

5 - Электрофизика, электрофизические установки. Физика плазмы, плазменные технологии

Андронов Артем Андреевич, аспирант, инженер
Томск, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, ФЭТ
Синтез диэлектрических покрытий на основе циркониевой керамики с помощью форвакуумного плазменного источника электронов
Юшков Юрий Георгиевич, д.т.н.
e-mail: artem.andronov.98@bk.ru стр. 83

Андронов Артем Андреевич, аспирант, инженер
Томск, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, электронной техники
Электронно-лучевой синтез термобарьерных покрытий на основе керамики в форвакуумной области давлений
Юшков Юрий Георгиевич, д.т.н.
e-mail: artem.andronov.98@bk.ru стр. 82

Горьковская Диана Андреевна, 4 курс
Томск, Томский государственный университет, физический
Автоэлектронная эмиссия с шероховатой поверхности
Семенюк Наталья Степановна, к.ф.-м.н.
e-mail: diana191@inbox.ru стр. 85

Долгова Анна Викторовна, магистрант 1 года обучения
Томск, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, электронной техники
О механизмах перераспределения титана в объеме ZrO_2 – Ti композита при электронно-лучевом спекании
Климов Александр Сергеевич, д.т.н.
e-mail: annedolgova@yandex.ru стр. 86

Кузнецова Анастасия Андреевна, 4 курс
Томск, Томский политехнический университет, инженерная школа ядерных технологий
Плазмохимического синтез оксидных композиций для уран ториевого толерантного ядерного топлива для высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов
Каренгин Александр Григорьевич, к.ф.-м.н.
e-mail: aak264@tpu.ru стр. 87

Параскун Александр Григорьевич, 3 курс
Новосибирск, Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, физический
Изготовление трансформатора Тесла на основе фундаментальных физических законов и уравнений Кирхгофа
Пальчиков Евгений Иванович, д.т.н.
e-mail: a.paraskun@g.nsu.ru стр. 89

Фролова Валерия Петровна, н.с.
Томск, Институт сильноточной электроники СО РАН
Магнетрон с нагреваемой в разряде мишенью для формирования многокомпонентных покрытий на основе бора
Юшков Георгий Юрьевич, д.т.н.
e-mail: Frolova_Valeria_90@mail.ru стр. 90

Щербина Данил Сергеевич, 4 курс
Томск, Томский политехнический университет, инженерная школа ядерных технологий
Исследование плазмохимического процесса синтеза топливных оксидных композиций из водно-органических нитратных растворов урана, плутония и магния
Александр Григорьевич Каренгин, к.ф.-м.н.
e-mail: dss44@tpu.ru стр. 92

Электронно-лучевой синтез термобарьерных покрытий на основе керамики в форвакуумной области давлений

Андронов Артем Андреевич

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

Юшков Юрий Георгиевич д.т.н.

artem.andronov.98@bk.ru

Жаропрочные сплавы на основе разных материалов широко используются в ракетной, космической и авиационной технике, главным образом в качестве материалов для горячих секций газовых турбин, таких как камера сгорания, а также турбинные лопатки. Наиболее эффективным способом повышения КПД газовой турбины является повышение температуры газа на входе в турбину. Допустимая температура для надежной и продолжительной работы стационарных турбин значительной мощности составляет 1000-1100°C, и она имеет тенденцию к неуклонному повышению [1]. Повышенные рабочие температуры вызывают быстрое окисление поверхности лопаток. Это порождает проблему защиты критически важных деталей от окисления и коррозии путем нанесения защитных покрытий на их поверхности. Необходимость в таких покрытиях возникла в 1950-х годах при производстве авиационных двигателей, когда стало очевидно, что составы материалов, требуемые для повышения прочности при высоких температурах, несовместимы с составами, необходимыми для достижения оптимальной степени защиты от воздействия высокотемпературной агрессивной окружающей атмосферы. Среди многих требований, предъявляемых к высокотемпературным секциям турбин, выделяются устойчивость к абразивному износу, коррозии, а также соответствующий уровень механических свойств. Анализ лучших отечественных и зарубежных покрытий показывает, что пока не существует материала, который мог бы гарантировать надежную работу лопастей турбин в течение длительного времени при высоких нагрузках и температурах. По этой причине продолжается постоянный поиск новых составов покрытий, устойчивых к длительному высокотемпературному окислению и сульфидно-ванадиевой коррозии. Следует отметить, что в промышленно развитых странах высокий приоритет отдается разработке новых материалов для нанесения покрытий и методов их нанесения. Основными материалами для нанесения таких покрытий служат высокотемпературные керамики на основе оксида алюминия (Al_2O_3) и циркония (ZrO_2). Современные способы нанесения таких покрытий обеспечивают приемлемое качество покрытий, однако существуют проблемы с получением покрытий толщинами больше 10 мкм и скоростями их нанесения. Одним из альтернативных методов получения покрытий с нужными характеристиками является метод электронно-лучевого синтеза таких покрытий [2].

Эксперименты проводились на стенде, оснащенном форвакуумным плазменным источником электронов на основе эмиссии электронов из плазмы тлеющего разряда, функционирующего в непрерывном режиме в диапазоне давлений 1–100 Па [3].

Нанесение керамических покрытий проходило следующим образом. Сначала электронный пучок при давлении 5 Па нагревал мишень из алюмооксидной керамики в течение 5 мин. Затем с помощью магнитной фокусирующей системы пучок фокусировался и нацеливался на образец из фрагмента керамики, обеспечивая, таким образом, испарение образца, пары испаренного материала осаждались на подложки и формировали тем самым покрытие на основе керамики. Такая же процедура проводилась с образцом из оксида циркония ZrO_2 .

Далее для определения тепловой стойкости оба образца подвергались нагреву. Температура поверхности образца с покрытием контролировалась оптическим пирометром Raytek серии Marathon MM. На рисунке 1 приведен график, показывающий результаты этого эксперимента.

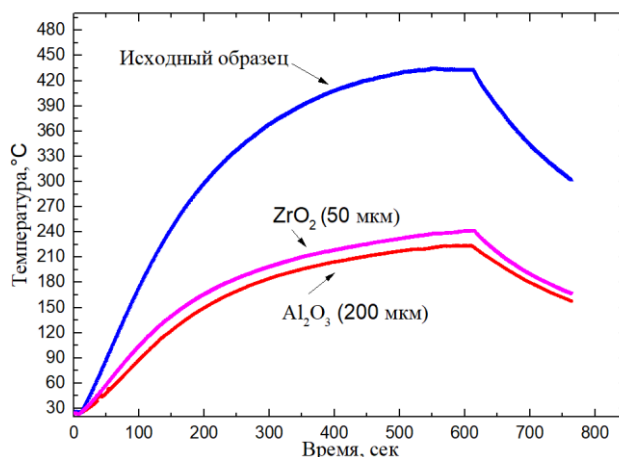


рис. 1 – зависимость температуры нагрева от времени

На рисунке 1 представлены 3 кривые, соответствующие трем различным образцам. Как видно, при одинаковом времени нагрева (615 с) температура исходного покрытия достигает 450 °С, в то время как для образца с покрытием на основе алюмооксидной керамики, толщина которого 200 мкм, температура не превышает и 250 °С. Температура для образца с покрытием на основе циркониевой керамики так же лежит в районе 230 °С, однако стоит заметить, что толщина покрытия в этом случае порядка 50 мкм. Такая разница в температурах образцов с покрытиями на основе различных керамик обусловлена, тем, что теплопроводность диоксида циркония очень низкая (2,9 Вт/м·К), в отличие от оксида алюминия (30 Вт/м·К) [4]. Также полученное покрытие на основе циркониевой керамики обладает тетрагональной фазой. Выяснено, что покрытие претерпевает трансформацию из моноклинной в тетрагональную структуру, начиная с температуры 1170 °С, сопровождающуюся изменениями объема, которые могут привести к отколу керамики [5]. Такие изменения могут быть исключены добавками оксида иттрия, который снижают температуру превращения до комнатной температуры и стабилизируют тетрагональную фазу.

Работа поддержана Российским научным фондом, грант № 21-79-10035, <https://rscf.ru/project/21-79-10035/>

Список публикаций:

- [1] G. Kostyuk and V. V. Frolov (eds.), *Steam and Gas Turbines [in Russian]*, Énergoatomizdat, Moscow (1985).
- [2] On the effect of ceramic target composition on coatings deposited by electron-beam evaporation at forevacuum pressure / Y. G. Yushkov, E. M. Oks, A. V. Tyunkov [et al.] // . – 2020. – Vol. 46, No. 17. – P. 27641-27646. – DOI 10.1016/j.ceramint.2020.07.259.
- [3] Different stages of electron-beam evaporation of ceramic target in medium vacuum / Y. G. Yushkov, D. B. Zolotukhin, E. M. Oks, A. V. Tyunkov // . – 2020. – Vol. 127, No. 11. – P. 113303. – DOI 10.1063/1.5142420.
- [4] Electron-beam deposition of heat-conducting ceramic coatings in the forevacuum pressure range / Y. G. Yushkov, E. M. Oks, A. V. Tyunkov [et al.] // *Ceramics International*. – 2020. – Vol. 46, No. 13. – P. 21190-21195. – DOI 10.1016/j.ceramint.2020.05.197.
- [5] J. H. Wood and E. H. Goldman, "Protective coatings," in: *Superalloys. II. Heat Resistant Materials for Aerospace and Industrial Equipment [Russian translation]*, Metallurgiya, Moscow (1995), Vol. 2, pp. 88-116.

Синтез диэлектрических покрытий на основе циркониевой керамики с помощью форвакуумного плазменного источника электронов

Андронов Артем Андреевич

Тюньков Андрей Владимирович

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

Юшков Юрий Георгиевич, д.т.н.

artem.andronov.98@bk.ru

Керамические покрытия используются в различных областях применения благодаря улучшению механических и физических свойств материалов и производимых узлов. Изготовление покрытий часто включает в себя различные процессы, такие как физическое осаждение из паровой фазы (PVD), химическое осаждение из паровой фазы (CVD), золь-гель осаждение или лазерные процессы. Эти процессы приводят к получению покрытий с требуемыми механическими и физическими свойствами. Основными недостатками этих процессов являются низкая скорость нанесения и высокая стоимость процесса [1]. Альтернативным способом нанесения керамических покрытий является метод электронно-лучевого испарения керамики с использованием форвакуумного плазменного источника электронов. Формирование электронного пучка форвакуумным плазменным источником при давлениях 5–20 Па обеспечивает образование в области транспортировки пучка плотной плазмы концентрацией 10^{10} – 10^{11} см⁻³. Ионы, генерируемые при прохождении электронного пучка в пространстве дрейфа вакуумной камеры, создают условия для компенсации отрицательного заряда изолированной мишени и открывают возможность непосредственной электронно-лучевой обработки непроводящих диэлектриков без создания специальных условий для нейтрализации заряда ее поверхности.

Эксперименты по электронно-лучевому нанесению керамических покрытий проводились с использованием форвакуумного плазменного источника электронов на основе разряда с полым катодом, функционирующего в непрерывном режиме (Рис. 1) [2].

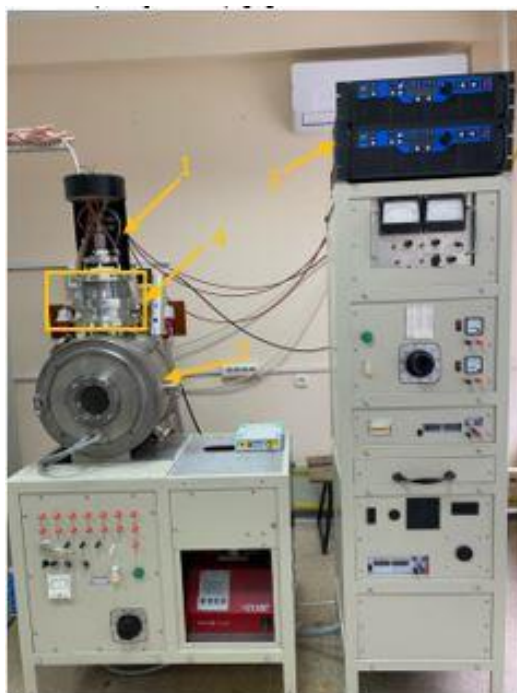


рис. 1 – фотография экспериментальной установки: 1 - источник электронов, 2 - вакуумная камера, 3 - блоки питания, 4 - система фокусировки и система отклонения пучка.

В таблице 1 показаны основные параметры проделанных экспериментов, а также их особые условия.

Таблица 1 – Основные параметры экспериментов

Образец	Параметры пучка	Время	Особые условия
1	$I=200$ мА, $U=10$ кВ	15 минут	Нет
2	$I=200$ мА, $U=10$ кВ	15 минут	Предварительный нагрев до 700°C в течении 10 минут
3	$I=200$ мА, $U=10$ кВ	15 минут	Постоянное смещение $U=1$ кВ

В первом исследовании на образец не оказывалось дополнительных воздействий. Рабочее давление в камере составляло 5 Па. Керамическая мишень помещалась в танталовый тигель. В процессе нагревания электронным пучком мощностью в пределах 1 кВт (ток пучка до 100 мА, ускоряющее напряжение до 10 кВ) керамической мишени вблизи нее образуется плазма, содержащая наряду с ионами газовой атмосферы ионы испаряемого материала. Для испарения электронный пучок фокусировался до диаметра 4 мм на керамическую мишень. После равномерного прогрева начинался процесс испарения керамики тем же способом, но мощность электронного пучка составляла в пределах 2 кВт (ток пучка не более 200 мА, ускоряющее напряжение не более 10 кВ). Результаты растровой электронной микроскопии (РЭМ) (рисунок 2а) показывают, что покрытие имеет кристаллическую структуру. Размер граней кристаллов составляет от 0,6 до 1 мкм. Белые пятна обусловлены скоплением заряда на поверхности керамического покрытия.

Во втором исследовании образец из нержавеющей стали предварительно нагревали электронным пучком до температуры 700°C в течении 10 минут при давлении 5 Па. Видно, что покрытие имеет достаточно однородную поверхность без существенных дефектов, их отсутствие связано с высокой миграционной способностью адсорбционных атомов, при значительных температурах подложки (рисунок 2б).

Условия следующего эксперимента отличались тем, что на подложку подавался постоянный потенциал с величиной $U=1$ кВ с отдельного блока питания. Исследование морфологии поверхности осажденного покрытия показало, что поверхность представляет собой структуру из зерен размерами от 0,6 до 1,2 микронметров (рисунок 2в).

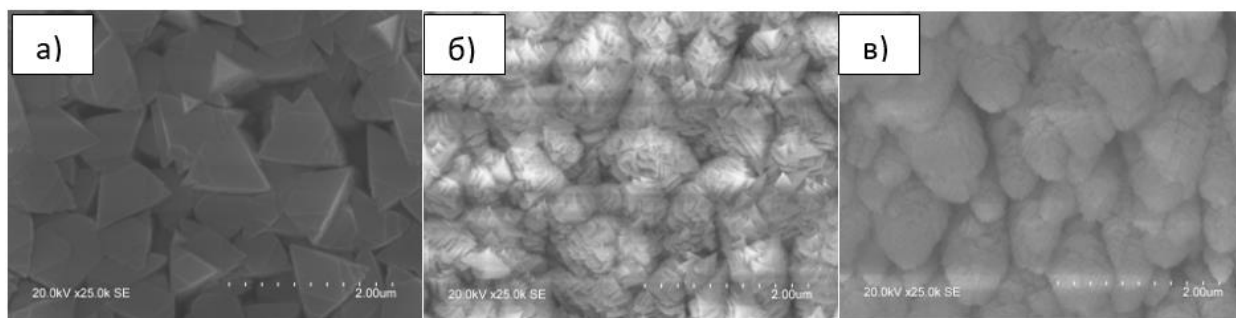


рис.2 – результаты растровой электронной микроскопии: а) образец №1, б) образец №2, в) образец №3.

Результаты проведенных исследований показали возможность нанесения покрытий из циркониевой керамики форвакуумным электронным источником. Так же проанализирована морфология и состав полученных покрытий при трех разных условиях. Обнаружено, что при изменении условий меняется процентное соотношение основных элементов покрытия, а также его структура. Дальнейшие исследования будут направлены на измерение микротвердости, толщины покрытия, шероховатости.

Работа поддержана грантом Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках конкурса FEWM-2021-0013.

Список публикаций:

- [1] Holger Kassner, Roberto Siegert, Dag Hathiramani, Robert Vassen & Detlev Stoeber., *Application of Suspension Plasma Spraying (SPS) for Manufacture of Ceramic Coatings*, *Journal of Thermal Spray Technology* volume 2008, № 17, pages 115–123.
 [2] Бурдовищин В.А., Окс Е.М., Скробов Е.В., Юшков Ю.Г. Модификация поверхности керамики импульсным электронным пучком, генерируемым форвакуумным плазменным источником. *Перспективные материалы*. 2011. № 6. С. 77-82.

Автоэлектронная эмиссия с шероховатой поверхности

Горьковская Диана Андреевна

Семенюк Наталья Степановна, Козырев Андрей Владимирович

Томский государственный университет

Семенюк Наталья Степановна, к.ф.-м.н.

diana191@inbox.ru

Опыт работы с высоковольтными вакуумными приборами еще на заре разработки и создания первых электронных ламп, электронных микроскопов, ускорителей электронов позволил обнаружить интересное явление, которое получило название автоэлектронной эмиссии. Данное явление заключается в испускании электронов поверхностью тел при наличии у границы тела сильного внешнего электрического поля порядка 10^5 В/см. Актуальной задачей современной электроники является создание стабильных автоэмиссионных катодов, которые способны работать продолжительное время в условиях технического вакуума.

Данная работа посвящена теоретическому исследованию автоэмиссионных свойств катодов, изготовленных из искусственных углеродных материалов. Основным свойством является то, что графит представляет собой тонкие углеродные трубочки, с которых идет эмиссия тока и такая структура характеризуется высоким коэффициентом усиления электрического поля при низких напряженностях полей. Коэффициент усиления μ меняется от точки к точке случайным образом, поэтому удобно ввести плотность распределения вероятности, которая выражает относительную вероятность, что произвольно выбранный малый элемент поверхности имеет коэффициент усиления, лежащий в пределах от $\mu + d\mu$ [1]. Нами была введена функция распределения для графитового катода, которая представляет собой нормальное распределение Гаусса (рис.1): $f(\mu) \propto \exp(-(\mu - \mu_1)^2 / \beta^2)$, где μ_1 - максимум плотности распределения и β - дисперсия или ширина распределения. Следующим шагом было исследовано влияние данной функции распределения на плотность автоэмиссионного тока. Подобный метод расчета автоэмиссионного тока был реализован в работе [2]. По полученным результатам были построены зависимости плотности автоэмиссионного тока (j) от напряженности электрического поля (E), при варьировании параметров функции распределения (рис.2). Результаты расчетов были сопоставлены с эмиссионными характеристиками графитового катода, полученными в эксперименте [3].

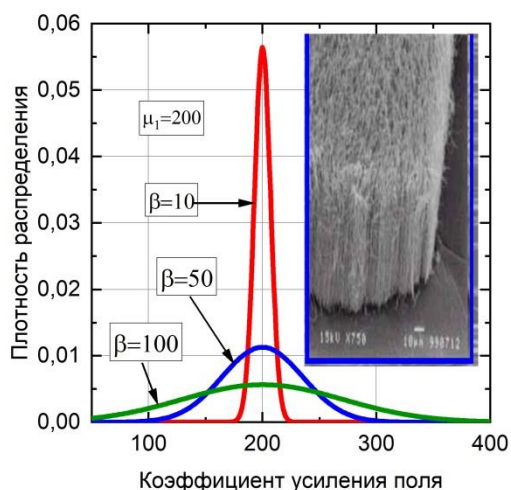


рис.1. Плотность распределения для графитового катода

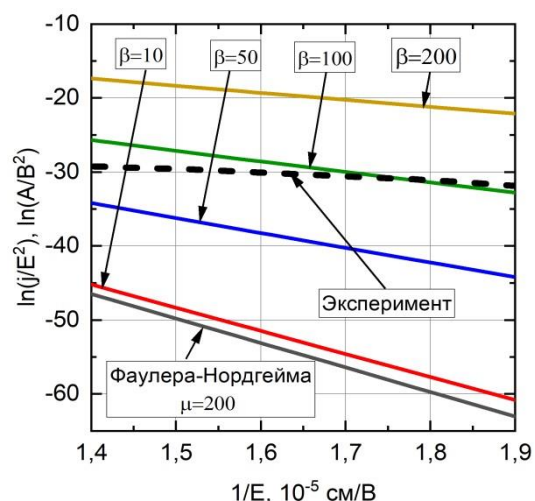


рис.2. Вольт-амперная характеристика в координатах Фаулера-Нордгейма

Предложенный подход позволяет учитывать неоднородную структуру катодной поверхности и достоверно описывать процесс автоэлектронной эмиссии. Графически было представлено, что данный подход согласуется с экспериментальными данными при следующих параметрах распределения: $\mu_1=200$, $\beta=100$.

Список публикаций:

- [1] Козырев А.В., Королев Ю.Д., Месяц Г.А. Автоэмиссионные процессы и переход от тлеющего разряда к дуговому // Журн. тех. физ. – 1987. – Т.57, В.1. – С.58-64.
- [2] N. M. Zubarev et al., "Mechanism and dynamics of picosecond radial breakdown of a gas-filled coaxial line," *Plasma Sources Science and Technology*, vol. 29, no. 12, p. 125008, Dec. 2020, doi: 10.1088/1361-6595/abc414.
- [3] Чепусов А.С. Свойства автоэмиссионных катодов из углеродных материалов в условиях технического вакуума: дис. ...канд. тех. наук: 01.04.13; утв. 13.06.18 / Чепусов Александр Сергеевич – Екатеринбург, 2018. -133 с.

О механизмах перераспределения титана в объеме $ZrO_2 - Ti$ композита при электронно-лучевом спекании

Долгова Анна Викторовна

Зенин Алексей Александрович

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

Климов Александр Сергеевич, д.т.н.

annedolgova@yandex.ru

Одним из развивающихся методов получения композитной керамики является электронно-лучевое спекание в форвакуумной области давлений [1]. Узкосфокусированный электронный пучок с энергией электронов 10-20 кэВ позволяет прогревать поверхность керамики до температур спекания за короткое время – не более 30 минут.

В работе [2] было выявлено, что при электронно-лучевом спекании керамических порошков с металлическими включениями распределение металлического компонента в объеме спекаемого композита изменяется в процессе спекания. Так при облучении алюмооксидной керамики с содержанием 20% (масс.) титана на поверхности спеченного образца формируется тонкий слой титана. Цель настоящего исследования – обзор механизмов, влияющих на распределение содержания титана в объеме спекаемого композита из $ZrO_2 - Ti$.

На основе анализа литературных данных были предложены два механизма уменьшения содержания металла в приповерхностном слое с облучаемой стороны композита: полевая миграция и капиллярные эффекты. При облучении пучком электронов с энергией E_0 в диэлектрике образуется объёмный отрицательный заряд вблизи поверхности. Эта область распространяется на глубину пробега электронов. Возникающее электрическое поле вызывает полевую миграцию ионов титана Ti^{+} в область объёмного отрицательного заряда. Мигрировавшие ионы выходят на поверхность и восстанавливаются электронами пучка с тепловыми энергиями с образованием поверхностной пленки Ti (рис. 1а). Образованная пленка испаряется с поверхности композита в

процессе электронно-лучевого облучения. Таким образом, в готовой структуре наблюдается уменьшение содержания титана в приповерхностном слое с облучаемой стороны.

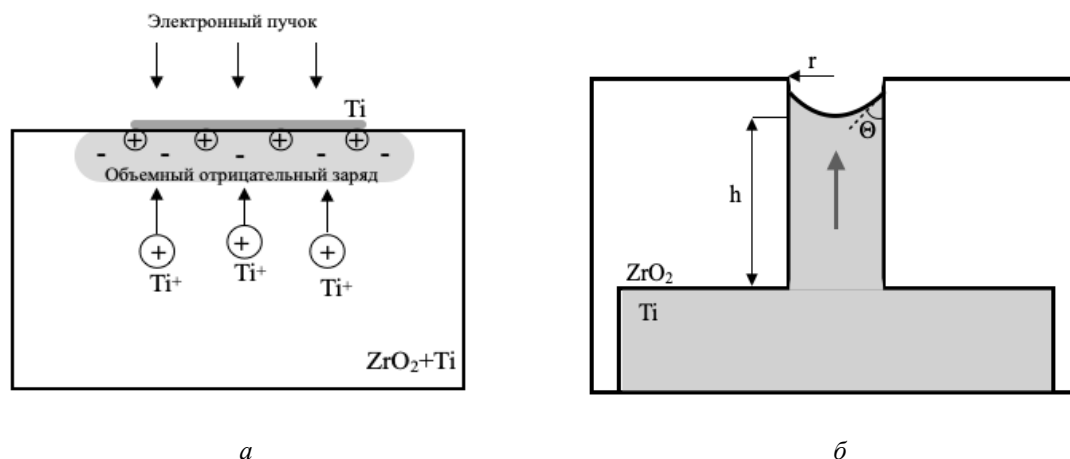


рис.1. Полевой (а) и капиллярный (б) механизмы перераспределения титана в объеме композита

Керамический образец содержит большое количество пор и при спекании образуется капиллярная структура, заполненная расплавленным титаном. Расплав смачивает стенки капилляра, образуется вогнутый мениск (рис. 1б). Под вогнутым мениском давление меньше, чем под плоской поверхностью. Поэтому расплав в капилляре поднимается до тех пор, пока гидростатическое давление поднятого в капилляре расплава на уровне плоской поверхности не скомпенсирует разность давлений. Уровень поднятия расплава можно определить по формуле Жюрена:

$$h = \frac{2\sigma \cos\theta}{\rho_{Ti} g r}, \quad (1)$$

где σ – поверхностное натяжение титана; $\cos\theta$ – смачиваемость; ρ_{Ti} – плотность титана; g – ускорение свободного падения; r – радиус капилляра.

В момент расплавления титана, при температуре 1941 К, поверхностное натяжение имеет максимальное значение. При условии полного смачивания расплав поднимается на всю толщину образца (рассчитанные значения h при температуре 1994 К ($\sigma = 1330$ мДж/м²) превышают 1 см для различных значений радиуса капилляра) и на поверхности титан испаряется. С ростом температуры почти линейно уменьшается поверхностное натяжение и уменьшается плотность титана. Таким образом, по мере нагрева образца уровень поднятия жидкости уменьшается и титан остается в нижней (необлучаемой) части образца. Кроме того, в процессе спекания происходит уменьшение пористости и капилляры зарастают, что делает невозможным выход титана из образца.

В результате проведенного исследования выявлены две возможные причины уменьшения содержания титана в приповерхностном слое керамики в процессе спекания электронным лучом: полевая миграция и капиллярные эффекты. Для определения вклада этих явлений необходимы дальнейшие исследования.

Работа выполнена при поддержке Министерства высшего образования и науки, FEWM-2021-0013

Список публикаций:

- [1] Burdovitsin V.A, Klimov A.S, Oks E.M. // *Technical Physics Letters*. 2009. V. 35. I. 6. pp. 511–513.
 [2] Климов А.С., Зенин А.А., Бакеев И.Ю., Окс Е.М. // *Известия вузов. Физика*. 2019. Т. 62. № 7(739). С.25-30

Плазмохимический синтез оксидных композиций для уран ториевого толерантного ядерного топлива для высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов

Кузнецова Анастасия Андреевна

Национальный исследовательский Томский политехнический университет

Каренгин Александр Григорьевич, к.ф.-м.н.

aak264@tpu.ru

«Толерантное» топливо – ядерное топливо устойчивое к аварийным ситуациям на атомных электростанциях, способное сохранять целостность даже при потере теплоносителя. Такое топливо, обладает повышенной теплопроводностью, более низкой теплоемкостью, высокой жаростойкостью и ураноемкостью.

Такие свойства достигаются за счет модификации оболочки ТВЭЛов или матрицы дисперсионного ядерного топлива (ДЯТ).

Плазмохимический метод получения высокодисперсных порошков оксидных композиций может составить серьезную конкуренцию существующим методам, так как имеет ряд преимуществ, таких как: одностадийность, однородное распределение фаз, возможность влиять на морфологию частиц, компактность технологического оборудования и низкие энергозатраты.

Исследование процесса плазмохимического синтеза оксидных композиций проводилось с использованием лицензионной программы «ТЕРРА» для определения оптимального состава растворов водно-органических нитратных растворов (ВОНР), обеспечивающего их энергоэффективную плазменную обработку. В данной работе представлены результаты теоретических исследований процесса плазмохимического синтеза оксидных композиций из растворов ВОНР, включающих органический компонент (ацетон), водные растворы нитратов делящихся (уран, торий) и матричных металлов (магний, алюминий). Матричные материалы выбраны с учетом удовлетворения критериям: высокой теплопроводности, низкого сечения захвата тепловых нейтронов, отсутствия взаимодействия с ураном, относительной простоты производства и прочности сплавов, более подробно [1].

Для обеспечения энергоэффективной плазменной переработки в воздушно-плазменном потоке используются растворы, имеющие адиабатическую температуру горения $T_{ад} = 1500-1600$ К, подробнее [2]. Одним из не менее важных параметров в процессе плазменной переработки является массовая доля воздуха, активно влияющая на состав получаемой топливной композиции при коэффициенте отношении делящегося компонента к неделяющемуся $\alpha=0.5$ (рис.1).

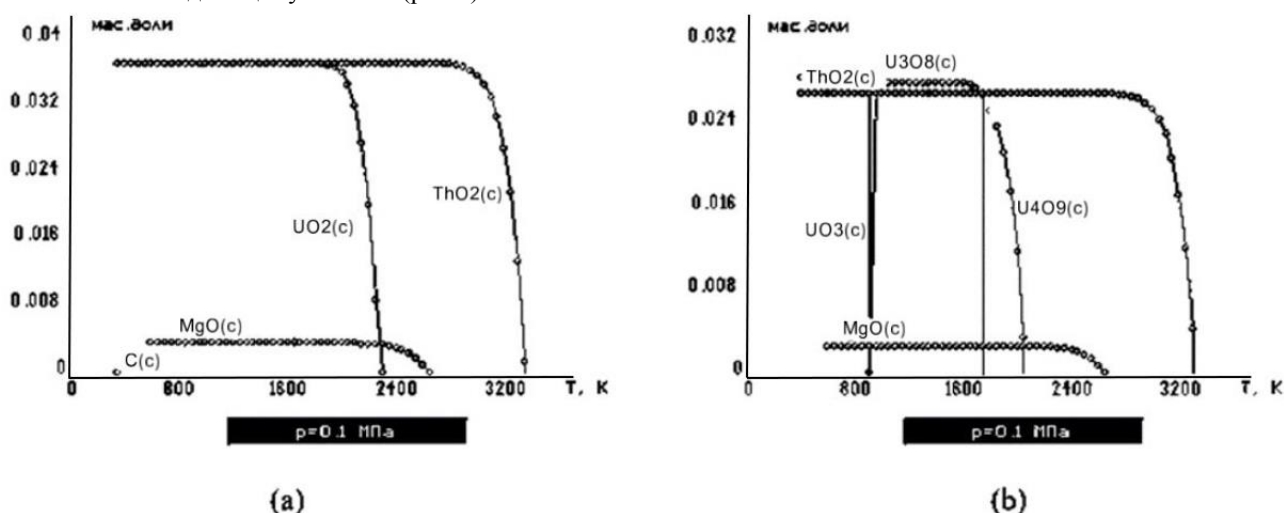


рис.1. Зависимость состава основных продуктов от температуры после плазменной обработки, при параметрах $\alpha=0.5$, массовой доле воздуха 57 % (а) и 59 % (б) и MgO 5 %

В ходе исследования получены 8 составов ВОНР при $\alpha = 0.5 - 0.8$, содержании оксидной матрицы MgO и Al_2O_3 (5%) и содержании воздуха (55 и 57%), обеспечивающих наиболее энергоэффективную обработку.

Полученные результаты могут быть использованы при создании технологии плазмохимического синтеза топливных оксидных композиций ДЯТ для высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов.

Список публикаций:

[1] Kleykamp H. // J. Nucl. Mater. 1999. V. 275. No 1–2. P. 1.

[2] Karegin, A. A. Karegin, I. Yu. Novoselov. e.a. // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 1989. P. 1–5.

Изготовление трансформатора Тесла на основе фундаментальных физических законов и уравнений Кирхгофа

Параскун Александр Григорьевич

Новосибирский государственный университет

Пальчиков Евгений Иванович, д.т.н.

a.paraskun@ngsu.ru

Для решения научных и технических задач, бывает необходимо иметь импульсные источники напряжений порядка мегавольта. Во многих случаях, в качестве таких источников используются трансформаторы Тесла. Например, трансформатор Тесла лежит в основе импульсных рентгеновских аппаратов, разрабатываемых в ИГиЛ СО РАН [1] для исследования взрывных и быстротекущих процессов и промышленных ускорителей ИЯФ СО РАН [2] для обработки материалов. Как правило, любители при создании трансформаторов Тесла используют эмпирические формулы и калькуляторы, распространенные в интернете. Однако давно существуют работы, в которых приводятся подробные теоретические модели трансформатора Тесла [2, 3]. С другой стороны, трансформатором Тесла многие называют одиночный колебательный контур, возбуждаемый электронной схемой в резонанс с положительной обратной связью. Хотя это устройство некоторые называют «качером Бровина», Тесла запатентовал такое устройство сто с лишним лет назад [4].

Целью данной работы являлось проектирование и изготовление большого классического трансформатора Тесла с выходным напряжением 10^6 В, состоящего из двух связанных настроенных в резонанс контуров с ударным возбуждением на основе фундаментальных теоретических моделей и экспериментальных измерений, полученных в процессе изготовления. Достижение оптимальных параметров по передаче энергии между контурами, доработка конфигурации электрических и магнитных полей устройства для увеличения КПД устройства. Трансформатор необходим для проведения физических опытов в лаборатории демонстраций и компьютерного сопровождении (ЛДКС) физического факультета НГУ.

Принципиальная схема разработанного устройства приведена на рис. 1. Наиболее сложным этапом создания трансформатора Тесла является вторичный контур, который в нашем случае состоит из 784 метров медного провода с диаметром 0,75 мм, намотанного на пластиковую трубу диаметром 200 мм, высотой 1 метр и покрытого слоем эпоксидной смолы. Таким образом, первым этапом создания трансформатора было изготовление вторичного контура. Далее, для расчета параметров всего трансформатора, были использованы фундаментальные физические законы, в частности – уравнения Кирхгофа для связанных контуров с начальными и граничными условиями и модели, предложенные в работах [2, 3].

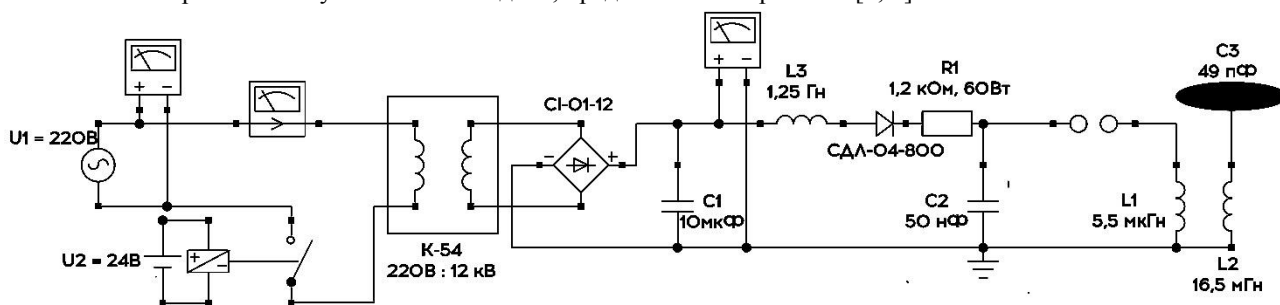


рис. 1 Принципиальная схема трансформатора Тесла

Измеренная резонансная частота вторичного контура в случае четвертьволнового резонанса с проводящей полуплоскостью и замкнутым тороидом составила 221 кГц, с добротностью 64,8. Емкость вторичного контура C_3 сосредоточена в межвитковой емкости катушки, которая равняется 16,8 пФ, при индуктивности 16,5 мГн, а также в емкости замкнутого тороида, равной 32 пФ.

Емкость первичного контура равняется $C_2 = 0,05$ мкФ. Рабочее напряжение конденсаторов – 25 кВ. В результате вычислений расчетная максимальная индуктивность первичного контура составила $L_1 = 5,5$ мГн, подобранная таким образом, чтобы оба контура работали в резонанс. Изготовленная индуктивность первичного контура состоит из 9 витков медной трубы диаметром от 290 до 600 мм с возможностью подсоединения гибкого отвода в любом месте. С тороидом резонанс наблюдается на 5 витках. Для согласования с сетью 220В, устранения пульсаций 50 Гц, передача энергии происходит через большую буферную емкость $C_1 = 10$ мкФ. Процесс передачи энергии из буферной ёмкости в первичную ёмкость C_2 производится практически без потерь – через индуктивный буферный дроссель L_3 (индуктивностью 1,25 Гн) с диодным удвоением напряжения с 12 кВ до 24 кВ. В момент разрядки C_2 сопротивление R_1 разделяет первичный контур и схему зарядки, и гасит искру в разряднике. Частота пробоя разрядника управляется с помощью механической системы.

Электрическая прочность по скользящему поверхностному разряду на границе раздела диэлектрик – воздух составляет около 1 кВ/мм. Так как длина вторичной катушки равняется 1 метру, то при напряжении, превосходящем значение 1 МВ, могут наблюдаться скользящие разряды вдоль колонны, что устанавливает верхнюю границу на выходное напряжение трансформатора, и определяет напряжение зарядки первичного контура – 18 кВ.

В связанных колебательных контурах, колебания происходят с частотой $\omega_{\text{св.}}$, при этом их амплитуда меняется по гармоническому закону с частотой $\omega_{\text{б.}}$, с образованием биений. Один цикл таких колебаний составляет половину периода огибающей. В [2] приводится отношение, связывающее коэффициент связи k , а также отношение $\omega_{\text{св.}}/\omega_{\text{б.}}$ и количества полувольт колебаний n в течение одного периода биений.

А именно, существуют оптимальные коэффициенты связи $k = 2n/(n^2+1) = 0,6; 0,385; 0,28; 0,22, \dots$ при которых число полувольт в цикле нечетное, а в середине цикла биений максимум огибающей совпадает с максимумом полувольт. При этих условиях наблюдается максимально возможный КПД передачи энергии из первичного колебательного контура во вторичный.

Экспериментально измеренные осциллограммы биений в контурах показывают, что максимальная передача энергии с КПД не хуже 80% в нашем случае наблюдается на 7 полувольт колебаний при $k = 0,153$. При достижении напряжения 10^6 В и блоке питания мощностью 1 кВт максимальная частота импульсов составляет 50 Гц. Энергия искры 16 Дж. Мощность циркулирующей в аппарате энергии порядка 10 МВт, при разряде искрой на нагрузку ее значение составляет 100 – 1000 МВт.

Автор выражает благодарность Пальчикову Е.И. и Захарову С.А. за руководство и помощь в изготовлении устройства.

Список публикаций:

- [1] Пальчиков Е.И., Биченков Е.И. Приборы и некоторые методы импульсной рентгенографии быстропротекающих процессов. // Физика горения и взрыва. - 1997.- т.33, N3.- стр. 159-167.
- [2] Вассерман С.Б. Трансформатор Тесла в высоковольтных ускорителях заряженных частиц: Новосибирск. 1979 (Препр. / ИЯФ СО АН СССР № 77 - 110. 42 с.) http://irbiscorp.spsl.nsc.ru/fulltext/prepr/1977/p1977_110.pdf
- [3] Oberbeck A. Ueber den Verlauf der electrischen Schwingungen bei den Tesla'schen Versuchen. // Annalen der Physik und Chemie. 1895. V. 55.
- [4] Nikola Tesla. US Patent 645576 Nikola Tesla 1897 System of transmission of electrical energy

Магнетрон с нагреваемой в разряде мишенью для формирования многокомпонентных покрытий на основе бора

Фролова Валерия Петровна

Юшков Георгий Юрьевич

Институт сильноточной электроники СО РАН

Frolova Valeria 90@mail.ru

Магнетронное распыление [1] относится к плазменным методам формирования покрытий на поверхности. Покрытия из соединений бора, благодаря своим высоким функциональным свойствам, представляют интерес для ряда применений [2]. Однако, при нормальных условиях чистый (99,9 ат. %) бор обладает высоким удельным сопротивлением около 10 МОм×см [3]. Это не позволяет обеспечить устойчивое зажигание магнетронного разряда с катодом (распыляемой мишенью) из бора. Для решения проблемы формирования покрытий из бора был развит следующий подход. В магнетронном планарном распылителе термоизолированная мишень из бора предварительно нагревалась слаботочным высоковольтным разрядом [4]. Так как бор имеет отрицательный температурный коэффициент электрического сопротивления, то уже при нагреве мишени до 450 °С оно снижается до уровня 10 Ом×см и обеспечивается стабильное зажигание магнетронного разряда.

Конструкция планарного магнетрона с термоизолированной нагреваемой мишенью из кристаллического бора, используемого в экспериментах, представлена на рис. 1.

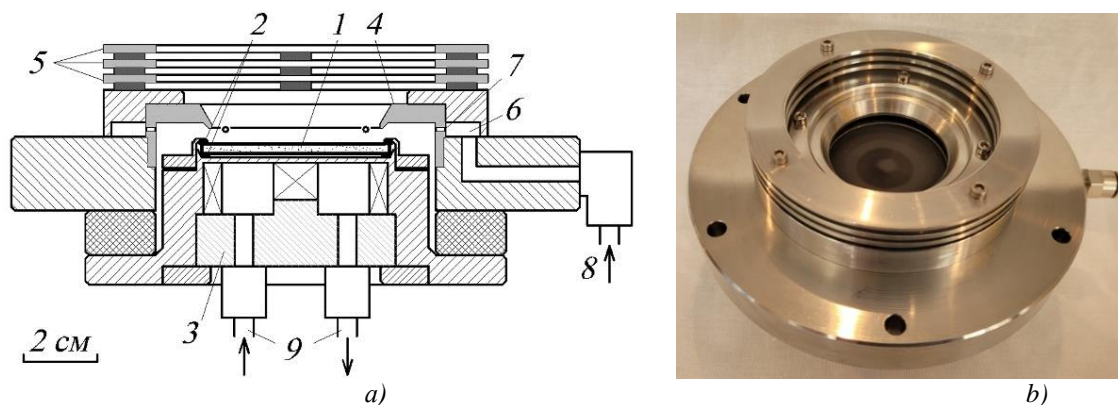


рис. 1. Принципиальная конструкция магнетрона с термоизолированной нагреваемой мишенью из бора (а) и его фотография (б): 1 мишень из бора; 2 термоизолирующие прокладки из графита; 3 магнитная система на постоянных магнитах; 4 анод; 5 анодные кольца; 6 газовая полость; 7 отверстия для перераспределения газа; 8 подача рабочего газа; 9 водяное охлаждение.

Термическая изоляция мишени диаметром 51 мм, толщиной 4 мм от охлаждаемой водой магнитной системы осуществлялась кольцевыми прокладками толщиной 1 мм из электропроводящей графитовой фольги [5]. Прокладки сохраняли эластичность при повышенной температуре, что позволило обеспечить надежную работу магнетрона в многократных циклах нагрева и охлаждения мишени. Образование покрытия из бора на аноде магнетрона при распылении мишени могло приводить к электрической изоляции его поверхности и погасанию разряда. Поэтому стандартный анод магнетрона был дополнен системой из плоских колец, разделенных щелями шириной 2 мм. На поверхности колец в щелях формирование покрытия бора происходило с меньшей интенсивностью и это позволило обеспечить стабильное функционирование разряда в течение десятков часов. Другой конструктивной особенностью анода магнетрона было наличие анодной полости с равномерно расположенными по её внутреннему диаметру отверстиями, обеспечивающими равномерное распределение потока рабочего газа (аргона) в область мишени. Это позволяло снизить предельное рабочее давления разряда на 30% и напряжение его горения на величину до 50 В.

Для электрического питания магнетронного разряда использовался стабилизированный источник Spellman SL6PN300 с регулируемым постоянным током до 50 мА и напряжением до 6 кВ. При нагреве мишени из бора возможно ее растрескивание из-за возникающих механических напряжений. Поэтому была экспериментально определена следующая процедура нагрева мишени. Сначала зажигался слаботочный разряд с токами уровня 1 мА и напряжением горения (4 - 5) кВ. Далее ток разряда увеличивался со скоростью ≤ 15 мА/мин. Приблизительно через (3,5 - 5) мин ток достигал рабочего значения 50 мА, при котором проводилось нанесение покрытия бора на подложку. Давление аргона в камере при этом поддерживалось регулятором расхода газа РРГ-10 на уровне 2 мТорр. Температура электронов плазмы T_e , измеренная одиночным лэнгмюровским зондом для случая магнетронного разряда, составляла величину уровня $T_e \approx 4$ эВ. Скорости нанесения покрытий бора в случае использования аргона в качестве рабочего газа при мощности разряда уровня 200 Вт составляют около 7 нм/мин. Магнетрон планируется использовать для нанесения покрытий на основе соединения бора с газами: типа оксидов, нитридов или карбидов бора.

Работа была выполнена за счет гранта Российского Научного Фонда № 22-29-00381, <https://rscf.ru/project/22-29-00381/>.

Список публикаций:

- [1] I. Kelly P.J. and Arnell R.D. // *Vacuum*. 2000. Vol. 56. P. 159-172.
- [2] Nakamura K. // *J. Electrochem. Soc.* 1984, Vol. 131, P. 2691-2697.
- [3] Greiner E.S. and Gutowski J.A. // *J. Appl. Phys.* 1957. Vol. 28. P. 1364-1365.
- [4] Vizir A., Nikolaev A., Oks E., Savkin K., Shandrikov M., and Yushkov G. // *Rev. Sci. Instrum.* 2014. Vol. 85. P. 02C302.
- [5] Ivanov A.V., Maksimova N.V., Kamaev A.O., Malakho A.P., and Avdeev V.V. // *Mater. Lett.* 2018. Vol. 228. P. 403-406.

Исследование плазмохимического процесса синтеза топливных оксидных композиций из водно-органических нитратных растворов урана, плутония и магния

Щербина Данил Сергеевич

Томский политехнический университет

Каренгин Александр Григорьевич, к.ф.-м.н.

dss44@tpu.ru

На сегодняшний день АЭС производят значительную часть мощностей для мировой энергетики. Потенциал к развитию и расширению данной отрасли огромны в силу ее экологичности и надежности, именно поэтому рассматриваются различные способы по улучшению производительности АЭС.

Одним из способов является переход на замкнутый топливный цикл и, как следствие, создание необходимого топлива, которое бы подходило под данный процесс. Таким топливом, на сегодняшний день, является REMIX-топливо, относящееся к дисперсионному ядерному топливу (ДЯТ).

Использование REMIX-топлива приводит к экономии урана, так как потенциально имеется возможность в рециклировании плутония без его существенной деградации. Таким образом, переработка с некоторым повторным дообогащением может обеспечивать многократное возвращение топлива в реактор, что сокращает потребление урана реактором и накопление отработанного ядерного топлива. В то время как обычное топливо деградирует на столько, что становится полностью непригодным для работы.

Традиционные методы получения ДЯТ (раздельное получение и механическое смешение, «золь-гель», порошковая металлургия и др.) многостадийны, продолжительны, не обеспечивают равномерное распределение фаз, требуют большого количества химических реагентов и энергозатрат. Применение плазмохимического синтеза ДЯТ в виде топливных оксидных композиций (ТОК) из диспергированных водно-органических нитратных растворов (ВОНР) обеспечивает одностадийность, высокую скорость, равномерное распределение и требуемый состав фаз.

Плазмохимический метод получения высокодисперсных порошков оксидных композиций может составить серьезную конкуренцию существующим методам, так как имеет ряд преимуществ, таких как: одностадийность, компактность технологического оборудования, высокая скорость. Целью работы являлось моделирование и исследование процесса плазмохимического синтеза оксидных композиций с использованием лицензионной программы "ТЕРРА" и определение оптимального состава ВОНР, обеспечивающего их энергоэффективную плазменную обработку.

В данной работе представлены результаты теоретических исследований процесса плазмохимического синтеза оксидных композиций из ВОНР, включающих органический компонент (этанол, ацетон), водные растворы нитратов делящихся (уран, плутоний) и матричных (магний) металлов.

Магний был выбран из-за его низкого сечения захвата тепловых нейтронов (0,06 барн), отсутствия взаимодействия с ураном, относительной простоты производства и прочности сплавов [1].

Низшую теплотворную способность ВОНР определяли по следующему уравнению [2].

$$Q_H^p = \frac{(100-W-A)Q_H^c}{100} - \frac{2,5W}{100}, \quad (1)$$

где – низшая теплотворная способность горючего компонента, МДж/кг; W – содержание воды, А – негорючих минеральных веществ в композиции %; коэффициент 2,5 учитывает скрытую теплоту испарения воды при 0 °С, МДж/кг.

Более объективным показателем горючести ВОНР является адиабатическая температура горения, которую оценивали по данной формуле:

$$T_{ад} = \frac{(100-v_{ox})Q_H^p + v_{ox}C_{ox}t_{ox}}{100VC}. \quad (2)$$

где v_{ox} – массовая доля окислителя (воздуха), %; C_{ox} – теплоемкость окислителя, кДж/(кг·К); t_{ox} – температура окислителя, К; V – удельный объем продуктов плазменной переработки ВОНР, м³/кг; C – объемная равновесная теплоемкость продуктов плазменной переработки ВОНР, кДж/(м³·К).

ВОНР, имеющие $T_{ад} \approx 1500$ К и $Q_H^p \geq 8,4$ МДж/кг обеспечивают их энергоэффективную плазменную переработку в воздушно-плазменном потоке [3].

Оптимальные значения теплотворной способности и температуры при коэффициентах α (отношении делящегося компонента к неделящемуся) равному 4,4% показано на (рис. 1).

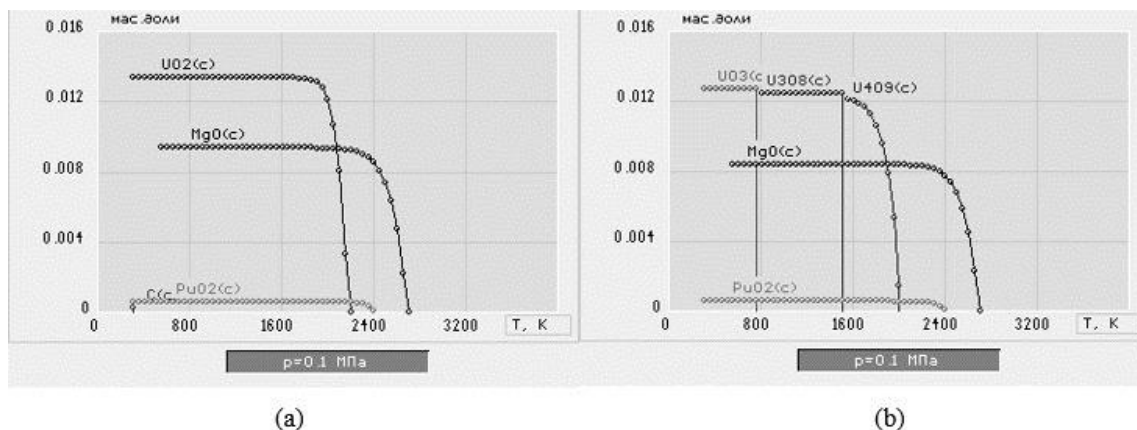


рис. 1 Зависимость состава основных продуктов на основе этанола от температуры после плазменной обработки при $\alpha=0,044$ и массовой доле воздуха 71 % (а) и 74 % (б). (MgO 40 %)

Из более чем семидесяти полученных ВОНР только 4 подошли к требованиям обеспечивающих их энергоэффективную плазменную переработку в воздушно-плазменном потоке. Все 4 ВОНР получены исключительно на этаноле при $\alpha = 0,033$ и $0,044$ при высокой массовой доле содержания MgO (40 и 50%) и высоком содержании воздуха (72 и 73%).

Результаты расчетов могут быть использованы при создании технологии и оборудования для плазмохимического синтеза оксидных композиций из ВОНР и других растворов.

Список публикаций:

- [1] Kleykamp H. // J. Nucl. Mater. 1999. V. 275. No 1–2. P. 1.
- [2] Novoselov I.Yu., Karegin A.G., Shamanin I.V. e.a. // AIP Conference Proceedings. 2018. Vol. 1938. P. 1–7.
- [3] Karegin, A. A. Karegin, I. Yu. Novoselov. e.a. // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 1989. P. 1–5.

