

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Агарковой Екатерины Алексеевны «Многослойные Ni-керметные аноды с тонкопленочными электролитами для высокоэффективных твердооксидных топливных элементов», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.3.8 – «Физика конденсированного состояния»

### Актуальность темы исследования

С развитием альтернативной энергетики и децентрализованного энергоснабжения у потенциальных потребителей растет интерес к энергоустановкам на базе твердооксидных топливных элементов. Твердооксидные топливные элементы (ТОТЭ) и энергоустановки на их основе являются перспективными автономными источниками энергии малой мощности, обладающими рядом преимуществ перед традиционными дизельными генераторами, газотурбинными и газопоршневыми установками. В ТОТЭ происходит прямое преобразование химической энергии топлива в электрическую энергию постоянного тока, что определяет высокую энергетическую эффективность таких энергоустановок, при этом, могут быть реализованы высокие значения удельной мощности. Такие энергоустановки не имеют в своем составе движущихся элементов, что предотвращает их преждевременный износ и необходимость использования расходных материалов. Несмотря на достигнутые успехи в технологии ТОТЭ, остается и требует решения ряд проблем. Эффективность работы ТОТЭ во многом определяется конструкцией топливного элемента, составом твердого электролита и электрода, методами их изготовления, правильной организацией процесса генерации электрической энергии.

Диссертационная работа Е.А. Агарковой посвящена разработке технологии получения двухслойных анодных подложек и изготовлению на их основе планарных твердооксидных топливных элементов с анод-

поддерживающей конструкцией. В данном типе ТОТЭ, анодные подложки, помимо поддерживающей функции, должны обеспечивать протекание электрохимических реакций и газовый транспорт. **Актуальность** проведенных в диссертации исследований не вызывает сомнений. Достигнутые результаты являются значимым шагом в развитии технологии ТОТЭ в РФ. Подтверждением актуальности работы является ее поддержка Российским фондом фундаментальных исследований и Фондом содействия инновациям.

### **Общая характеристика работы**

Работа состоит из Введения, трех Глав, Заключения, Списка сокращений и условных обозначений, а также Списка литературы. Во Введении обоснована актуальность проведенных исследований, обозначены цели и задачи работы, описана научная и практическая значимость полученных результатов, перечислены положения, выносимые на защиту. Также во Введении указан личный вклад автора, достоверность полученных результатов, апробация и публикации, подготовленные за время работы над Диссертацией.

**Первая глава** посвящена краткому литературному обзору по теме Диссертации. Подробно рассмотрен принцип работы ТОТЭ, особенности ТОТЭ разной геометрии и типа конструкции. Обозначены преимущества и недостатки ТОТЭ анод-поддерживающей конструкции. Также, в этой главе приведено описание методов формирования функциональных слоев ТОТЭ, использованных диссертантом в процессе выполнения работы.

**Во Второй главе** представлены методики изготовления образцов и описаны основные методы исследования. Подробно изложено обоснование выбора композитного материала анодных подложек. Детально описаны методы исследования структуры, механических и электрохимических характеристик ТОТЭ.

**В Третьей главе** представлены основные результаты, полученные в ходе проведения работы. В первом разделе подробно освещаются все этапы технологии изготовления анодных подложек: подготовка композитного материала и суспензии для литья, температурный режим спекания и непосредственно сама процедура спекания. Во втором и третьем разделе третьей главы приводится описание процедур изготовления тонкопленочного электролита и катода на спеченной анодной подложке. Завершающий раздел посвящен аттестации электрохимических характеристик ТОТЭ, изготовленных на основе анодных подложек размером 100x100 мм.

**В Заключение** диссертантом сформулированы основные выводы по проведенной работе.

**Научная новизна результатов.** В работе предложен новый способ оптимизации микроструктуры анодных подложек, позволяющий сохранить их механическую стабильность в процессе работы ТОТЭ. Разработана технология изготовления анодных подложек, которая позволяет получать прочные бездефектные спеченные керамические пластины. В ходе диссертационной работы установлено, что использование соли сульфат никеля в качестве прекурсора, вместо оксида никеля, позволяет повысить механическую стабильность никель-керметных материалов. Также, в работе предложен новый способ предотвращения изгибовых деформаций анодных подложек, возникающих во время их обжига, заключающийся в использовании плоских пластин-пригрузов в процессе спекания.

В результате работы диссертанта была разработана технология изготовления анодных подложек планарной геометрии размером 100x100 мм. Созданная технология позволяет организовать серийное производство анодных подложек на производственной базе АО «НЭВЗ-Керамикс», что обуславливает **практическую значимость** работы, а также высокую вероятность практического внедрения полученных результатов.

**Авторский вклад** состоит в проведении экспериментов по оптимизации микроструктуры, подбора режима отжига анодных подложек,

проведении механических и электрохимических испытаний, а также в анализе полученных данных и оформлении публикаций.

Научные результаты, полученные в диссертации, являются **достоверными и обоснованными**. Материал в Диссертации изложен ясно, последовательно. Основные результаты опубликованы в 3 статьях, оформлен патент. Автореферат полностью передает содержание Диссертации.

При ознакомлении с работой возникли следующие вопросы и замечания:

1. В работе, при подготовке суспензии для формирования токосъемного слоя анодной подложки, использовались связующий материал ПВБ, пластификатор ПЭГ-2000, порообразователь Крахмал и другие органические компоненты. В тоже время, есть множество работ, где ПВБ и ПЭГ также применяются в качестве порообразователей при изготовлении керамических материалов. Возможно ли было достижение нужной микроструктуры токосъемного анодного слоя без использования Крахмала, например, путем увеличения процентного содержания органических добавок ПВБ и/или ПЭГ?
2. Для формирования желаемой морфологии анода автор использует различные порообразователи – рисовый крахмал, активированный уголь и продукты их измельчения. В диссертации, однако, нет информации о размере исходных и измельченных частиц порообразователя. Как соотносятся размер частиц порообразователя и размер пор анода? На каком основании доля порообразователя во всех образцах анода выбрана 10 масс. %?
3. Почему в качестве соли никеля, разложение которой приводит к получению мелкодисперсного оксида никеля, выбран сульфат? Например, можно было использовать водорастворимую соль ацетат никеля, при разложении которой не выделяется агрессивный газ.

4. По литературным данным известно, что на импедансных спектрах ТОТЭ с несущим электродом может присутствовать отклик не менее 4-х стадий электродной реакции. Чем обосновывается выбор эквивалентной схемы для анализа импедансных зависимостей исследуемых ячеек? Позволяет ли выбранная эквивалентная схема, содержащая два R-CPE контура, корректно проанализировать многостадийный процесс электродной реакции?

5. В разделе 3.3 представлен анализ импедансных спектров единичных анод-поддерживающих ТОТЭ. Однако ничего не сказано о влиянии зернограничного сопротивления электродных слоев на протекание электрохимических процессов в изготовленных топливных элементах. В частности, возникает вопрос, как коррелирует удельная мощность топливных элементов с сопротивлением границ зерен в токосъемном и функциональном слоях анода?

6. В Диссертационной работе разработана и запатентована технология изготовления двухслойных анодных подложек для планарных ТОТЭ второго поколения размером 100x100 мм на промышленном оборудовании компании АО «НЭВЗ Керамикс». Какие препятствия автор видит на пути изготовления и испытаний сборок ТОТЭ на основе этих анодных подложек?

7. В диссертации отсутствуют данные по долговременным и циклическим (в режиме нагрев-охлаждение) испытаниям изготовленных топливных элементов.

Данные замечания не снижают общей высокой оценки работы. Диссертационная работа Агарковой Екатерины Алексеевны «Многослойные Ni-керметные аноды с тонкопленочными электролитами для высокоэффективных твердооксидных топливных элементов» является

