

**МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
«ПЛАЗМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ИССЛЕДОВАНИЯ,
МОДИФИКАЦИИ И ПОЛУЧЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ
РАЗЛИЧНОЙ ФИЗИЧЕСКОЙ ПРИРОДЫ»**

**И МЕЖДУНАРОДНАЯ ШКОЛА
МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ И СПЕЦИАЛИСТОВ**

**«ПЛАЗМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ИССЛЕДОВАНИИ
И ПОЛУЧЕНИИ НОВЫХ МАТЕРИАЛОВ»**



**16 – 18 октября 2012 г.
Казань**

Российская Академия наук
Министерство образования и науки Российской Федерации
Российский фонд фундаментальных исследований
Академия наук Республики Татарстан
Министерство образования и науки Республики Татарстан
Научный совет РАН по химии, технологии и применению
энергетических конденсированных систем
Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН
ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов»
ОАО «Татнефтехиминвест-холдинг»
ФГБОУ ВПО «Казанский национальный исследовательский
технологический университет»

Международная научная конференция
«Плазменные технологии исследования,
модификации и получения материалов
различной физической природы»
и Международная школа
молодых ученых и специалистов
«Плазменные технологии в исследовании
и получении новых материалов»

16 - 18 октября 2012 года

Сборник материалов конференции

Казань
Издательство КНИТУ
2012

УДК 675.024.4

Международная научная конференция «Плазменные технологии исследования, модификации и получения материалов различной физической природы» и Международная школа молодых ученых и специалистов «Плазменные технологии в исследовании и получении новых материалов»: сборник материалов конференции / М-во образ. и науки России, Казан. нац. исслед. технол. ун-т. — Казань : Изд-во КНИТУ, 2012. — 396 с.

ISBN 978-5-7882-1279-1

Редакционная коллегия:

Абдуллин И.Ш. – проректор по научной работе КНИТУ (председатель)

Гайнуллин Р.Н. – профессор КНИТУ (секретарь)

Шаехов М.Ф. – профессор КНИТУ

Материалы публикуются в авторской редакции

ISBN 978-5-7882-1279-1

© Казанский национальный исследовательский
технологический университет, 2012

PLENARY SESSION

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

ТЕРМИЧЕСКАЯ ПЛАЗМА В МЕТАЛЛУРГИИ И ТЕХНОЛОГИИ НЕОРГАНИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Цветков Ю.В., Николаев А.В., Самохин А.В.

Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН,
Россия, 119991, Москва, Ленинский пр-т, 49.

tsvetkov@imet.ac.ru

Проведенные многолетние исследования физикохимии и технологии воздействия термической плазмы на вещество в различных агрегатных состояниях, направленные на разработку экологически чистых энерго- и ресурсосберегающих процессов производства материалов с особыми свойствами, в том числе наноматериалов, имеют в основе научную идеологию о воздействии высококонцентрированных источников энергии на вещество, сформулированную выдающимся отечественным ученым академиком Рыкалиным Николаем Николаевичем.

В развитие этой научной идеологии нами осуществлено:

На основе систематических исследований термодинамики, кинетики и механизма восстановления оксидных систем создана с использованием современных методов исследования топохимических реакций, положений гетерогенного катализа, теории абсолютных скоростей реакций и получившая общее признание теория процессов восстановления металлов в различных агрегатных состояниях, в том числе при воздействии потоков термической плазмы.

Разработана методология исследования плазменных процессов, основанная на высокотемпературном термодинамическом анализе, математическом моделировании и экспериментальных кинетических исследованиях на специально разработанной аппаратуре.

Для струйно-плазменных процессов выявлена определяющая роль процессов тепломассообмена для распределенного в плазменном потоке диспергированного обрабатываемого вещества и его перехода в газовую фазу, т.е. степени гомогенизации процесса.

Сформулирована аппаратурно-технологическая классификация плазменных процессов в металлургии и обработке материалов, позволившая оценить перспективы их практического применения и пути оптимизации конструктивно – технологического оформления.

Впервые в мировой практике реализованы промышленные процессы плазменно-водородного восстановления оксидов тугоплавких металлов и плазменной восстановительной плавки оксидов группы железа. Процессы отличаются энерго- и ресурсосбережением, получением продуктов с особыми эксплуатационными свойствами и совместимостью с окружающей средой. Для ультрадисперсных продуктов плазменного восстановления оксидов вольфрама продемонстрирован ряд практических применений, основанных на особенностях ультрадисперсного состояния - снижение температуры и энергоемкости компактирования, интенсификация процессов спекания и сварки, получение на их основе твердых сплавов повышенной твердости и износостойкости.

Исследован ряд плазмохимических процессов получения нанодисперсных порошков металлов и соединений (оксидов, нитридов, карбидов, карбонитридов) в реакторах струйного типа. Установлены термодинамические и кинетические закономерности и управляющие параметры, обеспечивающие получение порошков заданного химического и дисперсного состава.

Разработаны физикохимические основы и принципы конструктивно-технологического оформления процесса получения синтезом в углеводородсодержащей плазме нанопорошков системы вольфрам-углерод, используемых для получения нанопорошков монокарбида вольфрама в качестве основы для производства наноструктурных твердых сплавов с существенно повышенными эксплуатационными свойствами.

Рассмотрен и частично опробован ряд перспективных методов практического использования нанопорошков для создания материалов с особыми свойствами, например для модифицирования литейных сплавов, создания эффективных композитов и покрытий.

Изучены некоторые процессы при воздействии термической плазмы на газовые среды, расплавы и растворы, в том числе применительно к процессам переработки техногенного сырья, среди них плазменно-каталитический риформинг углеводородного сырья для получения водородсодержащих газов и окисление органических примесей в воде.

Развивается концепция энерготехнологии будущего, основанной на создании по модульному принципу экологически чистого энерготехнологического комплекса, объединяющего на базе плазменной техники производство энергии и химико-металлургическое производство металлов, сплавов и соединений из природного и техногенного сырья. При этом прогнозируется значительное снижение энергозатрат по сравнению с традиционными и альтернативными способами.

Применительно к целевой задаче оптимизации конструктивно-технологического оформления восстановительного модуля комплекса разработаны физикохимические и энергофизические основы построения процессов бескоксового плазменно-дугового получения металлов группы железа из дисперсного оксидного сырья. Продемонстрирована применимость процесса плазменного жидкофазного восстановления к сложному рудному сырью типа титаномагнетита.

Работы проводились при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты №10-03-00462-а, №11-08-12044, №11-08-00516-а).

Литература

- [1] Ю.В. Цветков, С.А.Панфилов. *Низкотемпературная плазма в процессах восстановления*. М., Наука, 1980. 360 с.
- [2] Р.У. Каламазов, Ю.В. Цветков. *Высокодисперсные порошки вольфрама и молибдена*. М., Metallurgia, 1988. 193 с.
- [3] Ю.В. Цветков, А.В.Николаев, С.А.Панфилов. *Плазменная металлургия*. Новосибирск, Наука, 1992. 265 с.

[4]Yu.V. Tsvetkov. Plasma metallurgy. Current state, problems and prospects. Pure and Applied Chemistry. Vol.71, No.10. 1999. pp.1853-1862.

[5]Ю.В. Цветков *Термическая плазма в нанотехнологиях*. Наука в России, 2006, № 2, с.4-9

[6]А.В. Самохин, Н.В. Алексеев, Ю.В. Цветков. *Плазмохимические процессы создания нанодисперсных порошковых материалов*. Химия высоких энергий, 2006, т.40, № 2, с.120-126

[7]Ю.В. Цветков, А.В. Николаев. *Плазменные процессы в составе энергометаллургического комплекса (некоторые проблемы металлургии будущего)*. Ресурсы. Технология. Экономика. 2006, № 2, с.20-26, №3, с.38-42

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И МАТЕРИАЛЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ ФТОРПОЛИМЕРОВ

Бузник В.М.

Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, Россия,
119991 Москва, Ленинский просп., 49, E-mail: bouznik@ngs.ru

Делается аналитический обзор современного состояния фторполимерного материаловедения на основе собственного опыта исследований и библиометрических данных. Рассмотрены вопросы, связанные с применением различных физических и химических методов модифицирующего воздействия на фторполимеры с целью получения новых высокотехнологичных продуктов, а также технологии их получения.

Обсуждается особенности применения технологии растворения низкомолекулярных форм фторполимеров в сверхкритическом диоксиде углерода для получения фторполимерных покрытий наноразмерной толщины и создания оригинальных полимер-полимерных композитов. Рассматриваются способы получения ультрадисперсных и наноразмерных порошков политетрафторэтилена, включая передел фторопластовых промышленных отходов, и области их применения. Делается обзор технологий получения волоконных материалов из фторполимеров и анализируются новые возможности их применения, включая получение материалов с сверхгидрофобными свойствами.

Рассматривается радиационно-химические методы получения жидких и гелеподобных теломерных растворов тетрафторэтилена в органических средах, способы и области применения этих материалов для получения фторполимерных покрытий. Проведен анализ методов получения фторполимерных композитных материалов на основе фторполимеров с

использованием механоактивационной обработки, термохимического разложения, взрывной обработки.

Рассмотрены некоторые аспекты получения нанокompозитных материалов на основе фторопласта с применением плазмохимических технологий.

Анализируются возможности применение метода прямого фторирования углеводородных полимеров с целью изменения поверхностных свойств полимерных материалов и изделий из них.

Обсуждаются возможности и области применения фторполимерных материалов в качестве трибологических материалов, включая сложные конструкции.

Анализируется опыт кооперации отечественных специалистов в области научных исследования и производства фторполимеров в рамках Консорциума «Фторполимерные материалы и нанотехнологии»

УПРАВЛЕНИЕ ФИЗИЧЕСКИМИ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ НЕОРГАНИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ПУТЕМ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО РАЗРЯДА ПОНИЖЕННОГО ДАВЛЕНИЯ

Абдуллин И.Ш.

ФГБОУ ВПО «Казанский национальный исследовательский технологический университет», Россия, 420015, г. Казань, ул. К.Маркса, 68,

Известно, что срок службы и надежность изделий во многом определяются состоянием поверхностного слоя, при этом наличие на поверхности трещиноватых и рельефных слоев приводит зачастую к существенному уменьшению срока службы изделий.

В настоящее время наиболее применяемыми методами по обработке поверхности являются электрофизические методы, большая часть которых модифицируют слои или создают покрытия от микронной до миллиметровой толщины.

Существует ряд методов модификации, которые позволяют изменять отдельные свойства нанослоев, но при этом другие свойства остаются без изменения. Например, магнитно-импульсная обработка позволяет упрочнять слои толщиной 2-10 нм, однако, при этом не изменяется шероховатость поверхности и сохраняется трещиноватый и рельефный слои. Аналогичное действие оказывают и другие методы: вакуумно-лазерное напыление, магнетронное напыление, ионная бомбардировка (ионная очистка), очистка в тлеющем разряде, плазмохимическая очистка, реактивное испарение.

Анализ электрофизических методов модификации показывает, что существует диапазон энергий от 30 до 100 эВ, который не охвачен ими. Можно ожидать, что применение потоков низкоэнергетических ионов позволит расширить область приложения электрофизических методов, а именно реализовать такие процессы как: полировка, с одновременным удалением трещиноватых и рельефных слоев, наведением сжимающих напряжений и сохранением неизменными остальных физико-механических свойств, например, пластичности. Потоки ионов с энергиями в указанном диапазоне можно получать в ВЧ разрядах пониженного давления.

Результаты исследований показывают, что ВЧ плазма пониженного давления позволяет проводить обработку неорганических материалов различной физической природы и структуры: проводящие, полупроводниковые, диэлектрические. С ее помощью можно проводить глубокую очистку и активацию поверхности с удалением дефектных слоев, полировку, упрочнение, наносить и модифицировать тонкопленочные и многослойные покрытия.

Многообразие применений ВЧ плазмы пониженного давления обуславливается некоторыми особенностями, отличающими ее от разрядов, близких по диапазону давлений (тлеющий разряд) или способу ввода энергии (ВЧ индукционный разряд атмосферного давления).

Применяемые в исследованиях ВЧ плазменные установки, состоят из стандартных блоков и элементов, включающие в себя: ВЧ генератор, индуктор, электроды, вакуумную систему, систему подачи плазмообразующего газа и диагностическую аппаратуру. Диапазон расхода плазмообразующего газа от 0 до 0,2 г/с; газы: аргон, неон, гелий, криптон, а также такие активные газы как кислород, азот, пропан, углекислый газ, воздух. Мощность в разряде варьируется от 0,5 до 60 кВт, частота генератора от 1,76 до 30 МГц, давление от 13 до 133 Па.

В этом диапазоне реализованы различные виды ВЧ разрядов пониженного давления: индукционного типа с соленоидальным индуктором и емкостного типа с кольцевыми и плоскими электродами.

В результате комплексных исследований ВЧ разрядов пониженного давления установлено, что в отличие от других видов газовых разрядов, они характеризуются:

- 1) наличием плазменной струи, в которой выделяется до 50 % от общей мощности в разряде, возникает существенное электромагнитное поле, а концентрация электронов на несколько порядков выше по сравнению с их концентрацией в распадающейся плазме;

2) образованием у поверхности тела, помещенного в плазму ВЧ разряда пониженного давления слоя нескомпенсированного положительного заряда (СПЗ), толщина которого в зависимости от степени термической неравновесности плазмы составляет от 0,1 до 2 мм. При этом потенциал тела относительно плазмы достигает значений величины 70-100 В;

3) формированием из плазмы благодаря наличию у поверхности образца СПЗ на поверхность тела слабоинтенсивного ($0,3-25 \text{ А/м}^2$) потока низкоэнергетичных (30-100 эВ) ионов плазмообразующего газа, который и является основным фактором, воздействующим на поверхность материалов в плазме ВЧ разрядов пониженного давления.

На базе полученных экспериментальных данных разработана физическая модель, сущность которой заключается в следующем. Любое тело, помещенное в плазму, заряжается относительно него отрицательно. Однако, при использовании ВЧ электромагнитного поля кроме двойного слоя (толщина которого составляет 10 мкм) около тела (которое в таком разряде становится дополнительным электродом) возникает СПЗ, а потенциал тела относительно плазмы достигает 100 В. Причиной увеличения потенциала является выпрямление ВЧ напряжения на СПЗ, который является плазменным диодом.

В СПЗ формируются потоки низкоэнергетических ионов с энергией от 30 до 100 эВ и плотностью ионного потока от 05 до 25 А/м^2 . При столкновении с поверхностью ионы передают приобретенную энергию и энергию рекомбинации атомам кристаллической решетки твердого тела, что и является основным фактором для реализации следующих процессов: глубокой очистки, полировки и очистки, повышение усталостной прочности с одновременным наведением остаточных напряжений, создание диффузионных слоев, в том числе нанодиффузионных слоев, нанесение тонкопленочных покрытий и модификация тонкопленочных покрытий, плазмохимической модификации порошковых и пористых материалов.

Для разработки инженерной методики расчета параметров ответственных за модификации различных материалов разработана математическая модель, охватывающая область от генерации плазмы до тела и описывающая процессы в ВЧ плазме пониженного давления в области квазинейтральной плазмы, СПЗ и двойном слое.

В частности в результате расчетов установлено, что шероховатость поверхности приводит к искривлению силовых линий электрического поля, при этом происходит фокусировка ионного потока на неровностях микрорельефа. Таким образом, обработка неорганических материалов в ВЧ разряде

пониженного давления носит избирательный характер, что является основой реализации процессов модификации и главным отличием данного вида плазмохимической обработки от других.

Важно отметить, что ВЧ плазма пониженного давления позволяет проводить не только модификацию поверхности материала, но и объемную обработку. Данная возможность также является следствием наличия СПЗ у поверхности тела. В условиях колебания границы СПЗ, возникает разность потенциалов противоположных сторон образца, помещенного в ВЧ плазму пониженного давления, и соответственно ВЧ электрическое поле локализуется в поре. Результаты численных расчетов показали, что величина напряженности электрического поля в поре достигает значений $\sim 10^9$ В/м и более, при этом может происходить автоэмиссия электронов с внутренней поверхности поры. В результате в пористом материале возможен каскад процессов вторичной электронной эмиссии заряженных частиц, рекомбинация которых приводит к обработке внутренних поверхностей пор, что макроскопически регистрируется как объемная обработка материала.

С целью разработки способа модификации, позволяющего улучшить качество и надежность изделий машиностроения, проведены исследования взаимодействия ВЧ плазмы пониженного давления с металлами, диэлектриками, полупроводниками и тонкопленочными структурами. Каждую группу материалов формировали из представителей, наиболее широко применяемых в производстве. Поэтому из металлов выбраны: стали коррозионностойкие, жаростойкие, жаропрочные и износостойкие типа Х13, 12Х18Н9Т, 08Х18Т1; стали конструкционные, углеродистые типа сталь 50, сталь 40, сталь 30; титановые сплавы ВТ-1, ВТ-3, ВТ-6; легированный чугун, медь типа М00, латунь, алюминиевые сплавы Д16Т, АМЦ, силумины, цирконий и специальная проводящая керамика, твердый сплав ВК6-ОМ.

Из диэлектриков выбраны неорганические: поликор, ситалл, сапфир, стекла различных марок (КВ, К8, силикатные), кварц, пирекс, галлий-гадолиниевый гранат, искусственный алмаз; и органические: полиэтилен, полистирол.

Из полупроводниковых материалов обработке подвергались кремний, германий, арсенид галлия, которые используются в электронной и микроэлектронной промышленности.

С целью улучшения эксплуатационных характеристик тонкопленочных структур исследовалось воздействие неравновесной низкотемпературной плазмы на проводящие (алюминиевые, медные, хромовые), диэлектрические (Al_2O_3 ,

SiO₂, ZnS, MgF, TiN, TaC, YF₃) и многослойные тонкопленочные покрытия. В качестве материалов подложек использовались стекла марок КВ и К8, ситалл СТ-50-1, медь, сталь, платино-иридий и алюминий.

Установлено, что с помощью ВЧ плазмы пониженного давления можно получить качественные тонкие пленки двуокиси кремния, сернистого цинка, халькогенидных стекол, ситалла, Al₂O₃, Si, Ge, B₄C, TiN, TaC. Толщина получаемых пленок достигает 50 мкм. Максимальная неравномерность толщин полученных пленок составляет около 0,5%. Все виды полученных пленок по механической прочности относятся к нулевой группе. Нанесение пленок с помощью ВЧ плазмы идет со скоростью 10-2 мкм/с и более.

Непрерывный процесс взаимодействия плазмообразующего газа с напыляемым покрытием позволяет получать пленки с улучшенными параметрами: повышенной адгезионной прочностью за счет образования диффузного переходного слоя. Плотность покрытия близка к объемному материалу, а на поверхности практически отсутствуют примесные дефекты, микропоры и микротрещины.

Особенностью такого взаимодействия является то, что покрытия можно наносить как на изделия сложной конфигурации, так и на внутреннюю поверхность трубчатых изделий. Полученные покрытия оксидов, нитридов и карбидов относятся к нулевой механической прочности и их можно использовать как защитные. Также ВЧ плазма позволяет прецизионно регулировать свойства полученных покрытий.

Дополнительно ВЧ плазма при пониженном давлении позволяет эффективно производить очистку и активацию поверхности перед нанесением покрытий, что позволяет получать высококачественные покрытия. Например, на силуминах адгезионная прочность при температуре, не превышающей 100°C, порядка 10⁹ Па.

Исследования процесса полировки металлов, диэлектриков, полупроводников с помощью ВЧ плазмы пониженного давления показали принципиальное его отличие от других методов, благодаря возможности одновременно с полировкой до 14 класса и выше удалять трещиноватые и рельефные слои, что позволяет существенно повысить усталостную и коррозионную прочность. У обработанных с помощью ВЧ плазмы пониженного давления полупроводниковых материалов уменьшается плотность обратного тока на 50%, повышается пробивное напряжение р-п перехода и на 1-2 порядка повышается плотность упаковки. А полировка диэлектриков позволяет уменьшить коэффициент рассеяния в 1,5-2 раза и лучевую прочность в 2 раза.

Ряд исследований воздействия ВЧ плазмы пониженного давления на металлы и сплавы с добавлением в плазмообразующий газ реагирующих газов (N_2 , O_2 , CO_2 , CH_4 , $C_3H_8+C_4H_{10}$) показывают возможность с ее помощью реализовать формирование диффузионных слоев на глубину до 200 мкм с одновременным получением захороненных слоев атомов, в том числе и инертных. Толщина захороненных слоев достигает 20 нм, а на поверхности образуются нанослои в виде оксидов, карбидов и нитридов. Анализ обработанных образцов стали 20X13 показал, что на глубине 4-10 нм содержание аргона превышает фоновое в 1,5-2 раза, на глубине 10-30 нм наблюдается повышенная концентрация кислорода, хрома и образование при этом нитридов и карбидов хрома.

Сопоставление результатов испытаний различных видов сталей и титановых сплавов показало, что ВЧ плазменная обработка значительно ускоряет диффузионные процессы, как из газовой среды в поверхностные слои материала, так и внутри него. В результате этого существенно ускоряются процессы химико-термической обработки. Например, процесс азотирования в ВЧ плазме пониженного давления протекает в 8 раз быстрее «классического» печного азотирования, при этом азотированные слои, имеют более тонкую дифференцировку фаз, различия в чередовании фаз, различную морфологию нитридных фаз, большую разветвленность диффузионного фронта.

ВЧ плазменная обработка также ускоряет процессы самодиффузии в сталях, следствием чего является ускорение процессов отпуска и рекристаллизации по сравнению с обычной термической обработкой.

Исследования эксплуатационных свойств изделий с применением фрактографического анализа после усталостных испытаний показали, что у обработанных ВЧ плазмой пониженного давления образцов излом происходит с одной стороны, усталостная прочность и предел выносливости возрастает на 50 % с одновременным увеличением микротвердости на 10%, с формированием плавных эпюров остаточных напряжений до 200 мкм и увеличением шероховатости на 1-2 класса.

Результаты коррозионных испытаний образцов из сталей и титановых сплавов показали, что при воздействии ВЧ плазмы пониженного давления происходит общее увеличение коррозионной стойкости, что объясняется образованием на поверхности модифицированного нанослоя.

Аналогичные результаты получены при обработке образцов в плазме аргона с добавлением углекислого газа, пропан-бутана, кислорода. Исследования поверхностных слоев вольфрамо-кобальтового сплава,

обработанного струйным ВЧ разрядом пониженного давления в смеси аргона и пропан-бутана обнаружен модифицированный поверхностный слой толщиной от 70 до 420 нм, в зависимости от продолжительности обработки. В структуре поверхностного слоя можно выделить два подслоя: наружный толщиной ~10 нм, содержащий углерод в виде графита, и переходный толщиной от 10 нм до 70-420 нм, в котором присутствуют углерод в составе карбида вольфрама, углерод в алмазоподобном состоянии и углерод в связях С-Н и С-О-Н.

Выявленные структурные особенности показывают, что ВЧ плазменную обработку при пониженном давлении можно использовать для целенаправленного изменения структуры и состава сплавов, прецизионного микро- и макро-упрочнения изделий.

В отношении пористых материалов, таких как: силикагель, катализаторы на пористом носителе и различных видов сорбентов, ВЧ плазма пониженного давления позволяет осуществить процесс объемной обработки, существенно улучшающий их характеристики за счет увеличения удельной пористости и выравниванию по процентному содержанию различных пор.

Таким образом, разработанные научные основы, созданные и внедренные в промышленное производство установки и технологические процессы регулирования эксплуатационных, потребительских и технологических свойств неорганических материалов (металлов, сплавов, диэлектриков, полупроводников, тонких пленок, порошков) за счет поверхностной и объемной модификации (в том числе нанослоев) раскрывают широкие возможности применения ВЧ разряда при пониженном давлении как эффективного инструмента комплексной целенаправленной модификации.

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ФОРМИРОВАНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ НА ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ МЕТОДОМ ПЛАЗМЕННОГО ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОГО ОКСИДИРОВАНИЯ

Гнеденков С.В., Синебрюхов С.Л.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт химии
ДВО РАН, Россия, г. Владивосток, пр. 100-летия Владивостока,
[159, \[svg21@hotmail.com\]\(mailto:svg21@hotmail.com\)](mailto:svg21@hotmail.com)

Плазменное электролитическое оксидирование (ПЭО) является эффективным способом поверхностной обработки металлов и сплавов, позволяющим формировать многофункциональные защитные покрытия. Такие слои

существенно модифицируют свойства поверхности обрабатываемого материала, увеличивают её коррозионную стойкость, износостойкость, твердость, изменяют магнитные свойства, придают ей биоинертность или биоактивность, существенно расширяя, тем самым, область практического использования обрабатываемых конструкционных материалов.

В Институте химии ДВО РАН разработаны фундаментальные основы ПЭО, развито новое научное направление формирования функциональных материалов и модификации поверхности с использованием оригинальной технологии знакопеременной импульсной поляризации, реализуемой в процессе плазменного электролитического оксидирования, и наноразмерных полимерных и неорганических материалов. Впервые созданы многофункциональные, практически значимые поверхностные структуры и композиционные наноразмерные слои на металлах и сплавах, в том числе на таких труднообрабатываемых электрохимическим методом материалах как сталь и никелид титана. С использованием методов традиционной электрохимической импедансной и локальной электрохимической импедансной спектроскопии изучен механизм коррозионных процессов, протекающих на границе раздела композиционное покрытие/электролит. Установлено, что использование наноразмерных органических и неорганических частиц с целью создания методом ПЭО новых конструкционных материалов и покрытий обеспечивает ряд дополнительных преимуществ в сравнении с классическими подходами. Формируемые методом ПЭО поверхностные слои обладают мезопористой кластерной структурой, которая может служить подходящей основой (матрицей) для нанесения полимерных соединений в целях улучшения антикоррозионных свойств, увеличения гидрофобности, снижения шероховатости, уменьшения негативного влияния различных дефектов, придания поверхности биоактивных свойств. Такие композиционные покрытия являются весьма эффективными. В качестве наноразмерного органического материала для создания композиционных слоев использовался ультрадисперсный политетрафторэтилен. Наноразмерные неорганические материалы (металлы и оксиды металлов) были получены под руководством академика Ю.В. Цветкова. Использование наноразмерных частиц кобальта, к примеру, позволяет формировать на поверхности титановых образцов магнитоактивные покрытия со значением коэрцитивной силы 514 Э при комнатной температуре и 1024 Э при 2 К.

АКТИВАЦИЯ НЕРАВНОВЕСНОЙ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМОЙ СВМПЭ-ВОЛОКОН, ТКАНЕЙ И НЕТКАНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ЦЕЛЬЮ СОЗДАНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Кудинов В.В., Корнеева Н.В.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт
металлургии

и материаловедения Российской академии наук, РФ, Москва, Ленинский пр., 49

E-mail: kudinov@ultra.imet.ac.ru

Создание лёгких и прочных полимерных композиционных материалов (ПКМ) полиэтиленпластиков, армированных нанокристаллическими многофиламентными сверхвысокомолекулярными полиэтиленовыми (СВМПЭ) волокнами, является актуальной проблемой материаловедения, поскольку физико-механические свойства СВМПЭ-волокон в расчёте на единицу веса превосходят многие применяемые материалы. Более высокие удельные характеристики таких ПКМ позволяют снизить вес изделий и уменьшить экологическую нагрузку на окружающую среду.

Цель работы - получение ПКМ полиэтиленпластиков, армированных активированными неравновесной низкотемпературной (ННТ) плазмой СВМПЭ-волокон, тканями и неткаными материалами на их основе, и исследование свойств этих композитов.

Армирующими наполнителями служили высокопрочное высокомодульное СВМПЭ-волокно марки Dyneema®SK-75 от корпорации DSM, нетканые материалы из этих волокон собственного производства и заводская саржевая ткань из отечественных высокопрочных СВМПЭ-нитей марки ПЭ-1. В качестве матриц использовали эпоксидные и эпоксиуретановые связующие на основе эпоксидиановых смол ЭД-20, ЭД-22, Эпикот-828, отверждённые алифатическими и ароматическими аминами. Армирующие наполнители активировали ННТ плазмой при пониженном давлении для усиления межфазного взаимодействия и применяли для упрочнения ПКМ.

Разработаны технологические основы создания 3-х видов сверхлёгких, с плотностью до $1,1 \text{ г/см}^3$, высокопрочных ПКМ из активированных плазмой СВМПЭ-волокон, тканей и нетканых материалов: технология получения однонаправленных ПКМ окружной намоткой и технологии получения слоистых ПКМ прессованием заготовок препрегов тканей и нетканых материалов. Установлено, что после обработки волокнистых наполнителей ННТ плазмой,

предел прочности ПКМ при сдвиге и изгибе повышается в 1,5-3 раза при любой укладке волокна. Полученные ПКМ отличаются высоким уровнем шумопоглощения и большой химической стойкостью и превосходят по удельной прочности конструкционные металлы в 6-7 раз, стекло- и углепластики в 2,7 и 1,7 раза, соответственно. Характер разрушения полиэтиленпластиков показывает, что они являются монолитными композитами, в которых все элементы структуры работают и несут нагрузку.

СТАЦИОНАРНЫЕ И МОБИЛЬНЫЕ ПЛАЗМЕННЫЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ ТОКСИЧНЫХ ОТХОДОВ

Моссэ А.Л.

(ГНУ «Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова» НАН Беларуси, Минск, Беларусь)

Электродуговые плазмотроны. Необходимость создания плазменных реакторов и плазменных печей стимулировали разработку и исследование электродуговых плазмотронов различной мощности и различного конструктивного исполнения. Результатом этих работ явилось создание унифицированного ряда электродуговых плазмотронов, предназначенных для нагрева различных газов (воздух, азот, аргон, водород, метан, пропан-бутан, углекислый газ и их смеси) до плазменных температур 3500-6000 К, и последующего использования их для реализации технологических процессов в различных отраслях промышленности, включая переработку и уничтожение различных видов промышленных, бытовых и специальных отходов.

Унификация основных узлов плазмотронов позволяет наращивать их единичную мощность от 40 до 250 кВт, а использование их в составе одно- или трехструйных плазменных модулей для реакторов различного типа или для нагрева плазменных печей обеспечивает возможность получения потока газа-теплоносителя с необходимыми тепловыми и газодинамическими характеристиками, учитывающими особенности реализуемых технологических процессов. По электрическим, тепловым и ресурсным характеристикам, разработанные электродуговые плазмотроны постоянного и переменного тока (PD-1, PDS-3, PDS-50/3, ППТ-80(200) и другие) [1,2], соответствуют требованиям мировых стандартов для соответствующего вида техники. В отличие от ранее разработанных и нашедших достаточно широкое применение плазмотронов постоянного тока, следует отметить плазмотроны переменного тока и плавильный плазмотрон прямого действия. Плазмотроны переменного тока, работая при напряжении питающей сети 220 и 380 В, соответственно обеспечивают подводимую электрическую мощность 80 или 200 кВт. Электропитание плазмотрона осуществляется от силового промышленного трехфазного трансформатора и может подключаться, как в режиме фаза-ноль, так и в режиме фаза-фаза.

Плавильные плазмотроны работают на воздухе или других плазмообразующих газах. Плазмотрон прямого действия обратной полярности

типа МР-3, мощностью 300 кВт, работает автономно или в паре с катодным плазмотроном, что позволяет обойтись без подового графитового электрода и работать с замыканием электрической дуги, как на расплаве, так и в плазме. Плазмотрон АР-2 типа TWIN может работать в режиме, как косвенного действия, так и в режиме прямого действия без подового электрода. Отметим также возможность применения в плазменных реакторах и плазменных печах не только электродуговых плазмотронов, но и плазмо-топливных интенсификаторов, представляющих собой гибрид плазмотрона и топливной горелки. При этом вклад электрической мощности, подведенной к плазмотрону и тепла сгорания топлива или органических отходов в горелке, может регулироваться в широких пределах.

Плазменные реакторы. Разработка плазменных реакторов для технологических процессов переработки газообразных систем, дисперсных материалов и диспергированных растворов требует решения ряда специфических задач, касающихся способов нагрева теплоносителя, взаимодействия его с обрабатываемыми системами и стенками канала реактора, а также нагрева этих систем, сопровождающегося физико-химическими превращениями, определяющими конкретный технологический процесс. Для обработки дисперсных систем и диспергированных растворов в работах [1] и др. показана перспективность использования плазменного реактора с трехструйной камерой смешения, который получил достаточно широкое распространение.

Плазменные реакторы с многоструйной камерой смешения характеризуются достаточно равномерным профилем температуры и скорости в начальном сечении канала, т.е. в плоскости ввода плазменных струй, возможностями организации осесимметричного или распределенного ввода обрабатываемых компонентов сырья и повышения мощности реактора за счет увеличения числа плазмотронов и единичной мощности каждого из них. К перечисленным преимуществам плазменных реакторов такого типа следует также отнести возможность компоновки на основе многоструйной камеры смешения одно-, двух- и многоступенчатых (многомодульных) схем реакторов, что также способствует повышению уровня их мощности и эффективности и расширяет возможности технологического использования. Особо следует отметить возможность управления структурой плазменного потока, формируемого в камере смешения, путем изменения ее геометрии, способа ввода в нее плазменных струй и параметров работы плазмотронов. Создан ряд проектов плазменных установок различной мощности (от 60 кВт до 1,5 МВт) и соответствующей производительности с реакторами на основе трехструйной камеры смешения [3], что позволяет сделать выводы о целесообразности их опытно-промышленной и промышленной реализации.

Апробированы разные способы реализации процесса. Наиболее хорошие результаты показал процесс, реализуемый путем затопления плазменной струи газов пиролиза в объеме жидких углеводородов. Основные преимущества разработанного и предлагаемого для реализации процесса: минимальные тепловые потери, так как продукты переработки, нагретые до высоких температур, не имеют непосредственного контакта со стенками реактора; процесс закалки производится без введения дополнительных газов или

жидкостей; грубая очистка газообразных продуктов от сажи производится непосредственно в объеме жидких углеводородов; рабочей средой могут быть различные жидкие углеводороды — от легких газовых конденсатов до мазутов и сырой нефти, а также отходы нефтедобывающих и перерабатывающих производств, и отработанные токсичные масла; низкие удельные энергозатраты (до 1,0-2,0 кВт-ч/кг).

Плазменные печи. Разработаны, изготовлены и тестированы плазменная шахтная и камерная печи мощностью до 500 кВт и производительностью до 500 кг/час, которые реализуют наиболее надежный и эффективный метод термической переработки медико-биологических и других видов твердых и пакетированных отходов (бытовых и промышленных, в том числе радиоактивных) [4,5]. Технологический процесс может быть реализован по двум вариантам: первый - при котором горючая часть отходов пиролизуется, с последующим дожиганием, или второй – когда отходы сразу сжигаются, а их зольные остатки плавятся. Расплав стекломассы разливается из печи в специальные контейнеры, и после охлаждения-отверждения является наиболее инертной формой для захоронения или использования продуктов переработки отходов в качестве наполнителей. При этом исключается проникновение радионуклидов и токсинов в окружающую среду, а в стекломассе фиксируется свыше 95-97 % исходных радионуклидов. Печи нагреваются плазменными или плазма-топливными горелками, которые обеспечивают температуру плавления зольных остатков отходов. Печь позволяет совмещать переработку жидких и твердых отходов одновременно, используя теплотворную способность отходов для поддержания необходимой температуры процесса. За счет этого эффекта может быть существенно снижен расход электроэнергии. Каждый из вариантов процесса переработки отходов, в плазменных шахтной, камерной и двухкамерной печах, имеет свои преимущества и недостатки. Обоснованный выбор правильного технологического и технического решения, требует разработки методов расчета и моделирования, а также последующего анализа результатов расчета и эксплуатации. Мощность и производительность плазменных шахтной и камерной печей, могут быть увеличены за счет повышения единичной мощности и количества плазмотронов, работающих на шахту или камеру печи.

Мобильные плазменные системы. Накопление отходов и необходимость их переработки в определенной степени периодический процесс. Особенно это относится к малым и средним предприятиям, для которых создание собственных устройств, для переработки отходов экономически не целесообразно. Решение проблемы возможно путем создания собственных мобильных систем. Мобильность конструкции установки (компоновка установки в цельнометаллическом контейнере - реакторный модуль, газоочистка, модули систем обеспечения и дополнительные устройства), обеспечивает удобство транспортировки, минимум монтажных работ на месте, возможность гибкой коррекции технологических параметров установки (с минимальными затратами на адаптацию установки к условиям конкретного предприятия - по составу и объему перерабатываемых отходов и т.п.). В основу работы мобильных систем заложен принцип максимальной автономности их работы. Работоспособность

установок обеспечивается как от источников постоянного энергоснабжения - сети переменного тока, так и от автономных источников, в качестве которых могут использоваться серийно выпускаемые дизель-генераторы. Газоснабжение установки воздухом обеспечивается работой собственного компрессора и воздуходувки. Система охлаждения обеспечивается работой водяного насоса, бака и теплообменника.

Разработаны модели теплового расчета плазменных реакторов и печей, которые позволяют моделировать и выбирать оптимальные параметры работы устройств. Это дает возможность обеспечить полную переработку отходов и предотвращения как химического, так и теплового загрязнения окружающей среды [6,7].

Представленные плазменные установки используются для исследований и промышленной реализации большого перечня различных технологических процессов, в том числе: для переработки и уничтожения отходов различного происхождения (токсичных органических, галогенорганических, пестицидов и ядохимикатов с истекшим сроком годности, и других).

Литература

1. Моссэ А.Л., Буров И.О. Обработка дисперсных материалов в плазменных реакторах. - Минск: Наука и техника, 1980, - 205 с.
2. Моссэ А.Л., Унифицированный ряд электродуговых плазмотронов для плазменных нагревательных устройств. – Минск, 1988, - 40 с. (Препринт № 5, ИТМО АН БССР).
3. Моссэ А.Л., Электродуговые плазменные реакторы с трехструйными камерами смешения. – Минск, 1990, - 44 с. (Препринт №19, ИТМО АН БССР).
4. Моссэ А.Л., Савчин В.В. Плазмотермическая переработка токсичных отходов//ТБО –Твердые бытовые отходы (научно-практический журнал), 2006. №12, С.22- 24.
5. A.L. Mosse, V.V. Sauchyn, V.V. Shilov. Testing and calculating a two-chamber plasma furnace for processing of radioactive wastes. Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2008.
6. Моссэ А.Л., Савчин В.В. Анализ моделирования процесса переработки медико-биологических отходов в плазменной камерной печи// ИФЖ. 2006. Т.79, №4. С.12-16.
7. Савчин В.В., Иванюкович В.А., Моссэ А.Л. Разработка математической модели теплового расчета плазменной камерной печи. – Известия Белорусской Инженерной Академии № 1(17)/3, 2004. С. – 209-212.

HELIUM PLASMA IMMERSION ION IMPLANTATION OF PET POLYMER

Tóth A.¹, Veres M.², Mohai M.¹, Bertóti I.¹, Szépvölgyi J.¹

¹Institute of Materials and Environmental Chemistry, Research Centre for Natural Sciences, Hungarian Academy of Sciences, H-1525 Budapest, P.O. Box 17, Hungary

²Institute for Solid State Physics and Optics, Wigner Research Centre for Physics, Hungarian Academy of Sciences, H-1525 Budapest, P.O. Box 49, Hungary

E-mail: toth.andras@ttk.mta.hu

Plasma immersion ion implantation (PIII) is a versatile and relatively simple surface modification technique of polymers [1]. The treatment of poly(ethylene terephthalate) (PET) by PIII is of interest, due to the promising applications in packaging (e.g., improvement of gas-barrier properties of beverage-containing PET bottles), and as biomaterial devices (e.g., decrease of bacterial adhesion in cardiovascular implants like heart valve sewing rings and artificial blood vessels) [2-4].

Recently we studied the formation of amorphous carbon type layers on the surface of PET by helium PIII [5,6]. The effect of the main process parameters (acceleration voltage, fluence and fluence rate) on the alterations of the surface chemical composition and structure were investigated by X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) and Raman spectroscopy. The relationships obtained offered the possibility of tailoring the chemical structure of the created amorphous carbon layer. Ion-induced changes in properties like colour, wettability and surface electrical resistance were also studied and structure-property and composition-property relationships were obtained. In addition, the He PIII-treated PET system was characterised by two-wavelength Raman spectroscopy, considering also the partially modified structural units [7]. In the top layer, in which the stopping power of PET for He⁺ ions is dominated by the electronic component, the increase of the portion of aromatic sp² carbon rings was characteristic. In deeper layers the formation of a crosslinked and disordered structure was deduced, due to the increased nuclear damage at the end of the ion track.

LITERATURE

- [1] A. Tóth, K. Kereszturi, M. Mohai, I. Bertóti. *Surf. Coat. Technol.* **204** (2010) 2898.
- [2] M. Ikeyama, S. Miyagawa, S. Nakao, J. Choi, T. Miyajima. *Nucl. Instrum. Methods* **B257** (2007) 741.
- [3] J. Wang, N. Huang, P. Yang, Y.X. Leng, H. Sun, Z.Y. Liu, P.K. Chu. *Biomaterials* **25** (2004) 3163.
- [4] N. Huang, P. Yang, Y.X. Leng, J. Wang, H. Sun, J.Y. Chen, G.J. Wan. *Surf. Coat. Technol.* **186** (2004) 218.
- [5] A. Tóth, M. Veres, K. Kereszturi, M. Mohai, I. Bertóti, J. Szépvölgyi. *Nucl. Instrum. Meth.* **B269** (2011) 1855.
- [6] A. Tóth, M. Veres, K. Kereszturi, M. Mohai, I. Bertóti, J. Szépvölgyi. *Appl. Surf. Sci.* **257** (2011) 10815.

- [7] M. Veres, A. Tóth, M. Mohai, I. Bertóti, J. Szépvölgyi, S. Tóth, L. Himics, M. Koós. *Appl. Surf. Sci.* (accepted for publication).

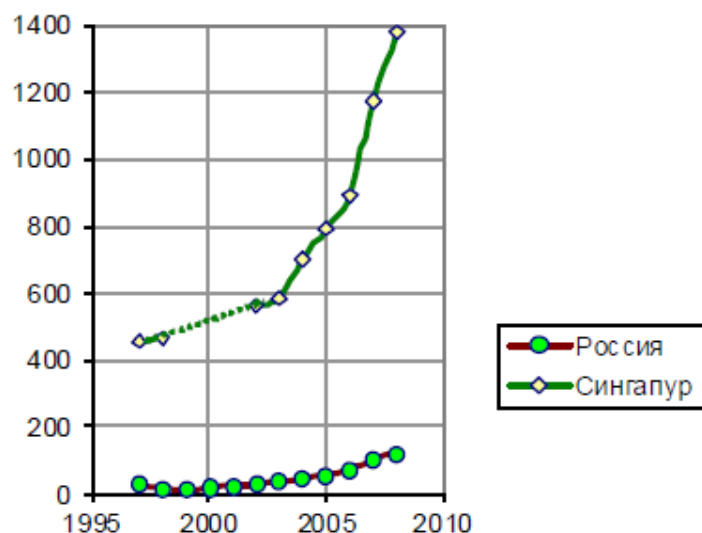
PLASMA TECHNOLOGY DEVELOPMENT IN SINGAPORE

DR. Hiang Mong Tan

(APPLIED ENERGY MICROSYSTEM ASIA PTE LTD, Singapore)

Singapore city-state whose inhabitants, according to the World Bank, belong to the "golden billion", is one of the centers of the global economy. In recent years, the Singapore economy has exceeded the rates of growth of the most developed countries of the world. No other country in the world has such a progressive structure of the economy. Both the United States and Japan - the next "pursuers" - significantly behind Singapore on this indicator.

The Singapore government has taken unprecedented steps to make the city-state into a world leader in high technology. The figure shows the comparison of expenditure on research and development in Russia and Singapore in recent years. The data are given in national currencies were converted into U.S. dollars at the average annual exchange rates. Source: Yearbook of Statistics Singapore, 2011.



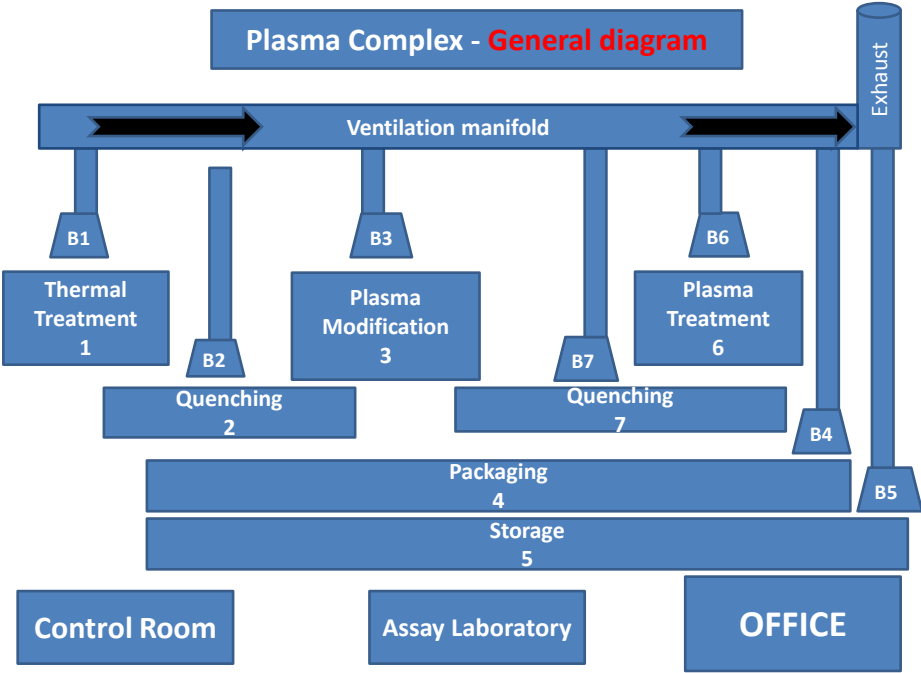
More than a quarter of the national income is a tiny state in the field of high technology. The priorities for this period are biological and information technology. For example, in a long-term large-scale project built and fully equipped with the latest equipment building "Biopolis" (Biopolis), for which invited scholars from Europe, America and Asia.

The company APPLIED ENERGY MICROSYSTEM ASIA (AEM) is a pioneer in Singapore implementation and development of plasma technology.

Explained why our participation in such a representative of the Conference of the plasma in Kazan. AEM is currently building in Singapore universal RF plasma system for the solution of environmental problems, in particular for the processing of waste and the creation of sorbents for the hydrosphere. General arrangement of the appears in the report.

AEM is interested to discuss with the leading scientists in Russia and the world of the possible joint cooperation in the implementation of projects of the plasma not only in Singapore but also in Southeast Asia.

In addition, the Singapore authorities announced the direction to study at leading universities of the most promising undergraduate and graduate students, who returned to participate in the development of national science.



Singapore government and local businesses have also developed a number of programs (similar to the Innovation project "Skolkovo" in Russia), which may be appealing to the Russian scientific center in the promotion of technologies developed in our region.

Taking advantage of the presence in the Kazan State Technological University, will discuss the exchange of graduate students between the two countries, introduction of new plasma technologies.

ИТОГИ И ЗАДАЧИ ДЕТОНАЦИОННОГО СИНТЕЗА АЛМАЗОВ И СВЕРХТВЕРДЫХ НАНОМАТЕРИАЛОВ

Петров Е.А.

БТИ Алт ГТУ им. И.И. Ползунова, Россия, 659300, г. Бийск, ул.
Трофимова, 27.

E-mail htemi@bti.secna.ru

ОАО «ФНПЦ «Алтай», Россия, 659322, г. Бийск, ул. Социалистическая, 1.

Детонационный метод получения искусственных наноалмазов (НА) является приоритетной разработкой российских ученых. В 1982 г. в совместных исследованиях Института гидродинамики СО РАН и ФНПЦ «Алтай» было обнаружено образование НА из углерода молекул взрывчатых веществ. С этого момента начались целенаправленные исследования по изучению механизма и основных свойств НА.

За 30-летний период в ФНПЦ «Алтай» разработана технология синтеза и обогащения НА, создано автоматизированное производство мощностью 2,3 тонны (11,5 млн. карат) и найдены области их рационального использования в науке и технике.

НА являются продуктом детонационного разложения ВВ и процесс длится доли микросекунды, поэтому вероятность образования и скорость роста алмазной частицы зависят от давления и температуры в детонационной волне. В общем случае выход алмазов определяется количеством выделившегося при взрыве конденсированного углерода и величиной давления в зоне химических реакций. Максимальное содержание НА в продуктах синтеза реализуется при 22...23 ГПа и достигает 80% — предельно возможной величины для зарядов без оболочки. Такими термодинамическими параметрами обладают большинство мощных взрывчатых веществ, порохов, топлив.

Обогащение НА от других форм углерода и технологических примесей проводится в непрерывном режиме с помощью серно-азотной смеси в реакторе проточного типа. Найденные технические решения на фазе синтеза и обогащения НА уникальны и не имеют аналогов в мире, защищены более 50 патентами, а технология удостоена Государственной премии РФ в области науки и техники (1994 г.).

В настоящее время основные направления исследований в технологии синтеза связаны с возможностью управления размерами алмазных микрокристаллитов, сохранения избыточной поверхностной энергии и получением новых углеродных структур. Это позволит расширить номенклатуру продукции и повысить эффективность ранее найденных областей применения таких как: смазочные материалы, полировальные составы; металлалмазные покрытия; полимерные композиты; сорбенты, катализаторы и транспортеры биофармпрепаратов.

Промышленное освоение синтеза наноуглеродных материалов позволяет рассматривать детонационный метод как принципиально новый вид базовой технологии получения наносостояний, в том числе и для других веществ: карбидов, нитридов, простых и сложных оксидов и т.п.

Для этого вида технологии исключительно большое будущее.

PLASMA-ASSISTED GROWTH AND MODIFICATIONS OF FUNCTIONAL METAL OXIDE FILMS FOR ENERGY APPLICATIONS

Andreas Mettenbörger and Sanjay Mathur *

*Chair, Inorganic and Materials Chemistry, Department of Chemistry

University of Cologne

Greinstr. 6, Cologne D 50859, Germany

E-mail: sanjay.mathur@uni-koeln.de

The plasma enhanced chemical vapor deposition (PE-CVD) is a powerful tool for the deposition of metal oxide thin films. It allows the deposition of semiconducting structures at slightly increased temperatures at a large scale. The properties, like the film thickness, the crystallinity and the morphology, of the resulting films can be tuned by changing the deposition parameters.

In this work titanium and iron oxide thin films were deposited onto conductive glass substrates (FTO) via plasma enhanced chemical vapor deposition (PE-CVD) using the commercial precursors titanium isopropoxide and ironpentacarbonyl. The photoelectrochemical properties like the photocurrent density and the donor density were investigated and optimized by varying the used plasma power. Furthermore the optimized films were post treated and modified using hydrogen plasma, which leads to a partial reduction of the metal oxide. These films showed modified optical, electrical and photoelectrochemical properties. The hydrogen treated semiconducting films exhibited a substantially improved photocurrent density and solar-to-hydrogen efficiency due to a reduced bandgap and increased donor density.

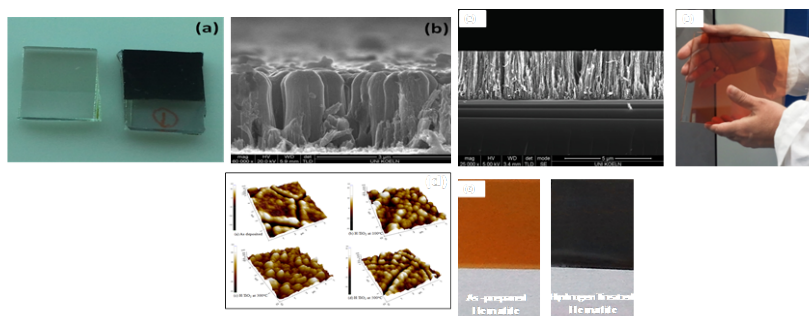


Figure 1: TiO₂ (left) and Fe₂O₃ (right) thin films as deposited and hydrogen treated.

ПЛАЗМОХИМИЧЕСКАЯ МОДИФИКАЦИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ ДЛЯ ЭНЕРГОНАСЫЩЕННЫХ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СИСТЕМ

Бурдикова Т.В.

Казанский национальный исследовательский технологический университет,
Российская Федерация, Республика Татарстан, 420015, Казань, ул. Карла
Маркса, 68

В настоящее время одним из эффективных способов модификации поверхностей материалов твердых тел различной природы является обработка

плазмой высокочастотных (ВЧ) разрядов при пониженном давлении, генерируемой в ВЧ плазмотроне (1). Плазма образуется при воздействии высокочастотного электрического поля на плазмообразующий газ, в качестве которого используются воздух, инертные газы, пропан, азот, кислород и другие газы, содержащие атомы водорода, азота, кислорода, углерода. Плазма состоит из частиц четырех видов: нейтральные атомы, электроны, положительные однозарядные ионы и возбужденные частицы. Чем ниже давление в плазмотроне, тем выше термическая неоднородность плазмы. Поверхность обрабатываемых тел не является идеально плоской, ее профиль представляет собой совокупность микронеровностей с относительно малым шагом. На шероховатой поверхности плотность поверхностного заряда выше на вершинах микронеровностей. Поэтому при высокочастотной плазменной обработке твердых тел происходит оплавление неровностей за счет воздействия энергии ионов, что приводит к полировке поверхностей и ее очистки от примесей.

Обработка проводилась при пониженных давлениях и частоте электромагнитного поля 1,76 МГц, что способствует существенному отрыву электронной температуры от температуры заряженных и нейтральных частиц, при этом происходит воздействие низкоэнергетических ионов плазмы на поверхностный слой металла и структуру его кристаллической решетки. Электронная температура при данных условиях равна 1-10 эВ или 11600-116000К, а температура заряженных и нейтральных частиц - 350-550 К, поэтому обработка металлов проводится «холодной» плазмой, что применительно к легко воспламеняющимся металлическим порошкам является безопасной технологией.

В данной работе проводилась обработка плазмой пониженного давления порошков металлов плазмой пониженного давления, с целью изменения их структурных и поверхностных свойств (рис.1). Исследования показали, что происходят изменение параметров кристаллической решетки порошков металлов, обработанных методом низкотемпературной высокочастотной плазменной обработки. Так же в поверхностном слое металлов в небольших количествах могут содержаться атомы кислорода, углерода и водорода, что может оказать влияние на характеристики его горения.

Железный порошок находит широкое применение в народном хозяйстве в качестве основного компонента конструкционных материалов, которые отличаются высокими прочностными характеристиками, а также может быть использован в некоторых энегонасыщенных конденсированных системах. Основным недостатком порошков железа является их низкая коррозионная стойкость в агрессивных средах.

Увеличение коррозионной стойкости металлических порошков является важной задачей.

В данной работе для защиты железных порошков от коррозии применялась высокочастотная плазменная обработка при пониженном (1,5 Па) давлении в среде инертных газов-пропана (30 : 70, 50 : 50), при силе тока $I=0,7$ А и расходе газа от 0,04 до 0,1 г/с [4].

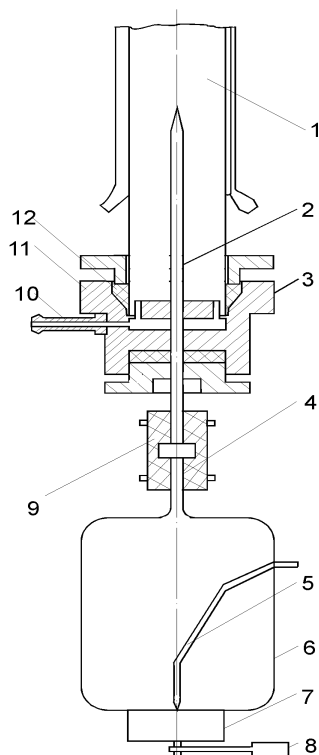


Рис 1. Устройство подачи исходного порошка в рабочую камеру для обработки с помощью плазмы ВЧ разряда пониженного давления: 1 – разрядная камера, 2 – кварцевая трубка, 3 – головка-держатель, 4 – выходное отверстие бункера, 5 – трубка для подачи газа, 6 – кварцевый бункер, 7 – электродвигатель, 8 – эксцентрик, 9 – вакуумная трубка, 10 – штуцер, 11 – фланец, 12 – прокладка из вакуумной резины

Стойкость модифицированных железных порошков к действию соляной кислоты увеличивается в 1,7 раза, а серной кислоты - в 1,3 раза, при этом скорость их коррозии снижается в 1,2-1,6 и 1,2 раза соответственно (рис.2-3). Окисление – начальная стадия воспламенения металлов, следовательно, изменение процесса окисления окажет влияние на закономерности их воспламенения. Установлено, что стойкость к окислению модифицированных железных порошков на воздухе при температурах 370-770 К увеличивается в 1,5-2,2 раза. Получено, что устойчивость к атмосферным условиям при влажности 86% порошков железа, обработанных низкотемпературной плазмой, возрастает в 1,5-3,8 раза.

В данной работе в качестве объектов исследования были выбраны спеченные материалы на основе порошков железа ЖГр1,2Д2,75МО0,25Н2 и ЖГр0,5Д3Н0,4, которые могут использоваться как в военной, так и в гражданской технике.

Практический интерес представляет получение новых спеченных материалов с высокими коррозионными и прочностными свойствами, способными длительно работать в условиях жидких агрессивных сред, а также при повышенных температурах на воздухе.

С целью повышения их эксплуатационных характеристик был предложен метод плазмохимической обработки порошков железа, который проводился на

высокочастотной плазменной установке при пониженном давлении (1,5 Па) в среде инертных газов-пропана (30 : 70), при силе тока $I=0,7$ А и расходе газа от 0,06 до 0,1 г/с. Применение метода плазмохимической обработки привело к тому, что коррозионная стойкость с увеличением расхода газа повышается в 2-5 раз по сравнению с необработанным материалом

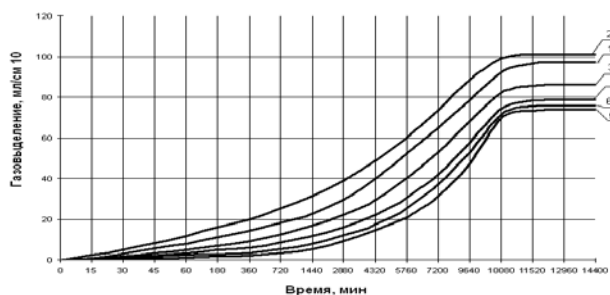


Рис.2. Влияние ВЧПО ПЖВ на их коррозионную стойкость в кислой среде (H_2SO_4):
 1 – исходный ПЖВ; 2 – исходный ПЖВ 200; 3 – ПЖВ $I=0,8$ А, $\varphi=0,06$ г/с; 4 – ПЖВ $I=0,8$ А, $\varphi=0,08$ г/с; 5 – ПЖВ 200 $I=1,1$ А, $\varphi=0,1$ г/с; 6 – ПЖВ 200 $I=0,8$ А, $\varphi=0,1$ г/с

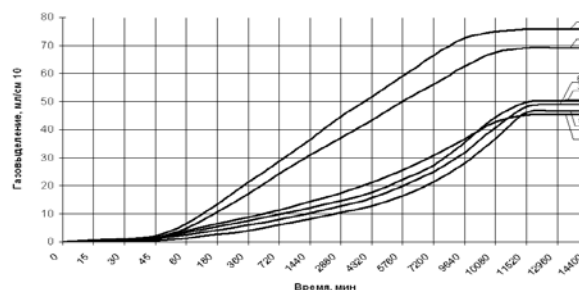


Рис.3. Влияние ВЧПО ПЖВ на их коррозионную стойкость в кислой среде (HCl):
 1 – исходный ПЖВ; 2 – исходный ПЖВ 200; 3 – ПЖВ $I=0,8$ А, $\varphi=0,06$ г/с; 4 – ПЖВ 200 $I=1,1$ А, $\varphi=0,1$ г/с; 5 – ПЖВ 200 $I=0,8$ А, $\varphi=0,1$ г/с ; 6 – ПЖВ $I=0,8$ А, $\varphi=0,08$ г/с

Исходя из условий применения к изделиям на основе материалов ЖГр1,2Д2,75МО0,25Н2 и ЖГр0,5Д3Н0,4 предъявляются требования по стойкости к окислению при повышенных температурах (370-770 К). Для сравнения были изготовлены образцы на основе 100% железного порошка. (ПЖВ). Проведенные исследования показали, что данные материалы окисляются в 1,2-1,8 раза меньше, чем исходные, а спеченные материалы, содержащие 100% модифицированного ПЖВ, имеют стойкость к окислению в 1,2-3,1 раза выше (рис.4-5).

На примере рассмотренных материалов было исследовано влияние предварительной обработки порошков металлов низкотемпературной плазмой на коррозионную стойкость материалов на их основе в кислых и щелочных средах. Получено, что обработка порошков металлов при силе тока 1,1 А и расходе газа 0,1 г/с плазмообразующей смеси газов нейтральный газ:пропан (70:30) является также эффективной (рис.2-5) при получении материалов на их основе с повышенной коррозионной стойкостью в агрессивных средах. Установлено, что для материала (100% ПЖВ) коррозионная стойкость в растворе серной кислоты повышается в 1,3 раза, а материала ЖГр1,2Д2,75МО0,25Н2 - в 2,5 раза, при этом скорость их коррозии снижается в 1,5 раза. Коррозионная стойкость материала ЖГр1,2Д2,75МО0,25Н2 в растворе соляной кислоты увеличивается в 1,5-2,2 раза, а скорость их коррозии уменьшается в 2,6 раза.

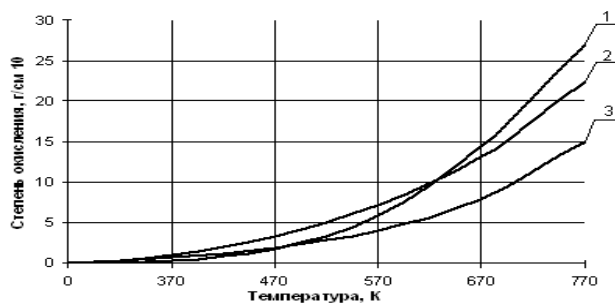


Рис.4. Влияние ВЧПО ПЖВ на степень окисления спеченных материалов ЖГр0,5ДЗК0,4 на воздухе:
1 – исходный материал; 2 – $\phi = 0,06$ г/с;
3 – $\phi = 0,1$ г/с

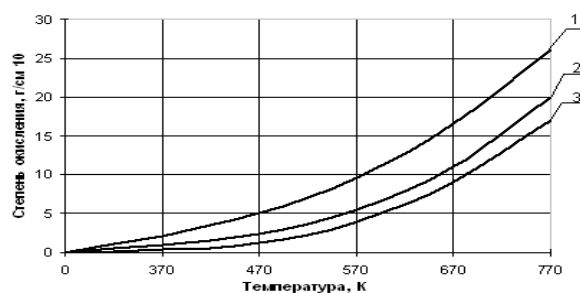


Рис 5. Влияние ВЧПО ПЖВ на степень окисления на воздухе спеченных материалов ЖГр1,2Д2,75М0,25Н2:
1 – исходный материал; 2 – $\phi = 0,06$ г/с;
3 – $\phi = 0,1$ г/с

Проведенные исследования показали, что прочность на изгиб, изделий, полученных на основе модифицированных железных порошков, возрастает в 1,6-4,0 раза, причем материала ЖГр0,5ДЗН0,4 в большей степени. Как показал металлографический анализ, при спекании образцов на основе модифицированных порошков железа образуется мелкозернистая цементитная структура (рис.6), которая определяет прочность и износостойкость материалов.

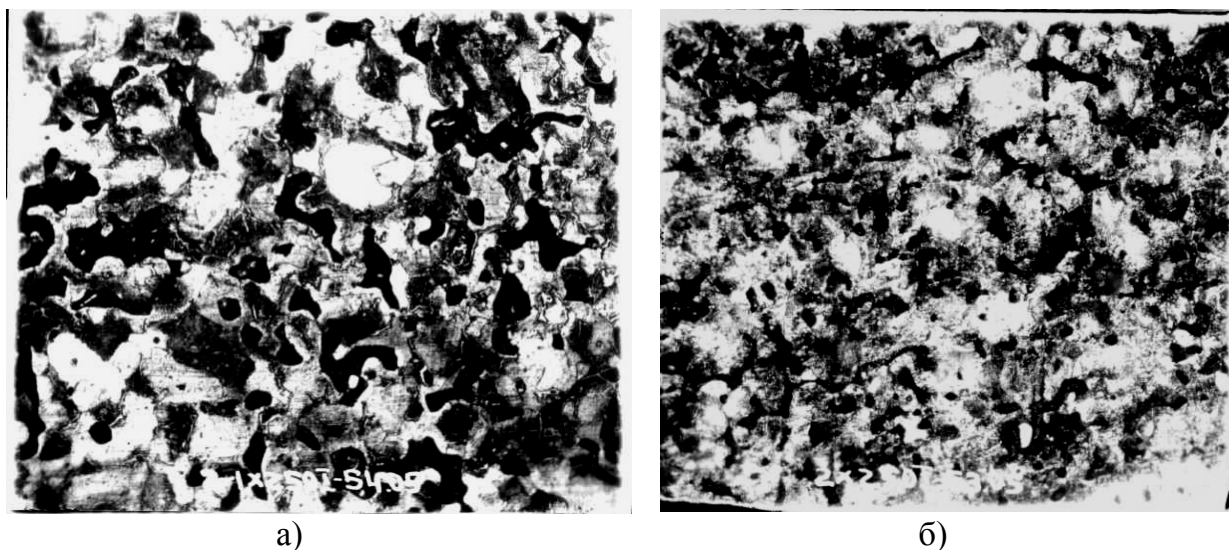


Рис.6. Структура материала ЖГр0,5ДЗН0,4 на основе:
а) исходного ПЖВ; б) модифицированного ПЖВ

Таким образом, проведенные исследования показали, что перспективным и эффективным методом повышения специальных и эксплуатационных характеристик порошкообразных материалов энергонасыщенных конденсированных систем является метод высокочастотной низкотемпературной плазменной обработки в среде инертных газов и их смесей с природными гагами.

Литература

1. Абдуллин И.Ш. Желтухин В.С. Применение ВЧ-плазмы пониженного давления для газонасыщения поверхности металлов // Вестник КГТУ. – Казань: Отечество, 2003. - № 1. – С.172-179.
2. Коробков А.М., Бурдикова Т.В., Просянюк В.В., Суворов И.С., Евсюкова О.В. Разработка пиротехнических источников тока на основе модифицированных порошков циркония и титана // Современные проблемы пиротехники. Материалы III Всероссийской конференции 20-22 октября / Сергиев Посад: ИИД «Весь Сергиев Посад», 2004. С.87-89.
3. Т.В. Бурдикова, А.М. Коробков, В.В. Просянюк, И.С. Суворов, О.В.Бабушкина // Влияние модификации порошков титана на характеристики пиротехнических источников тока / Современные проблемы технической химии: материалы международной научно-технической и методической конференции, Казань, КГТУ, 2007. С. 351-354.

**Section 1. Plasma Properties and its Diagnostics
Methods Used for Synthesis and
Modification of Materials**

**Секция 1. Свойства плазмы и методы её
диагностики для получения и
модификации материалов**

РАСЧЕТ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ ПРИ ДАВЛЕНИЯХ, ОТЛИЧНЫХ ОТ АТМОСФЕРНОГО

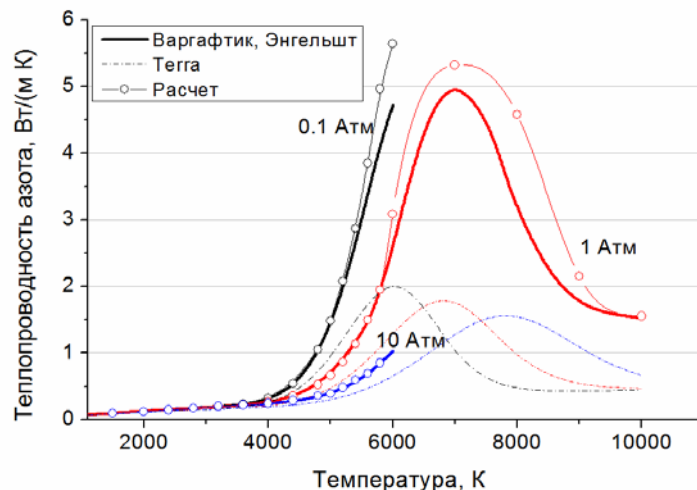
Гуляев И.П.

Институт теоретической и прикладной механики СО РАН, Россия, 630090,
Новосибирск, ул. Институтская 4/1. Gulyaev@itam.nsc.ru

Эффективность широкого круга плазменных технологий может быть повышена за счет организации процесса в условиях пониженного либо повышенного давления. Очевидно, что развитие и разработка таких технологий требуют знания теплофизических характеристик плазмы (плотность, удельная энтальпия, вязкость, теплоемкость, теплопроводность) в соответствующих условиях. В литературе имеются подробные сведения о свойствах всех используемых на практике газов в широких диапазонах температур при атмосферном давлении. Информация о свойствах тех же газов при давлениях, отличных от атмосферного – крайне малочисленна и обрывочна.

Сложности расчета теплофизических характеристик газов связаны с наличием эффектов, которые существенным образом нарушают их идеальность: ионизация и диссоциация, причем температурные кривые этих процессов зависят от давления. В пределах температур $(1 - 10) \cdot 10^3$ К и давлений 0.1 – 10 Атм наибольшие трудности наблюдаются в определении теплопроводности газов.

В настоящей работе предложена простая методика расчета теплофизических свойств плазмы при давлениях 0.1 – 10 Атм с использованием доступных в литературе значений энтальпии газов и соотношений кинетической теории. На рисунке представлено сравнение результатов расчетов теплопроводности азота с имеющимися справочными данными для давлений 0.1, 1, 10 Атм [1]. Достигнутая нами точность вполне достаточна для инженерных расчетов, в то время как результаты специализированной программы [2] занижают теплопроводность газа в 2-3 раза.



Сравнение результатов расчетов теплопроводности азота с табличными данными.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Варгафтик Н.Б., *Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей*. – М.: Наука. – 1972, 720 с.
- [2] Трусов Б. Г., Программная система Терра для моделирования фазовых и химических равновесий в плазмохимических процессах, *Труды 3 межд. симпозиума по теор. и прикл. Плазмохимии*, Иваново, 2002, сс. 217–220.

ОБ ОПЕРАТИВНОМ КОНТРОЛЕ НЕКОТОРЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ

Ионов Ю.Г., Пархоменко А.С.

МГТУ МИРЭА, Россия, 119454, Москва, пр. Вернадского, 78

yuionov@gmail.com

Практическая осуществимость и эффективность методов получения и модификации материалов струями электродуговой плазмы в значительной степени зависят от условий, определяемых технологическими параметрами используемого генератора плазмы [1]. Если генератор рассматривать как инструмент технологических процессов, то возникает необходимость контроля указанных параметров в реальном времени ведения этих процессов. Многими разработчиками решалась соответствующая задача. Нами решалась задача оперативного контроля среднемассовых параметров струйных плазмотронов на срезе их сопла: температуры \bar{T} и скорости \bar{V} . При этом исследовалась функциональная связь с ними таких параметров как полезная мощность струи

плазмы $P_{пол}$ и ее энтальпия \bar{h} , а также КПД η плазмотрона как преобразователя энергии.

Разработанный метод контроля $\bar{T}(z=1,t)$, где $z=1$ в относительных единицах обозначает продольную координату на срезе сопла, а параметр t - текущее время контроля температуры, использует уравнение [2]:

$$\frac{d\bar{T}}{dt} = \frac{k_0 (U_d I - c_p G_{gas} \bar{T})}{\rho c_p} - k_0 k_1 \frac{G_{water} \Delta T_{water}}{\rho c_p}, \quad (1)$$

где коэффициент k_0 зависит от конструкции ЭДП, а коэффициент k_1 — от свойств охлаждающей жидкости, G_{water} , ΔT_{water} — расход жидкости и перепад ее температуры на входе и выходе плазмотрона, ρ и c_p — соответственно плотность и теплоемкость, вычисляемые по среднemasсовой температуре плазмы. В уравнении (1) все параметры есть функции времени, которое для упрощения записи опущено. Уравнение показывает, что интеграл правой части в каждый момент времени дает оценку значения среднemasсовой температуры. При этом в тот же момент должны определяться ток I и напряжение U_d дуги плазмотрона, расход G_{gas} и указанные теплофизические свойства плазмообразующего газа, а также перепад температуры охлаждающей жидкости.

На основе данного метода разработана имитационная модель измерительного преобразователя, представленного на рис. 1. Контроллер (Controller) решает уравнение, а данные получает от источников — датчиков параметров (Plasma Surgical System). В состав элементов преобразователя входят также следующие элементы: коммутатор входов (Multiplexer), аналого-цифровой преобразователь (AD Converter), генератор синхроимпульсов (CLK) и элементы управления моделированием. В контроллере помимо среднemasсовой температуры в режиме реального времени могут быть оценены среднemasсовая скорость и другие, указанные выше среднemasсовые технологические параметры. Модель реализована в программной системе Matlab. Один из результатов приведен на рис.2, где показан переходной процесс в преобразователе — его реакция на включение источников данных. Как видим, преобразователь оценивает изменение температуры в реальном масштабе времени. Вычислительный эксперимент проводился

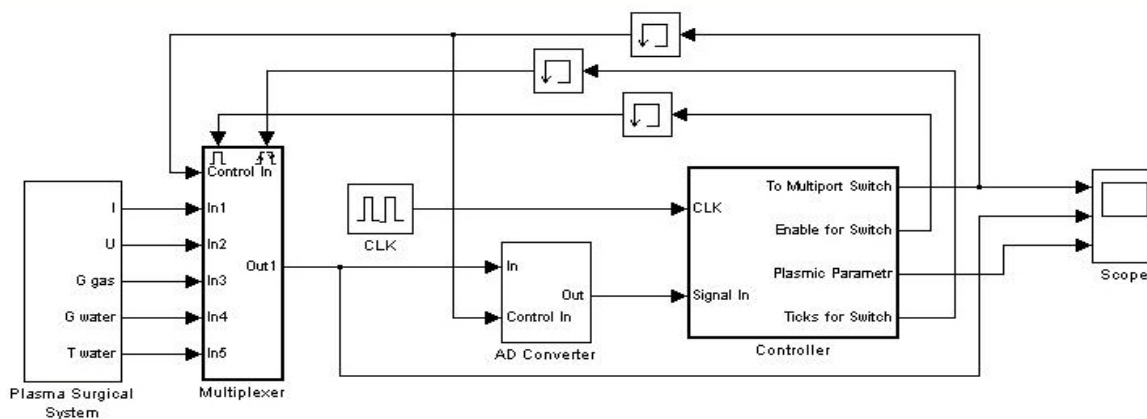


Рис.1. Модель измерительного преобразователя

при следующих условиях: газ – аргон, охладитель – вода, ток постоянный. Значения параметров соответствовали номинальному режиму хирургической установки “Факел”.

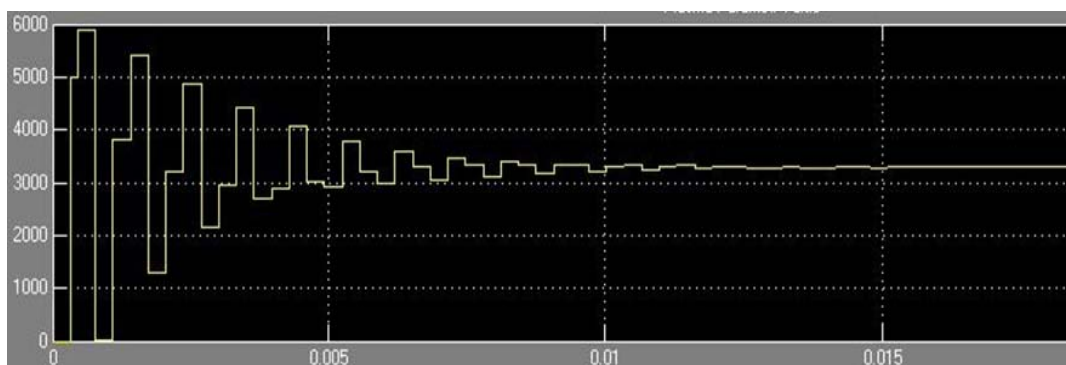


Рис. 2. Осциллограмма изменения во времени среднemasсовой температуры

На осциллограмме (Scope) показан начальный по времени участок работы модели. На интервале, превышающем 0.015 с температура устанавливается на уровне $3300^0 K$. Эксперимент на реальной установке показывает, что временные соотношения, отличаются от полученных на рассмотренной модели. Это связано с тем, что изменение тока дуги во времени из-за индуктивного характера электрической цепи установки “Факел” в процессе моделирования не учитывалось.

Во второй части доклада рассматриваются вопросы, касающиеся неопределенности и нечеткости процесса контроля, а также путей его оптимизации.

ЛИТЕРАТУРА

- [1].Ионов Ю.Г. Лекция “Пути решения проблемы автоматического управления электродуговыми генераторами плазмы” // Материалы Всероссийского симпозиума молодых ученых, студентов и аспирантов “Фундаментальные проблемы приложений физики низкотемпературной плазмы”. Петрозаводск, 5-11 сентября 2005 г. Петрозаводск, 2005 г., с. 157-185.
- [2].Ю.Г.Ионов, А.С.Пархоменко Электродуговой плазмотрон как элемент обобщенного объекта управления плазмотехнологических установок. Задачи моделирования //Аналитическая механика, устойчивость и управление: Труды X Международной Четаевской конференции. Т.3. Секция 3. Управление. Ч.1. Казань, 12-16 июня 2012 г. – Казань: Изд-во Казан. Гос. Техн. Ун-та, 2012.- с.476-483.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАЗМЫ ВАКУУМНОЙ ИСКРЫ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С ПОВЕРХНОСТЬЮ МЕТАЛЛОВ

Башутин О.А., Кирко Д.Л., Савелов А.С., Иванов А.А.

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Россия, 115409
Москва, Каширское шоссе 31. kirko@plasma.mephi.ru

На низкоиндуктивной вакуумной искре в настоящее время проводятся исследования процессов пинчевания сильных токов [1,2]. Вместе с тем, система позволяет моделировать взаимодействие плазмы с поверхностями металлов. Экспериментальная установка состоит из емкостного накопителя (емкость 20 мкФ, напряжение 5-20 кВ) и схемы поджига, подключенной к тригерному разряднику. Электродная система вакуумной искры содержит анод (материал: сталь, медь, диаметр 3-4 мм) заостренной формы и катод (материал: сталь, медь, диаметр 15-20 мм) цилиндрической формы с отверстием 1,5-2 мм в центре. Ток разряда находится в диапазоне 100-150 кА при периоде разряда 8,5 мкс. Плазма разряда состоит из сильно сжатого пинча и более разреженной оболочки. Разряд обладает мощным излучением в видимом и ультрафиолетовом диапазонах электромагнитного спектра. Проводилось исследование взаимодействия плазмы разряда с поверхностью электродов. Также изучался спектральный состав плазмы, примыкающей к поверхностям электродов. Наибольшей интенсивностью обладают линии атомов железа: Fe I 298 нм, 382 нм; ионов железа: Fe II 270 нм, 523 нм; водородные линии H_{α} 656 нм и H_{γ} 434 нм и непрерывный спектр. С помощью линий водорода была измерена температура приэлектродной плазмы, которая составила величину $T=9400\pm 300$ К. Во время

существования плазмы происходит генерация интенсивных высокочастотных колебаний в области частот $\nu=1-120$ МГц. В работе проводилось исследование спектра данных колебаний, и были рассмотрены соответствующие им плазменные волны в диапазоне частот $\nu=4-106$ МГц. На металлических электродах разрядной системы присутствуют характерные структуры, которые изучались с помощью электронного микроскопа и анализатора рельефа поверхности (ДЕКТАК 150). На катоде находятся кольцевые структуры с периодом 0,1-0,2 мм. При меньших масштабах проявляется волнообразный рельеф с периодом 50-100 мкм и грануляция поверхности с характерными размерами 0,3-0,5 мкм. Наиболее вероятным механизмом возникновения данного рельефа является взаимодействие интенсивных плазменных волн с поверхностью металла.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] О.А. Башутин, А.С. Савелов, Е.Д. Вовченко. *Физика плазмы*. **10** (2009) 883.
[2] Д.Л. Кирко, А.С. Савелов, С.А. Саранцев. *Вестник Казанского Технологического Университета*. **15** (2011) 82.

СВОЙСТВА ПЛАЗМЫ РАЗРЯДА В ЭЛЕКТРОЛИТЕ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ПОВЕРХНОСТЬ НЕОРГАНИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Кирко Д.Л., Савелов А.С., Иванов А.А., Визгалов И.В.

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Россия, 115409
Москва, Каширское шоссе 31. kirko@plasma.mephi.ru

При разрядах в воде и электролитах происходит возникновение диффузионного разряда, заполняющего межэлектродное пространство. Данные разряды могут использоваться для обработки металлических поверхностей и напыления [1,2]. Разряд в данной работе формируется в цилиндрической камере из оргстекла (диаметр 12-15 см, объем 150-250 см³), в которую помещается электролит, приготовленный с помощью карбоната натрия. Катодом служит металлический стержень (материал: вольфрам, титан, диаметр 2-3 мм), помещенный в керамическую втулку, а анодом - пластина (материал: нерж. сталь, вольфрам, молибден). Для разряда используется источник питания с напряжением 0-250 В и частотой 100 Гц. При работе установки плазменная область первоначально возникает в непосредственной близости к катоду, а затем область разряда значительно увеличивается. При этом происходит взаимодействие приэлектродного плазменного слоя с поверхностью металла. Во

время работы разряда наблюдается генерация интенсивных колебаний в диапазоне частот $\nu=10$ кГц-100 МГц. При исследовании спектра колебаний был зарегистрирован ряд интенсивных частот. Для объяснения данных колебаний были рассмотрены электронно-циклотронные волны в области частот $\nu=20$ кГц-60 МГц. Для определения элементного состава плазмы, взаимодействующей с поверхностью электродов, были проведены измерения в видимом и ультрафиолетовом диапазонах электромагнитного спектра. Наиболее интенсивными являются линии: атомарного вольфрама W I 374 нм, 384 нм; атомарного натрия Na I 589 нм, 819 нм; иона натрия Na II 309 нм; и линии атомарного водорода серии Бальмера H_{α} 656 нм, H_{β} 486 нм, H_{γ} 434 нм. Благодаря водородным линиям была измерена температура приэлектродной плазмы, которая составила величину $T=3200\pm 300$ К. В диффузионном разряде происходит распыление материала катода и напыление металла на поверхность анода. Поверхность электродов исследовалась с помощью электронного микроскопа и анализатора рельефа поверхности (ДЕКТАК 150).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Ал.Ф. Гайсин, Р.Т. Насибуллин. *Физика плазмы*. **10** (2011) 959.
[2] Д.Л. Кирко, А.С. Савелов, И.В. Визгалов. *Вестник Казанского Технологического Университета*. **15** (2011) 86.

ПАРАМЕТРЫ ПЛАЗМЫ КОРОННОГО РАЗРЯДА ВБЛИЗИ ПОВЕРХНОСТИ НЕОРГАНИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Кирко Д.Л., Савелов А.С., Вовченко Е.Д.

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Россия, 115409
Москва, Каширское шоссе 31. kirko@plasma.mephi.ru

При воздействии коронного разряда на поверхность диэлектрических и металлических материалов может происходить модификация их поверхности [1]. Значения напряжений и токов при этом составляют $U=4-20$ кВ и $I=0,1-4$ мА соответственно. Вращение одного из электродов или диэлектрика улучшает равномерность структуры разряда [1,2]. В данной работе экспериментальная установка для получения коронного разряда содержит два электрода: один конической формы (материал: сталь, медь, диаметр 3-5 мм), а другой цилиндрической формы (материал: алюминий, сталь, диаметр 35-45 мм), расположенные на расстоянии $d=1-40$ мм. Рабочие значения составляют: напряжения $U=1-15$ кВ и тока $I=10-200$ мкА. Свечение разряда имеет сине-

голубой или фиолетовый цвет. В нормальном режиме форма разряда близка к цилиндрической. При увеличении тока разряд приобретает ветвистую форму, состоящую из множества каналов. Во время работы установки в цепи разрядного тока наблюдаются колебательные процессы в диапазоне частот $\nu=1$ кГц-10 МГц. Для изучения данных колебаний использовались электрические и магнитные зонды и осциллограф Tektronix TDS 2024B. В ходе работы было получено распределение зарегистрированных частот. Были сопоставлены известные частоты коронного разряда и наблюдаемые частоты колебаний тока разряда. Наибольший интерес представляют области коронного разряда, расположенные в непосредственной близости от электродов. Рассматривается возможная взаимосвязь зарегистрированных частот с частотами плазменных колебаний, существующих в твердом теле. На изображениях поверхности электродов, полученных с помощью электронного микроскопа, наблюдается характерная структура с размерами 0,5-1 мкм, возникающая при воздействии коронного разряда. Проводились исследования силового влияния данного разряда на поверхность электродов и диэлектрика, расположенного между электродами.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] О.А. Журавлев, А.В. Ивченко, И.А. Бакулин, А.Ю. Стрельников. *Барьерная корона постоянного тока: процессы формирования и примеры применения*. Самара: Самар. гос. аэрокосм. унив. 2010.
- [2] Д.Л. Кирко. *Матер. IX Межд. конф.: Волн. электродин. провод. жидк.* ЯрГУ, Ярославль, (2011) 100.

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ЗОНДОВОЙ ДИАГНОСТИКИ ПЛАЗМЫ

**Булаева М.Н., Кравченко И.В., Лёб Х.В., Машеров П.Е., Рябый В.А.,
Ткаченко Д.П.**

Научно-исследовательский институт прикладной механики и электродинамики
Московского авиационного института (национального исследовательского
университета), Россия, 125080 Москва, Ленинградское ш., д. 5
E-mail: riame@sokol.ru

Диагностика плазмы с помощью зондов Ленгмюра относится к контактными методам, вносящим определённые возмущения в исследуемую среду. При высоком их уровне этот метод диагностики приводит к ошибочным результатам.

Известно значительное число источников таких возмущений, к которым относятся [1,2]: а) повышенный уровень зондового тока, если собирающая

поверхность зонда велика; б) увеличенный диаметр первого зондодержателя, обедняющий плазму зарядами за счёт амбиполярной диффузии к нему заряженных частиц плазмы; в) повышенный уровень ВЧ наводок на призондовом слое объёмного заряда при исследовании ВЧ плазмы.

Однако существует ещё один источник зондовых возмущений исследуемой плазмы, который, насколько это нам известно, в литературе не обсуждался. Обычно при введении зонда в газоразрядное пространство через подвижное вакуумное уплотнение зондовую цепь экранируют от ВЧ наводок металлической трубкой [1,2], которая при гальваническом контакте с плазмой уподобляется «короткозамкнутому двойному макро-зонду» [3]. До сих пор это явление не связывали с зондовыми измерениями.

Чаще всего по мере углубления подвижного зонда в плазму потенциал пространства возрастает. При этом металлический экран зонда принимает минимальный плавающий потенциал [3], который из-за диффузии зарядов к стенкам газоразрядного устройства локализуется в пристеночной области. Тогда по мере углубления зонда в плазму обращённая к зонду часть экранирующей трубки подвергается всё более интенсивной ионной бомбардировке, что снижает степень ионизации плазмы вблизи изучаемой зоны, т.е. возмущает её параметры.

Таким образом, в работе выявлен новый источник возмущений плазмы зондом Ленгмюра, понимание сути которого дало путь к его устранению и, следовательно, к дальнейшему повышению точности зондовых измерений.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] V.A. Godyak, R.B. Piejak, B.M. Alexandrovich, *Plasma Sources Sci. Technology* **11** (2002) p. 525.
- [2] V.A. Godyak, V.I. Demidov, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **44** (2011) 233001.
- [3] A.F. Alexandrov, V.A. Riaby, V.P. Savinov, V.G. Yakunin. In: Proc. 11th Int. Conf. on Gas Discharges and their Applications, **1** (1995) Tokyo, p. 498.