

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОРИСТОСТИ ВАКУУМНЫХ ЭЛЕКТРОДУГОВЫХ КОНДЕНСАТОВ

*Белорусская государственная политехническая академия
Минск, Беларусь*

Все вакуумно-плазменные способы формирования покрытий основаны на конденсации компонентов паровой (плазменной) фазы при бомбардировке обработки поверхности частицами высоких энергий. Конденсация атомов и ионов на подложке происходит при температуре ниже точки плавления основных компонентов материала катода ($T < 0,5 T_{пл}$). Фазовые превращения в этом случае протекают в неравновесных условиях, когда скорость конденсации намного больше скорости испарения. Наличие таких условий обеспечивает образование в осаждаемых покрытиях метастабильных фаз, а также возникновение избыточного объема, что способствует образованию микропор типа решеточных вакансий, сквозных пор и пустот [1]. Кроме того, при формировании покрытий из плазмы вакуумной дуги происходит дополнительное образование пор из-за наличия в пароплазменном потоке капельной составляющей. Высокая пористость вакуумно-плазменных покрытий может стать основной причиной их коррозии, снижения износостойкости в условиях сухого трения и ухудшения декоративных свойств. Уменьшение пористости обычно обеспечивают путем оптимизации параметров осаждения покрытий или введением дополнительных технологических операций [2].

Для исследования пористости вакуумных электродуговых покрытий TiN использовались образцы из стали 12X18H10T и алюминиевого сплава Д16Т с размерами 40x25x10 мм, которые обрабатывались вначале шлифованием, а затем электроимпульсным полированием (R_a 0,1...0,15 мкм). Нанесение покрытий TiN проводилось с использованием вакуумной установки УРМЗ.279.048. Очистка поверхности образцов ионами титана осуществлялась при ускоряющем напряжении 1000 В и токе дуги 90 А в течение 60 с. Параметры осаждения покрытия изменялись в следующих пределах: ток дугового разряда $I=80...130$ А; напряжение на подложке $U_n=0...200$ В; давление реакционного газа (азота) $P = (2...14) \times 10^{-2}$ Па. Толщина покрытия составляла 3...4 мкм.

Пористость покрытия определялась методом индикаторных паст (ГОСТ 9.302-88). Для повышения производительности и облегчения процесса считывания пор в состав индикаторной пасты добавлялся поливинилацетатный клей (ПВА), который смешивался с индикаторной пастой [3].

Добавление в состав индикаторной пасты клея ПВА приводит к значительному (в десятки раз) увеличению сил сцепления пасты после ее застывания с контролируемым покрытием. При этом полностью исключается осыпание застывшего слоя индикаторной пасты с контролируемых поверхностей, особенно большой площади или сложной конфигурации (наклонных, винтовых, ребристых и т. п.). Использование поливинилацетатного клея дает возможность исключить из состава применяемых паст некоторые составляющие (наполнители). Это приводит к упрощению приготовления паст и улучшению их механических свойств. Введение в состав индикаторной пасты клея ПВА обеспечивает улучшение отражательной способности исследуемой поверхности, что является особенно важным для проведения автоматического считывания количества пор в покрытии.

Анализ результатов исследований (рис. 1) показывает, что с увеличением тока дуги пористость покрытия увеличивается и начинает интенсивно расти при достижении величины тока 100 А. Можно предположить, что это связано с увеличением в плазменном потоке содержания капельной фазы, доля которой значительно возрастает в диапазоне 100...140 А [4]. Большое количество капель и макроблоков материала катода, конденсирующихся на подложке, приводит к повышенной дефектности покрытия и увеличению в нем сквозной пористости из-за эффектов затенения и неплотного срастания элементов структуры [5]. На алюминиевых подложках более интенсивный рост пористости происходит, очевидно, из-за подплавления поверхности, вызванного увеличением теплового потока в направлении подложки.

С увеличением напряжения на подложке пористость уменьшается, что связано, очевидно, с формированием более плотной структуры покрытия и интенсификацией процесса распыления пиков микронеровностей из-за увеличения энергии ионов. Однако при напряжении примерно, около 100 В влияние этих факторов резко снижается, и поэтому при дальнейшем повышении потенциала на подложке пористость покрытия на стальных подложках практически не уменьшается, а на алюминиевых подложках даже несколько увеличивается.

Зависимость пористости от давления реакционного газа носит экстремальный характер. С увеличением давления в вакуумной камере до 8×10^{-2} Па пористость покрытия уменьшается, что связано с уменьшением содержания капельной фазы в продуктах эрозии материала катода [5]. Дальнейшее повышение давления азота приводит к тому, что нитрид титана частично образуется не на поверхности конденсации, а в газовой фазе [1] и осаждается на поверхность в виде неомогенного пористого покрытия. Кроме того, избыток реакционного газа приводит к появлению газовой пористости, связанной с замуровыванием азота в объеме формирующегося конденсата. В результате пористость конденсата TiN начинает увеличиваться, а покрытие теряет свою работоспособность.

В результате исследований установлено, что преобладающее влияние на формирование сквозной пористости покрытия оказывает каплевая составляющая плазменного потока материала катода. Основным методом уменьшения каплевой фазы является сепарация плазменного потока. Ее можно достичь, например, с использованием принципов плазмооптики [6]. Однако разработанные криволинейные плазмооптические системы имеют невысокий коэффициент пропускания, особенно для тяжелых ионов, что резко снижает производительность процесса, а это с учетом высокой стоимости таких систем препятствует широкому использованию их на практике.

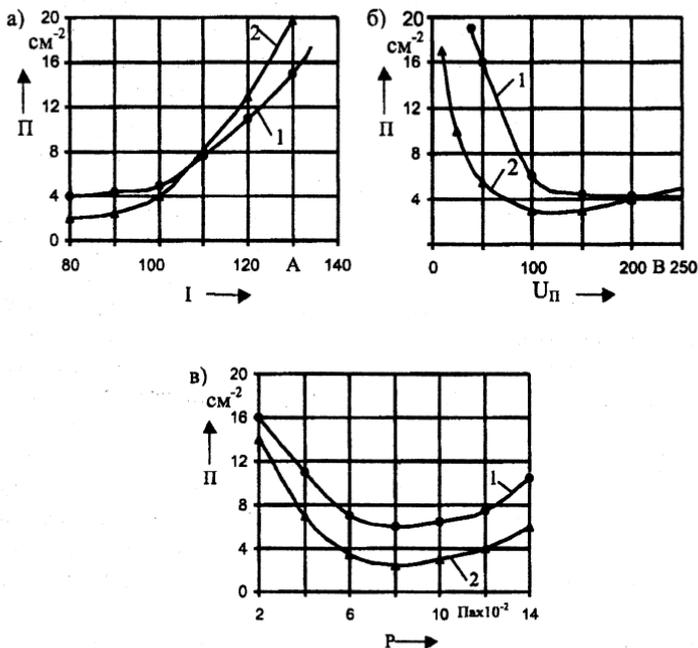


Рис. 1. Зависимость пористости покрытия TiN от тока дуги при $P = 8 \times 10^{-2}$ Па и $U_{\text{п}} = 100$ В (а); напряжения на подложке при $P = 8 \times 10^{-2}$ Па и $I = 100$ А (б); давления реакционного газа при $I = 100$ А и $U_{\text{п}} = 100$ В (в): подложка – сталь 12X18H10T (1) и алюминиевый сплав Д16Т (2).

Более эффективной и дешевой является сепарация плазменного потока методом экранирования. Данный метод основан на использовании экрана обтекаемой формы, находящегося под потенциалом анода и установленного по оси испарителя на расстоянии от него 40...100 мм. Результаты экспериментов с применением экрана показывают, что пористость покрытия уменьшается на 30...65% в зависимости

от параметров процесса осаждения покрытия. Оставшаяся пористость, очевидно, связана с факторами, не зависящими от режимов осаждения покрытия. К этим факторам в первую очередь относится исходная шероховатость поверхности подложки, причем на пористость влияют как высота, так и форма микронеровностей. Как показано в работе [7], обработка шлифованных подложек с Ra 0,3...0,5 мкм электроимпульсным полированием в течение 4...5 мин. снижает пористость покрытия в 9...10 раз, что объясняется как снижением высоты микронеровностей (в 4...5 раз), так и формированием благоприятного микрорельефа поверхности с большими радиусами закругления вершин и впадин микронеровностей, что сводит к минимуму влияние эффекта затенения на пористость покрытия.

Еще одним фактором, влияющим на пористость, является толщина покрытия. Результаты определения количества сквозных пор при различных толщинах покрытия TiN и способах предварительной подготовки поверхности представлены в табл. 1.

Таблица 1

Пористость покрытий TiN

Способ подготовки поверхности	Шероховатость поверхности Ra, мкм	Параметры покрытия TiN	
		Толщина h, мкм	Пористость П, см ⁻²
Электроимпульсное полирование	0,1...0,15	1	14
		3	4
		5	3
		7	2
Шлифование абразивным кругом	0,4...0,6	1	36
		3	12
		5	9
		7	7

Анализ результатов показывает, что с увеличением толщины покрытия количество сквозных пор уменьшается. Покрытия толщиной около 1 мкм характеризуются значительной мелкой пористостью. С увеличением толщины покрытия до 3 мкм пористость резко снижается, а при дальнейшем наращивании толщины уменьшается незначительно.

Оставшееся небольшое количество сквозных пор объясняется, очевидно, дефектами обработки поверхности подложки. Практически беспористыми покрытия становятся при толщине более 10...12 мкм.

Таким образом, пористость вакуумно-плазменного покрытия определяется в основном параметрами процесса осаждения, толщиной покрытия и шероховатостью поверхности подложки и практически не зависит от материала подложки. При этом сепарация плазменного потока методом экранирования снижает пористость

покрытия на 30...65%. На пористость покрытия оказывает влияние как высота, так и форма микронеровностей поверхности подложки. Для получения минимальной пористости шероховатость подложки должна быть в пределах $Ra\ 0,08\ \dots\ 0,16\ \mu\text{м}$, а толщина наносимого покрытия превышать 3 $\mu\text{м}$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Закономерности формирования покрытий в вакууме / В.А. Барвинок, В.И. Богданович, Б.С. Митин и др. // ФХОМ. – 1986. – № 5. – С. 92-97. 2. Транспортировка плазменных потоков в криволинейной плазмооптической системе / И.И. Аксенов, В.А. Белоус, В.Г. Падалка, В.М. Хороших // Физика плазмы. – 1978. – Т. 4. № 4. – С. 758-763. 3. А.с. 1704029 СССР, МКИЗ G01N 15/08. Способ определения пористости неорганических покрытий на металлических подложках / Е.В. Макаревич, В.И. Плахотнюк, С.А. Иващенко, И.С. Фролов. – № 4802969/25; Заявлено 19.03.90; Опубл. 07.01.92, Бюл. № 1 // Изобретения. – 1992. – №1. – С. 171. 4. Карпенко Г.Д., Лойко В.А. Исследование структуры покрытий на основе нитрида титана // Известия АН БССР. Сер. физ. техн. наук. – 1986. – № 1. – С. 31–34. 5. Палатник Л.С., Черемской П.Г., Фукс М.Я. Поры в пленках. – М.: Энергоиздат, 1982. – 216 с. 6. Об условиях протекания химических реакций при конденсации потоков металлической плазмы / И.И. Аксенов, В.Г. Брень, В.Г. Падалка, В.М. Хороших // ЖТФ. – 1978. – Т. 48. № 6. – С. 1165-1169. 7. Синькевич Ю.В., Фролов И.С., Симонович Л.П. Использование электроимпульсного полирования для повышения качества ионно-плазменных покрытий // Упрочнение и защита поверхностей газотермическим и вакуумным напылением: Материалы III междунар. науч.-техн. конф., Киев, окт. 1990 г. / АН УССР. Ин-т электросварки им. Е.О. Патона. – Киев, 1991. – С. 111–115.

УДК 621.792

П. И. Ящерицын, А. П. Ракомсин, И. П. Филонов, Л. М. Кожуро

ПОВЫШЕНИЕ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ ИЗДЕЛИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

Физико-технический институт НАН Беларуси

Государственное предприятие "МАЗ"

Белорусская государственная политехническая академия

Белорусский государственный аграрный технический университет

Минск, Беларусь

Научно-технический прогресс во всех отраслях экономики определяется техническим уровнем машиностроения. В Республике Беларусь оно по праву занимает