

шихта на основе природного кварца позволяет снизить затраты на изготовление пористых проницаемых материалов на основе природного кварца и улучшить эксплуатационные характеристики последних.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Петюшик, Е.Е., Азаров, С.М., Дробыш, А.А. Пористый проницаемый материал на основе оксида кремния // Энерго- и материалосберегающие экологически чистые технологии: Тез. докл. 6-й Междунар. научно-техн. конф. – Гродно, 2005 – С. 95-96.

2. Дробыш, А.А., Литецкий, В.Ю. Показатели свойств пористого материала на основе природного кварца // Материалы респ. науч.-тех. конф. аспирантов, магистрантов и студентов. – Могилев, 2006 – С. 39.

3. Витязь, П.А., Капцевич, В.М., Кусин, Р.А. Фильтрующие материалы: свойства, области применения, технология изготовления. – Мн.: НИИ ПМ с ОП, 1999. – 304 с.

4. Пористая конструкционная керамика. / Под ред. Ю.Л. Красулина. – М.: Металлургия, 1980. – 99 с.

УДК 621.793.18

Кармажи Х.Т.Е.

## УПРАВЛЕНИЕ СТРУКТУРОЙ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ ВАКУУМНО-ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ

*Белорусский национальный технический университет,  
г. Минск, Республика Беларусь*

*Научный руководитель доктор техн. наук доцент Иванов И.А.*

Структура вакуумных покрытий определяется температурой поверхности конденсации и описывается зонной моделью Мовчана-Демчишина. Наибольшую промышленную ценность имеют покрытия первой структурной зоны – с конусообразной структурой. Анализ показывает, что осаждение вакуумных покрытий в условиях

ионной бомбардировки повышает подвижность адатомов вдоль поверхности растущего покрытия. Тем самым, появляется возможность изменения структуры, а следовательно, и свойств покрытий без увеличения температуры поверхности конденсации.

**Цель статьи** – исследование процессов формирования многокомпонентных вакуумно-плазменных покрытий и разработке практических рекомендации по управлению их структурой.

В работе анализируются условия формирования состава и структуры вакуумных электродуговых покрытий металл-кремний-азот. Расчитан температурный режим движущейся основы. Теоретически обосновывается возможность получения покрытий с полосатой структурой. Показано, что структурные изменения в покрытиях определяются изменением термодинамических условий их роста и не связаны с колебаниями средних параметров плазменного потока вблизи поверхности конденсации.

Для расчета температурных полей в основе при решении уравнения теплопроводности были учтены нагрев поверхности основы происходит за счет ее бомбардировки ионами и тепла радиации дугового разряда, а потери тепла – за счет суммарного действия излучения тепла с поверхности основы, распыления и конвективного теплообмена /1/.

Для решения данной системы уравнений использовали пакет прикладных программ COMSOL FEMLAB 3.1.

В процессе нагрева температурный градиент в образце незначительный. Так, после 60с ионной очистки разница между температурами поверхностей А (поверхность конденсации) и В (теньевая поверхность) составляет всего 8,5°С - 154°С и 145,5°С, соответственно. После 180с эта величина имеет тоже значение - 394,5°С на поверхности конденсации и 386°С на теневой поверхности. Переход от ионной очистки поверхности к конденсации ионно-плазменного потока сопровождается установлением равновесной температуры во всем объеме основы 427°С.

Анализ показывает, что в целом генерируемый при испарении катодов плазменный поток является расширением генерируемой при дуговом разряде плазмы в вакууме происходит в режиме молекулярного течения. Для такого режима характерно значение числа Кнудсена  $Kn = (x / \lambda_0) < 1$ , где  $x$  – характерный размер вакуумной камеры (порядка 0,5-1,0 м);  $\lambda_0$  – длина свободного пробега частиц.

При давлении  $10^{-2}$  Па длина свободного пробега частиц равна 1,8 м, что превышает характерные размеры вакуумной камеры.

Кроме того формирующаяся плазма является неизотермической, идальной как правило  $T_e \gg T_{\text{ион}}$ . Существование такой неизотермической плазмы поддерживается за счет зарядного тока, низкотемпературная, т.е. температура ионов имеют начальную энергию в пределах 10...50 эВ. Таким образом, создаются предпосылки того, что бы определенных условиях на поверхности твердого тела происходила конденсация ионов с образованием химических соединений /3/. Существующие модели удовлетворительно описывают процессы роста однокомпонентных металлических покрытий или многокомпонентных покрытий в отсутствии химических реакций между компонентами. Однако на практике наиболее широко вакуумные технологии используются для получения износостойких и защитных покрытий на основе нитридов и оксидов металлов и их сплавов. В этом случае формирование покрытий происходит в результате конденсации многокомпонентного плазменного потока в среде технологического газа, который при определенных условиях может вступать в химическое взаимодействие с ионами потока на поверхности конденсации. Как известно, взаимодействие плазменного потока с основой в вакууме будет определяться соотношением между тремя термодинамическими макропараметрами – силами поверхностного натяжения на единицу поверхности раздела слой – вакуум  $\gamma_0$ , слой – основа  $\gamma_i$ , основа – вакуум  $\gamma_s$ . Условие реализации известных механизмов определяется соотношением между этими макропараметрами /3/. Характерным для вакуумных конденсатов является формирование столбчатой структуры с предпочтительной кристаллической ориентацией (111). Осаждаемые при относительно низких энергиях ионов. Примеси, в виде которых выступают молекулы (атомы) технологического газа, вытесняются на поверхность растущего покрытия. Формирование тонких покрытий может проходить в соответствии с одним из трех моделей роста. В результате формирования на поверхности «островков» конденсирующегося материала (модель роста Volmer-Weber), послойный рост покрытий (модель роста Frank-van der Merwe) и по смешенному механизму (модель роста Stranski-Krastanov). Определяющую роль в формировании окончательной структуры вакуумных конденсатов играют температура поверхности конденсации и давление газа в вакуумной камере. Первая

зонная модель вакуумных конденсатов, в зависимости от температуры поверхности конденсации, была предложена Мовчаном и Демчишиным. Позднее Торнтон предложил, для покрытий получаемых методом магнетронного распыления, более обобщенную зонную модель. Общие положения, содержащиеся в зонных моделях Торнтона и Мовчана-Демчишина, оказались применимы и к случаям формирования структур вакуумных конденсатов получаемых другими технологическими методами /4/.

Исследование закономерностей структурообразования вакуумных электродуговых покрытий исследовались; при низких значениях ускоряющего потенциала и давлениях реакционного газа покрытия не имеют каких-либо особенностей строения, при давлениях азота  $10^{-2}$  Па и выше и при нулевом значении ускоряющего потенциала структура конденсатов близка к конусообразной. Вертикальные границы кристаллитов видны на изломах этих покрытий. Рост величины ускоряющего потенциала до 150...250В приводит к формированию полосатой структуры.

**Выводы.** 1. Ионная очистка поверхности сопровождается линейным ростом температуры основы. Температурный градиент в образце незначительный и составляет всего  $8^{\circ}$  С на 10 мм толщины детали., 2. Плазменный поток является практически бесстолкновительным и электрически нейтральным. Величина радиуса Дебая составляет  $1,2...1,4 \times 10^{-4}$  м., 3. Полнота протекания реакции образования в покрытии нитридов металлов определяется количеством адсорбированного на поверхности основы атомов (молекул) технологического газа, которое прямо пропорционально зависит от его давления в технологическом объеме вакуумной камеры, и нелинейно от энергии конденсирующихся ионов многокомпонентной плазмы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Гольцев, М.В., Гольцев, В.П., Болтушкин, В.И. Температурные поля при синтезе защитных покрытий ионно-плазменным методом // "Взаимодействие излучений с твердым телом", тезисы 2 м\н конф.- Мн.: БГУ, 1977. – с55.

2. Thin solid films, 97(1982) № 1, 69 – 77с.

3. Мрочек, Ж.А., Эйзиер, Б.А., Марков, Г.В. Основы техно. формирования многокомпонентных вакуумных электродуговых покрытий. – Мн.: Навука і тэхніка, 1991, – 96с.

4. M.Ohring Material science of thin films.-Academic press.-San Diego, 1992. – 195 p.

УДК 620.91/.98.(063)

Ключников И. М.

## **ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ**

*Белорусский национальный технический университет,  
г. Минск, Республика Беларусь*

*Научный руководитель преподаватель Бурдо Е.Н.*

Сегодня уровень развития цивилизации определяется уровнем потребления энергии на душу населения. Без поиска новых источников энергии, совершенствования технологий ее производства и доставки не создать условий для нормальной жизни. Иными словами, качество жизни напрямую зависит от развития энергетики, а оно невозможно без активного вклада ученых.

Продолжая сжигать органическое топливо, мы накапливаем углекислый газ в атмосфере, забывая о том, что требуется не менее ста лет, чтобы его концентрация в атмосфере сократилась. Глобальное потепление, к сожалению, уже нельзя объяснить только циклическими процессами потепления и охлаждения, присущими развитию планеты. Уже нет сомнения, что нынешняя фаза потепления – результат деятельности человека. Разрушая тепловой баланс, мы, по сути, без всяких войн ведем человечество к гибели.

Одним из настоятельных требований времени являются поиск новых источников энергии, разработка методов ее преобразования. Важнейшим условием современного применения новых источников энергии являются их экологическая чистота, особые методы преобразования одного вида энергии в другой. При этом акцент делается на энергосберегающих технологиях, возобновляемых источниках, таких, как солнце, ветер, водная стихия.