

Рис. 6. Диаграмма износостойкости образцов с лазерным легированием от продолжительности испытаний при граничном трении.

- 1 – композиция 1 – карбид бора, аморфный бор и борный ангидрид;
 2 – композиция 2 – ПГ-10К-01 + В; 3 – композиция 3 – ПГ12Н-03 + В;
 4 – композиция 4 – ПР-Х4ГСР (50 %) + ПГ-СР4 (50 %) + В; 5 – чугун ВЧ-50; 6 – сталь 40Х13

При этом имеет место текстурирование никелевых зерен в направлении отвода тепла, ориентированных по более плотноупакованным плоскостям (III). Структуры такого типа обладают пониженной склонностью к схватыванию в процессе трения, что и было подтверждено электронно-микроскопическими исследованиями поверхностей износа. Результаты этих исследований показывают, что процесс изнашивания покрытия включает в себя усталостное изнашивание более мягкой составляющей - никелевой фазы, обнажение более твердых составляющих карбида-боридной фазы и их последующее выкрашивание. Хорошую информацию о состоянии и качестве покрытия может дать визуальное изучение поверхностей износа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Спиридонов Н.В., Кобяков О.С., Куприянов И.Л. Плазменные и лазерные методы упрочнения. – Мн.: Высшая школа, 1988. – 200 с.
2. Рыкалин Н.Н., Углов А.А., Кокора А.Н. Лазерная обработка материалов. – М.: Машиностроение, 1975. – 296 с.
3. Упрочнение деталей лучом лазера /Коваленко В.С. [и др.]. – Киев: Техника, 1981. – 131 с.
4. Астапчик С.А. Фазовые и структурные превращения в сталях и сплавах при лазерном нагреве //Известия АН БССР. Серия физико-технических наук. – 1982. - №4. – С.30-32.
5. Григорьянц А.Г. Основы лазерной обработки материалов. – М.: Машиностроение, 1989. – 304 с.

УДК 621.793

Фролов И.С., Ивашенко С.А., Гречихин Л.И., Комаровская В.М., Фролов Ю.И.

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ВАКУУМНО-ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ НА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛАХ

Белорусский национальный технический университет

Минск, Беларусь

Описан механизм формирования вакуумно-плазменных покрытий на диэлектрических материалах. Предположена методика определения коэффициента потенциальной ионно-электронной эмиссии. Приведен расчет оптимального количества изделий, загружаемых в вакуумную камеру, при котором обеспечивается высокое качество покрытий и максимальная производительность процесса.

Вакуумно-плазменные покрытия находят все более широкое применение для улучшения эксплуатационных и декоративных свойств различных изделий [1,2]. Одним из новых направлений развития является нанесение этих покрытий на изделия из диэлектрических материалов

(стекло, некоторые виды керамики и др.) [3]. Однако при формировании покрытий на указанных материалах методом конденсации вещества из плазменной фазы в условиях ионной бомбардировки (КИБ) возникают определенные технологические сложности. Положительные ионы материала катода на обрабатываемой поверхности не нейтрализуются и создают равномерно заряженный слой некомпенсированных зарядов, что препятствует осаждению последующих слоев. Это существенно влияет на производительность процесса и качество покрытия. Экспериментально удается получать покрытия удовлетворительного качества, однако добиться надежной повторяемости результатов не всегда возможно. Поэтому исследование параметров процесса формирования вакуумно-плазменных покрытий на диэлектрических материалах и их оптимизация представляется актуальной.

В процессе осаждения положительно заряженных ионов Ti на диэлектрическую поверхность по мере заполнения всех мест адсорбции возникает положительно заряженная поверхность, которая воспрепятствует дальнейшему осаждению положительных ионов титана (рис. 1). То есть поток ионов титана не будет достигать поверхности напыляемого диэлектрического изделия и вследствие отклонения будет осажаться на поверхность металлической основы, на которой закреплены напыляемые изделия. Этим и объясняется сравнительно низкая производительность процесса нанесения покрытий на диэлектрические материалы, в отличие от металлических.

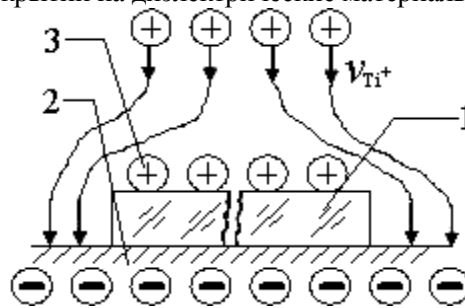


Рис. 1. Схема взаимодействия ионов титана с диэлектрической поверхностью: 1 – диэлектрическое изделие; 2 – металлическая основа; 3 – положительно заряженные ионы титана

В процессе осаждения ионов титана на металлической основе возникнет потенциальная ионно-электронная эмиссия. Образовавшиеся электроны в результате протекания такого процесса будут захватываться положительно заряженной поверхностью диэлектрического изделия и произойдет нейтрализация ионов титана на этой поверхности.

Эмиссия электронов под воздействием положительных ионов титана возникает как одно-этапный изоэнергетический процесс перехода двух электронов проводимости металла из энергетического состояния, определяемого уровнем Ферми [4]. При этом реализуются два последовательных процесса: 1) возбуждение электронов основы за счет кинетической энергии иона и 2) возбуждение электронов основы электрическим полем иона. Первый вид эмиссии – кинетический, а второй – потенциальный. В технологии вакуумно-плазменного осаждения покрытий кинетической энергией положительных ионов можно пренебречь и рассматривать только потенциальную ионно-электронную эмиссию.

Потенциальная ионно-электронная эмиссия характеризуется коэффициентом γ :

$$\gamma = q_e n_{кл} dt, \quad (1)$$

где q_e – константа прямой реакции фотоионизации кластера металлической основы, м³/с;

$n_{кл}$ – концентрация кластеров металлической основы, м⁻³;

dt – время взаимодействия фотона с кластером металлической основы, с.

Константа прямой реакции фотоионизации кластера металлической основы

$$q_e = \sigma_v c, \quad (2)$$

где c – скорость света, м/с;

σ_v – сечение поглощения, которое в этом случае определяется по формуле, м²:

$$\sigma_v = 7,91 \cdot 10^{-22} \frac{n^*}{Z^{*2}} \left(\frac{A_g}{h\nu} \right)^3 g_r, \quad (3)$$

где n^* и Z^* – соответственно эффективное главное квантовое число и эффективный заряд кластера металлической основы;

g_r – постоянная Гаунта, которая для большинства веществ примерно равна единице;

$h\nu$ – энергия фотона, эВ;

A_g – работа выхода электрона из материала основы, эВ.

Концентрация кластеров металлической основы

$$n_{кл} = \frac{1}{d_{кл}^3}, \quad (4)$$

где $d_{кл}$ – диаметр кластера металлической основы, м.

Время взаимодействия фотона с кластером металлической основы определяется из отношения:

$$dt = \frac{\delta}{c}, \quad (5)$$

где δ – толщина скин-слоя, м:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\sigma\mu}}, \quad (6)$$

где μ – абсолютная магнитная проницаемость, ГН/м;

ω – частота, которая определяется по формуле, Гц:

$$\omega = \nu 2\pi = \frac{h\nu}{h} 2\pi, \quad (7)$$

где h – постоянная Планка, Дж·с;

σ – удельная проводимость, 1/Ом:

$$\sigma = \frac{1}{\rho}, \quad (8)$$

где ρ – электрическое сопротивление, Ом.

Зная коэффициент потенциальной ионно-электронной эмиссии можно определить площадь металлической основы, необходимую для нейтрализации положительно заряженных ионов на поверхности изделий из диэлектрических материалов:

$$S_1 = \frac{S_{изд}}{\gamma}, \quad (9)$$

где S_1 – площадь металлической основы, необходимая для нейтрализации, м²;

$S_{изд}$ – суммарная площадь изделий, м².

Исходя из этого выражения, можно рассчитать оптимальное количество изделий n_{opt} , загружаемых в вакуумную камеру, при котором обеспечивается высокое качество покрытий и максимальная производительность процесса:

$$n_{opt} = \frac{S_1}{S_2} \gamma, \quad (10)$$

где S_1 – площадь металлической основы, необходимая для нейтрализации, м²;

S_2 – площадь опорной поверхности одного изделия, м².

При этом изделия рекомендуется устанавливать равномерно по всей площади металлической основы (загрузочного стола вакуумной камеры).

При количестве устанавливаемых изделий $n > n_{\text{опт}}$ не обеспечивается нейтрализация положительного заряда, образующегося на поверхности конденсации диэлектрического изделия. В результате производительность процесса значительно уменьшается вследствие падения скорости осаждения покрытия. Кроме того, вследствие превалирования в этом случае процесса объемной конденсации покрытие осаждается в виде рыхлого слоя нейтральных частиц и не пригоден для практического применения.

При количестве устанавливаемых изделий $n < n_{\text{опт}}$ производительность процесса также уменьшается, так как уменьшается количество готовых изделий, получаемых за один цикл нанесения покрытия.

Равномерность установки изделий по всей площади металлической основы обеспечивает равную производительность нанесения покрытия на все изделия за счет равных условий нейтрализации положительного заряда для каждого изделия загрузочной партии.

Для проверки предложенной методики расчета оптимального количества изделий, на установке вакуумно-плазменного напыления УРМ 3.279.079 производилось нанесение покрытия TiN на квадратные изделия со стороной $a = 2 \cdot 10^{-2}$ м из стекла марки М1 ГОСТ 111-2001. Толщина изделий была равна $4 \cdot 10^{-3}$ м. Предварительная подготовка изделий заключалась в последовательной промывке их в моющем средстве «Эффекта 1» на основе ПАВ и дисциплированной воде с последующей сушкой в сушильном шкафу при 150°C . Перед установкой в вакуумную камеру изделия дополнительно протирались бязью смоченной в спирте-ректификате. Подготовленные изделия равномерно устанавливались в вакуумной камере на квадратной металлической основе загрузочного стола со стороной $b = 4 \cdot 10^{-1}$ м и приводом от ввода вращения установки (рис. 2). После вакуумирования изделия подвергались бомбардировке ионами аргона в течение 7 мин при ускоряющем напряжении $U = 1500$ В. Нанесение покрытия TiN производилось при следующих режимах: ток дуги $I_d = 90$ А, ускоряющее напряжение $U = 50$ В, давление реакционного газа (азота) $P = 3,2 \cdot 10^{-2}$ Па. Время нанесения покрытия t составляло 20 мин.

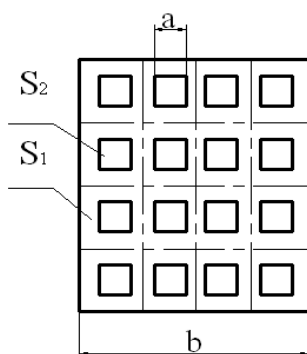


Рис. 2. Установка изделий на металлической основе в вакуумной камере

Для определения оптимального количества изделий $n_{\text{опт}}$, устанавливаемых в вакуумную камеру, предварительно рассчитывался коэффициент потенциальной ионно-электронной эмиссии γ .

На основании расчетных и экспериментальных данных для пары материал катода (Ti) – материал металлической основы (Fe) по формуле (1) получено значение $\gamma = 0,1$.

Тогда по формуле (10):

$$n_{\text{опт}} = \frac{S_1}{S_2} \gamma = \frac{b^2}{a^2} \gamma = \frac{(4 \cdot 10^{-1})^2}{(2 \cdot 10^{-2})^2} \cdot 0,1 = 40.$$

Кроме того, были проведены эксперименты для условий $n < n_{\text{опт}}$ и $n > n_{\text{опт}}$.

После нанесения покрытия контролировали толщину покрытия h и определяли скорость его осаждения v ($v = h/t$), а также рассчитывали производительность процесса по формуле

$$\Pi = \frac{nh}{t}. \quad (11)$$

Оценивался также внешний вид покрытия и прочность его сцепления с поверхностью изделия методом истирания. Полученные данные представлены в таблице 1.

Как видно из таблицы при оптимальном количестве изделий, устанавливаемых в вакуумной камере, обеспечивается как высокая производительность процесса, так и качественные параметры покрытия. При $n > n_{\text{опт}}$ производительность процесса уменьшается, а качество получаемых покрытий не позволяет их использовать ни в качестве защитных, ни в качестве декоративных. При $n < n_{\text{опт}}$ качество покрытий и скорость осаждения являются высокими, но производительность процесса снижается из-за уменьшения количества загружаемых изделий. Поэтому такой процесс нельзя оценить как производительный и энергоэффективный.

Таблица 1 – Результаты экспериментальных исследований изделий с покрытиями

| Кол-во изделий n | Толщина покрытия h, мкм | Скорость осаждения покрытия v, мкм/мин | Производительность процесса П | Внешний вид | Прочность сцепления |
|------------------|-------------------------|--|-------------------------------|---------------------------------------|-----------------------|
| 20 | 0,8 | 0,04 | 0,8 | Глянцевое, блеск равномерный | Не отслаивается |
| 30 | 0,8 | 0,04 | 1,2 | Глянцевое, блеск равномерный | Не отслаивается |
| 40 | 0,8 | 0,03 | 1,6 | Глянцевое, блеск равномерный | Не отслаивается |
| 50 | 0,6 | 0,04 | 1,5 | Матово-глянцевое, блеск неравномерный | Частично отслаивается |
| 60 | 0,45 | 0,022 | 1,35 | Матовое, блеск неравномерный | Частично отслаивается |

К дополнительным преимуществам предложенного способа оптимизации загрузки относятся: увеличение толщины наносимого покрытия; повышение качества покрытий за счет снижения пористости, а также увеличения плотности покрытия и прочности его сцепления с основой; повышение износостойкости покрытий; оптимизация работы вакуумно-плазменного оборудования и повышение его энергоэффективности.

Таким образом, разработанная методика оптимизации загрузки рабочего пространства вакуумной камеры при формировании вакуумно-плазменных покрытий на изделиях из диэлектрических материалов обеспечивает получение вакуумно-плазменных покрытий с высоким уровнем функциональных свойств и эксплуатационных характеристик при высоком потенциале производительности работы оборудования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Верещака А.С., Третьяков И.П. Режущие инструменты с износостойкими покрытиями. – М.: Машиностроение, 1989. – 192 с.
2. Емельянов В.А., Иванов И.А., Мрочек Ж.А. Вакуумно-плазменные способы формирования защитных и упрочняющих покрытий. – Мн.: Издательство НПО «Интеграл», 1998. – 285 с.
3. Стекло с модифицированными титановыми покрытиями / Р.Р. Суркин, Л.Н. Бондарева, О.Е. Геранчева, Н.В. Темнякова // Стекло и керамика. – 2008. – №11. – С.3-4.
4. Добрецов Л.И., Гомоюнова М.В. Эмиссионная электроника. – М.: Наука, 1966, – 564 с.