

1. Плазменно-вакуумные покрытия / Под общ. ред. Ж.А. Мрочек – Минск: УП «Технопринт», 2004. – 369 с.
2. Емельянов, В.А. Вакуумно-плазменные способы формирования защитных и упрочняющих покрытий / В.А. Емельянов, И.А. Иванов, Ж.А. Мрочек. – Минск: БЕСТПРИНТ, 1998. 1998. – 284 с.
3. Мрочек Ж.А. Современное состояние исследований в области вакуумно-плазменных жаростойких и упрочняющих покрытий / Ж.А. Мрочек, И.А. Иванов, В.А. Соколовский // Весці НАНБ. Сер.фіз.-тэхн.наук, – 2002, – № 3, – С. 121. – Деп. в ВИНІТІ № 229В2002 05.02.02. – 24 с

УДК 621.793.18

Иванов И.А.

РАСЧЁТ ТОЛЩИНЫ ВАКУУМНО-ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ

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

Theoretical approaches to designing on the basis of applied MATLAB code of models of calculation of speed of sedimentation of unicomponent plasma streams are discussed.

Для вакуумно-плазменных способов осаждения покрытий одним из важных факторов, влияющих на функциональные свойства упрочненных поверхностей, является толщина осажденного слоя. Для большинства промышленных применений толщина вакуумно-плазменных покрытий не превышает 10 микрометров. Для таких сравнительно тонких покрытий их толщина оказывается важным параметром влияющим на их свойства. Поэтому разработка методов расчета и контроля толщины вакуумно-плазменных покрытий в процессе их осаждения является актуальной с точки зрения обеспечения работоспособности этих покрытий в заданных условиях эксплуатации.

Цель данной статьи – это обсуждение теоретических подходов к проектированию на базе пакета прикладных программ MATLAB моделей расчета скорости осаждения однокомпонентных плазменных потоков.

В качестве примера однокомпонентного плазменного потока рассматривается плазменный поток, формируемый при испарении вакуумной дугой титана марки ВТ1-0. Второй компонент в покрытии связан с использованием технологического газа (азота). При моделировании за источник плазмы (центр испарения) принималась точка пересечения оси испарителя с поверхностью катода. Экспериментальные зависимости для расчета скорости осаждения титанового покрытия на подложку брались из [1].

Для аналитического описания известных экспериментальных зависимостей выбирались эмпирические формулы в виде обычных многочленов, степень которых заранее была неизвестна. Для построения интерполяционных полиномов использовался метод неопределенных коэффициентов, реализуемый на базе пакета прикладных программ MATLAB. Расчет скорости осаждения покрытий проводили с учетом возможности варьирования технологических параметров процесса. Для увеличения наглядности расчетов по предложенной модели и расширения возможностей использования их в инженерных целях использовали сервисные функции MATLAB визуализации полученных результатов.

Технологический процесс нанесения покрытий включает три технологических этапа [1]. Этап генерации плазменного потока является определяющим для формирования условий протекания последующих технологических этапов, что связано с особенностями физических процессов генерации плазменного потока в процессе эрозионного испарения материала катода. Это требует дать некоторые модельные представления о 1-й стадии процесса.

Эрозия катода в дуговом разряде катодной формы происходит в катодных пятнах, хаотически перемещающихся по его поверхности с достаточно большой скоростью (до 10^2 м/с) [2]. Их возникновение обусловлено необходимостью переноса больших токов (до 10^3 А) через поверхность холодного и практически не эмитирующего проводника. Такая возможность реализуется в катодном пятне за счет высокой концентрации энергии (плотность тока $j=10^6 \dots 10^7$ А/см²) в малой (10^{-6} до 10^{-4} м) области на поверхности электрода [3]. Стабилизация дугового разряда в пределах торцевой поверхности катода связана с необходимостью предотвращения возникновения дугового разряда между другими элементами конструкции испарителя, что может явиться причиной короткого замыкания цепи питания испарителя. Площадь торцевой поверхности катода, подверженная эрозии (приблизительно $2 \cdot 10^{-3}$ м²), значительно меньше площади поперечного сечения вакуумной камеры (порядка 1 м²). В отличие от испарения в вакууме, где разлет испаренных атомов происходит равномерно во все стороны, расходимость потока однозарядных ионов составляет всего $10 \dots 20^\circ$ [4]. Все это позволяет рассматривать дуговой испаритель как точечный источник. В этом случае для оценки скорости испарения катода достаточно знание величин тока дугового разряда и коэффициента электропереноса для данного материала катода:

$$\frac{dm}{dt} = \eta \times I_d$$

где I_d – ток дугового разряда, А;
 η – коэффициент электропереноса, кг/Кл.

С учётом ограничения на величину минимальной массы, необходимой для поддержания разряда:

$$m(\min) = \eta \cdot \delta \cdot I_{\text{и}} \cdot \frac{m_i}{Z_i}$$

где m_i – средняя масса ионов; Z_i – средний заряд ионов; δ – коэффициент, учитывающий долю ионного тока в токе дугового разряда, $\delta=0,1$.

Величины коэффициента электропереноса в настоящее время известны для большинства электропроводных материалов, используемых для изготовления катодов электродуговых плазменных испарителей, и могут быть взяты из литературных источников. В случае отсутствия литературных данных измерение этой величины не вызывает затруднений.

Переход от трех координат к двум осуществляется исходя из того, что поток осесимметричный. Ось симметрии – ось y .

Используя полученные уравнения и интерполяционную модель, можно рассчитать толщину осажденного покрытия с учетом положения основы в вакуумной камере.

Для случая осаждения покрытий на заготовке простой геометрической формы принципиальное значение для получения покрытий требуемой толщины будет играть только ее положение в вакуумной камере, что связано с наличием пространственного распределения плотности ионного тока плазмы. Действительно, для условий постоянства плотности плазменного потока, траектория движения заготовки детали из произвольной точки A в точку B не влияет на скорость роста и конечную толщину покрытия.

При постоянной скорости осаждения и равномерном движении заготовки из точки A в точку B суммарная масса (толщина) осажденного покрытия на участке площадью s (м^2), перпендикулярной потоку плазмы, равна

$$M = m \cdot s \cdot t,$$

где m – постоянная массовая скорость потока (кг/мин) $\times 10^{-6}$; t – время осаждения (движения участка площадью s из точки A в точку B) покрытия, мин.

Для основы, которая движется относительно оси камеры по окружности с радиусом R (мм), уравнение для определения массы покрытия имеет следующий вид:

$$M = s \frac{\pi R}{\omega_0} m,$$

где ω_0 – скорость углового вращения, мин^{-1} . Так как, $\frac{\pi R}{\omega_0}$, то и в данном случае скорость осаждения покрытия на неподвижной основе будет определяться так же, как и для вращающейся.

Таким образом, масса (а следовательно, и толщина) покрытия на площади s будет определяться, в первую очередь величиной постоянной скорости потока и временем при перемещении заготовки из точки A в точку B .

При наличии пространственного распределения плотности ионного потока скорость осаждения покрытия на поверхность основы площадью S определяется уравнением:

$$M = \int_0^B m \Delta s dx, \quad dt = f(dx)$$

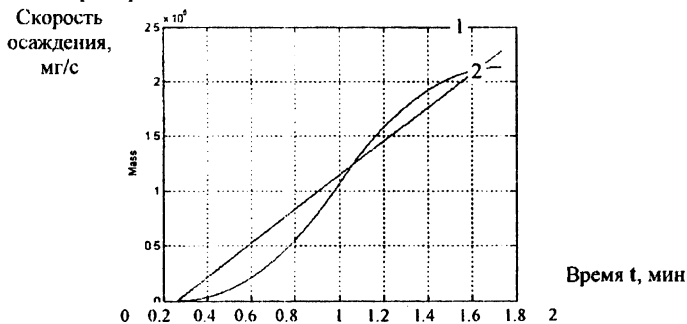
где m – переменная скорость потока, мг/мин;

Δs – площадь поверхности образца, перпендикулярная потоку плазмы, m^2 ;

dx – отрезок пути, проходимый участком Δs за время dt .

Движение заготовки из точки А в точку В в начальный момент сопровождается ростом скорости осаждения покрытия. Максимальная скорость роста соответствует положению заготовки на оси испарителя. Затем заготовка, продолжая двигаться к точке В, удаляется от оси испарителя и скорость осаждения потока падает (рисунок).

В результате проведенных исследований получены математические модели для расчета скорости осаждения однокомпонентной плазмы, которая допускает визуализацию результатов расчетов и позволяет определить скорость осаждения покрытий на поверхность движущейся заготовки с учетом пространственного распределения плотности ионно-плазменного потока.



1 – $m = \text{const}$; 2 – m угловое положение основы, град

Рисунок – Графическое представление зависимости толщины осажденного слоя от положения основы в вакуумной камере

ЛИТЕРАТУРА

1. Плазменно-вакуумные покрытия / Под общ. Ред. Мрочек Ж.А. – Минск: УП «Технопринт», 2004. – 369 с.
2. Вакуумные дуги / Под ред. Дж. Лафферти. – М.: Мир, 1982. – 402 с.
3. Любимов, Г.А. Катодное пятно вакуумной дуги / Г.А. Любимов, В.И. Раховский // Успехи физических наук. – 1978. – Т. 125. – вып. 4. – С. 665-706.

4. Любимов, Г.А. Исследование влияния катодной и анодной струй на свойства сильноточной электрической дуги / Г.А. Любимов // ЖТФ. – 1977. – №47. – С. 297.

УДК 621.793

Ивашенко С.А., Комаровская В.М.

ХАРАКТЕРИСТИКА МЕТОДОВ ФОРМИРОВАНИЯ ЗАЩИТНО-ДЕКОРАТИВНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ИЗДЕЛИЯХ ИЗ СТЕКЛА

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

Защитно-декоративные покрытия наносят на стеклоизделия с целью повышения его эстетических показателей и защитных свойств. Для покрытий защитно-декоративного назначения большое значение имеет композиция изделия. Ю.А. Гуляня указывает, что качественную сторону композиции характеризуют следующие категории: единство формы и содержания, образность, целостность, композиционное единство [1]. Декоративное покрытие определяется как декор, нанесенный на изделие в виде деколи, живописи, а также в виде рисунка или покрытия (частичного, сплошного). В тоже время отмечается, что действующие нормативные документы не отражают всех современных способов декорирования, включая нанесение различных покрытий с использованием нетрадиционных источников энергии [2]. В ГОСТ 24315–80 регламентируются основные способы декорирования стеклоизделия в горячем и холодном состоянии.

Рассмотрим наиболее распространенные методы формирования покрытий на изделиях из стекла, как у нас в стране, так и за рубежом.

Очень большой популярностью в последние десятилетия стала пользоваться декоративная обработка стеклоизделий в холодном состоянии по методике изобретенной Э. Галле. Французский художник-прикладник в XIX веке изображал на вазах пейзажи путем глубокого травления плавиковой кислотой [1]. В настоящее время этот способ используют для обработки многослойного стекла [3]. Популярность этого способа подтвердили ведущие специалисты промышленных предприятий России на Всероссийской конференции в 2002 году [4].

При обработке изделий растворами или парами солей различных металлов на поверхности образуются цветные покрытия [1]. После того как на изделие с помощью краскораспылителя нанесено покрытие его подвергают отжигу. Чаще всего используют соли легко испаряющихся кислот (уксусной, азотной, соляной), в качестве растворителей – дистиллированную воду или этиловый спирт. К недостаткам данного способа следует отнести: использо-