальной подложке с размером пор в несколько десятком микрометров. Благодаря высокому термодинамическому стимулу к спеканию наноразмерных и субмикронных частиц температуры консолидации функционального никель-керамического анода в условиях вакуумной или нейтральной атмосферы находятся в диапазоне 900 – 1000 °С. Было показано, что относительно высокая плотность слоев, изготовленных методом АД, позволяет использовать их в качестве подложек для осаждения слоев из газовой фазы, в частности для осаждения мембраны электролита методом магнетронного напыления. Итоговым результатом в данной главе является изготовление сборки из 2 металл-поддерживаемых ТОТЭ размером 20×20 мм с Ni/GDC анодом, GDC мембраной и LSC катодом. Особенностью данной сборки является то, что единственный высокотемпературный обжиг всех слоев ТОТЭ был проведен непосредственно во время испытаний сборки. Удельная мощность при использовании в качестве топлива водорода и в качестве окислителя воздуха составила 0,2 Вт/см² при 600 °С, данные значения мощности на электролит-поддерживаемых конструкциях ТОТЭ достигаются только на температурах 800 – 850 °С, что указывает на высокую значимость достигнутых результатов.

Кроме того, было указано на высоких потенциал для дальнейшего повышения удельной мощности, например, путем повышения НРЦ при переходе на трехслойный электролит GDC/8YSZ/GDC.

В заключении сформулированы результаты работы.

Представленные в диссертационной работе результаты по изготовлению тонкослойных мембран электролита для анод-поддерживаемых ТОТЭ и функционального анода для металл-поддерживаемых ТОТЭ методом АД, а также по исследованию микроструктуры и электрохимических характеристик изготовленных ТОТЭ получены впервые и являются новыми. Научная значимость данной работы обусловлена интересом к формированию тонких слоев функциональных материалов из субмикронного и нано порошка без использования связующих и других вспомогательных компонентов. Практическая значимость обусловлена необходимостью повышения КПД генерации электрической энергии, особенно в диапазоне низких мощностей (<100 кВт).

Достоверность результатов работы обеспечивается их повторяемостью, а также согласованностью с накопленными знаниями по исследуемой тематике.

Автореферат полностью и точно отражает содержание диссертации.

Апробация работы

Результаты работы были опубликованы в трех статьях в журналах, входящих в перечень ВАК РФ, а также представлены на устных докладах на семи международных и всероссийских конференциях.

Замечания

К диссертации есть следующие замечания:

1. В диссертации используется терминология агломераты высокой плотности и агломераты низкой плотности, тем не менее никаких численных данных, определяющих частицы порошка к тому или иному классу агломератов, не приводится.

2. В таблицах с параметрами осаждения слоев (таблица 3.1, 3.2 и т.д.) присутствует параметр «загрузка порошка», г. Данный параметр несет мало

информации, так как в используемой системе генерации аэрозоля не весь загружаемый порошок в систему генерации распыляется из сопла. Вместо параметра «загрузка порошка» должен быть приведен параметр производительности распыления порошка, г/мин.

3. В диссертации отсутствуют сведения об эффективности осаждения слоев, полученных в рамках работы.

4. Для характеристики микроструктуры слоев в том числе пористости/газоплотности используется только качественное описание, основанное на изображениях, полученных с помощью растрового электронного микроскопа, без приведения численных данных. Тем не менее плотность осажденных слоев является одним из наиболее важных параметров как для электролитной мембраны, так и для функционального анода, особенно с учетом того, что в главе 4, возможно, наблюдается проблема недостаточной пористости анода, приводящая к зависимости поляризационных потерь от потока топливного газа.

5. Проектирование и создание установки аэрозольного осаждения в вакууме является одним из основных результатов данной работы. В связи с чем было бы желательно привести более развернутое описание устройства и принципа разработки различных узлов данной установки, в частности не приведено описание принципов разработки и устройства сопла, генератора аэрозоля.

Приведенные замечания носят рекомендательный характер и в первую очередь направлены на улучшение последующих исследований диссертанта. Данные замечания не влияют на общую положительную оценку данной работы.

Заключение

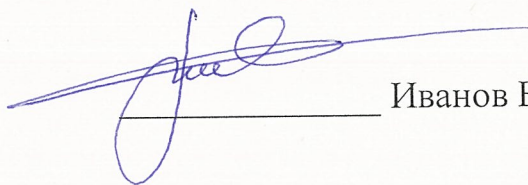
Таким образом, диссертационная работа Ерилина Ивана Сергеевича «Формирование функциональных слоев твердооксидных топливных элементов методом аэрозольного осаждения в вакууме» является завершенной научно-исследовательской работой, выполнена автором на высоком методическом уровне,

и полностью соответствует всем требованиям предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния согласно «Положению о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года № 842, а ее автор, Ерилин Иван Сергеевич, заслуживает присуждение ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния.

Доклад Ерилина И.С. по материалам диссертационной работы заслушан и обсужден на научном семинаре Института квантовых технологий МФТИ «20» октября 2023 г.

Отзыв на диссертацию обсуждён и одобрен на научном семинаре Института квантовых технологий МФТИ «20» октября 2023 г., протокол №1.

Доктор физ.-мат. наук,
член-корреспондент РАН



Иванов Виктор Владимирович

Почтовый адрес: 141700, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер.,9
Телефон: +7 (498) 744-65-47,

Адрес электронной почты: ivanov.vv@mipt.ru

Организация – место работы: федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)», Институт квантовых технологий

Должность: Директор

Web-сайт организации: <https://mipt.ru>