

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ

УДК621.793.1

Фролов И.С., Иващенко С.А., Мрочек Ж.А.

ТЕХНОЛОГИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ВАКУУМНО-ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ НА ДЕТАЛЯХ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Беларусь Алюминий и его сплавы находят применение в различных отраслях промышленности. Более широкое внедрение алюминиевых сплавов сдерживается низкой твердостью и износостойкостью поверхностного слоя деталей, изготавливаемых из данных материалов. Указанные недостатки могут быть устранены путем создания на поверхности деталей упрочняющего защитного слоя [1]. К наиболее перспективным технологическим способам поверхностного упрочнения деталей следует отнести вакуумно-плазменный [2]. Однако процесс формирования вакуумно-плазменных защитных покрытий на поверхностях деталей из алюминия и его сплавов до настоящего времени не нашел широкого применения в промышленности из-за специфических свойств этих материалов (низкая температура плавления, высокий коэффициент термического расширения, наличие устойчивой окисной пленки). Поэтому разработка технологии формирования вакуумно-плазменных покрытий на деталях из алюминиевых сплавов является актуальной.

Сущность вакуумно-плазменного способа формирования покрытий заключается в том, что генерация плазменного потока обеспечивается за счет эрозии одного из электродов в вакуумной электрической дуге. При этом имеет место самогенерация, т.е. среда, необходимая для поддержания разряда, возникает вследствие испарения материала электрода, и дуга горит в его парах. Процесс испарения сопровождается интенсивной ионизацией, степень которой зависит от материала эродирующего электрода, и может составлять от 12...15% для легкоплавких металлов до 50...100% для тугоплавких металлов. Такая высокая степень ионизации позволяет управлять потоком, во-первых, на стадии его ускорения (например, использование криволинейных плазмодов или магнитных островков позволяет полностью избавиться от микрокапельной фазы в потоке) и, во-вторых, на стадии его конденсации. Процесс взаимодействия потока с основой сводится к протеканию взаимосвязанных физических процессов конденсации, внедрения в поверхность и распыления.

К достоинствам способа следует отнести универсальность, позволяющую использовать основы из различных по физико-механическим свойствам материалов высокие энергии частиц, обеспечивающие необходимую адгезию покрытий; сравнительно низкие температуры процесса и возможность их регулировки, в том числе за счет импульсного режима работы испарителей; достаточно высокую производительность способа; простоту оборудования и возможность получения композиционных покрытий без его переналадки.

Для деталей из алюминиевых сплавов была разработана технология формирования покрытий, которая учитывает их особенности и в общем случае включает следующие этапы: предварительную подготовку поверхности; установку детали в вакуумной камере; откачку вакуумной камеры; очистку ионами инертных газов; очистку ионами материала катода; конденсацию покрытия. Этап конденсации покрытия в свою очередь состоит из нанесения подслоя титана, переходного и рабочего слоев покрытия.

Предварительная подготовка поверхности. Включает механическое шлифование и полирование на известных для алюминиевых сплавов режимах обработки [3]. Целью данного этапа является обеспечение шероховатости поверхности не выше Ra 1,25...0,63 мкм, так как при большей высоте микронеровностей не удастся обеспечить необходимое качество покрытий из-за преваляющего осаждения ионов металла на пики микронеровностей. Это, как правило, приводит к значительной неравномерности покрытия, вплоть до нарушения его сплошности, и большой пористости.

Возможно также в качестве завершающего этапа подготовки электроимпульсное полирование деталей из алюминия и его сплавов в водных растворах FeCl_3 и NH_4Cl [4].

После механической обработки производят очистку и обезжиривание деталей в моющих растворах на основе ПАВ с последующей промывкой в двух водах, например, холодной проточной и дистиллированной воде. Далее для удаления остатков влаги производится сушка деталей горячим воздухом в сушильном шкафу при температуре $60\text{...}150^\circ\text{C}$, а непосредственно перед установкой в вакуумную камеру протирка поверхностей безворсовой тканью, смоченной в спирте-ректификате.

Установка детали в вакуумной камере. Способ установки определяется формой и габаритными размерами деталей. Для установки мелкоразмерных деталей используются карусели, входящие в комплектацию вакуумных установок, которые обеспечивают планетарное движение деталей в процессе напыления. Для установки крупногабаритных деталей типа тел вращения рекомендуется использовать столики, обеспечивающие расположение детали по оси плазменного потока и кинематически связанные с вводом вращения вакуумной камеры, что обеспечивает вращательное движение детали в процессе напыления.

Установку длиномерных деталей типа направляющих рекомендуется производить по оси плазменного потока без вращения в процессе напыления, а необходимая равномерность покрытия в этом случае обеспечивается за счет специальных технологических приемов, которые, однако, имеют ряд существенных недостатков. Поэтому для достижения этой цели предлагается использовать непрозрачные экраны обтекаемой формы, находящиеся под потенциалом анода и устанавливаемые по оси испарителя на определенном от него расстоянии. Степень равномерности покрытия в этом случае регулируется изменением расстояния катод-экран и выбирается с учетом компромисса между производительностью и комплексом защитно-декоративных свойств покрытия.

Откачка вакуумной камеры. Производится до достижения необходимого вакуума (остаточного давления) в камере. Данный параметр зависит от конструкции и особенностей вакуумной установки. Для установки УРМЗ.279.048, например, рекомендуется производить откачку камеры до давления $(1\text{...}3)\times 10^{-3}$ Па.

Очистка ионами инертных газов. Этот этап не является обязательным во всех случаях. Его можно рекомендовать для деталей с тонкими стенками или малой площадью поверхности, а также с целью удаления дефектного поверхностного слоя (ионное полирование).

Режимы очистки: рабочий газ — аргон; ускоряющее напряжение $1,5\text{...}4$ кВ; ток основы 100 мА; ток солениода $1,5\text{...}3$ А; давление в камере $(2,66\text{...}6,65)\times 10^{-2}$ Па; время обработки — $15\text{...}30$ мин. Оборудование — газовый источник ионов с холодным катодом типа «радикал».

Следует отметить, что процесс очистки ионами инертных газов характеризуется малыми температурами разогрева детали, что не позволяет полностью исключить из техпроцесса ионную бомбардировку, так как для качественной конденсации покрытия необходим разогрев поверхностного слоя детали до температуры не ниже $150\text{...}200^\circ\text{C}$ [5].

Очистка ионами материала катода. На данном этапе, называемом также ионной бомбардировкой, происходит окончательная очистка поверхности детали от различных загрязнений, снятие окисной пленки, активация поверхностного слоя, внедрение и диффундирование атомов титана в основу с образованием интерметаллических соединений и разогрев поверхностного слоя до необходимой температуры. Этот этап особенно важен для материалов с малой теплостойкостью, в том числе алюминиевых сплавов, так как с одной стороны необходимо разрушить окисную пленку и провести активацию поверхности, а с другой стороны не допустить перегрева детали, что повлечет за собой подплавление поверхностного слоя и потерю геометрической формы. Поэтому ионную бомбардировку деталей из алюминиевых сплавов рекомендуется проводить в импульсном режиме.

Для избежания перегрева деталей в процессе ионной бомбардировки предлагается использовать метод косвенного нагрева. Суть его заключается в том, что в вакуумной камере устанавливаются специальные термоэлементы, запитанные от внешнего источника тока. При этом нагрев деталей происходит за счет теплоизлучения элементов. Преимуществом данного метода является то, что разогрев деталей совмещается с откачкой вакуумной камеры и тем самым сокращается время цикла нанесения покрытия. Кроме того, исключается подплавление поверхности деталей вследствие концентрации теплового потока в тонком поверхностном слое. Применение метода косвенного нагрева позволяет полностью отказаться от ионной бомбардировки (при использовании газового источника ионов) или свести ее время к безопасному минимуму.

После очистки поверхности ионами материала катода может выдерживаться стабилизирующая пауза (5...20 с) для выравнивания температуры по сечению детали и охлаждения ее до 150 - 300°C. Это объясняется тем, что нанесение покрытия на деталь, нагретую до температуры более 300°C приводит к образованию значительных напряжений в покрытии из-за разности коэффициентов линейного расширения материалов детали и покрытия, а охлаждение детали ниже температуры 150°C приводит к ухудшению качества покрытия, так как снижается адгезия покрытия к основе.

Конденсация покрытия. На данном этапе технологического процесса первоначально производится нанесение подслоя титана. Это обеспечивает увеличение адгезионной прочности покрытия за счет образования переходного слоя вследствие частичной диффузии титана в основу и релаксацию внутренних напряжений при формировании покрытия. После нанесения адгезионного подслоя титана наносится переходной слой, представляющий собой смесь твердого раствора α -Ti и нитрида титана. Данный слой обеспечивает снижение внутренних напряжений и уменьшает вероятность образования поверхностных микротрещин в покрытии. Затем наносится наружный рабочий слой из нитрида титана стехиометрического состава. Общая толщина покрытия рекомендуется в пределах 8... 10 мкм.

Технологические режимы очистки поверхностей деталей из алюминиевых сплавов и нанесения покрытия TiN представлены в таблице 1. Времена, указанные в таблице, соответствуют напылению прямым потоком без вращения. При использовании вращения табличные значения следует увеличивать в 2... 2,5 раза.

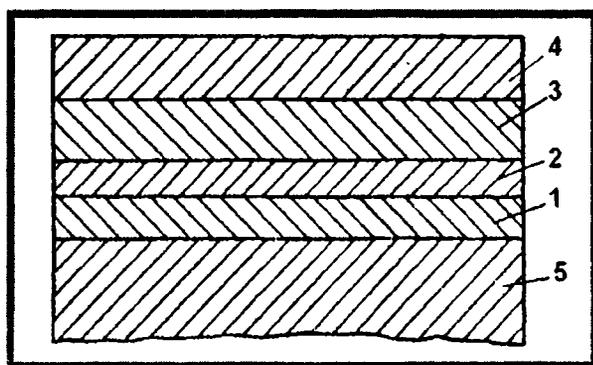


Рисунок- 1- Схема многослойного покрытия для деталей из алюминиевых сплавов: 1 - адгезионный слой; 2 -промежуточный слой; 3 - рабочий слой; 4 - внешний слой из углеродной алмазоподобной пленки; 5 - основа

Для деталей, из алюминиевых сплавов разработано многослойное покрытие (рис. 1), включающее в зависимости от функционального назначения детали три или четыре слоя.

Таблица 1. Режимы нанесения покрытий на детали из алюминиевых сплавов

Режимы нанесения покрытия	Этапы формирования покрытия			
	Ионная очистка	Адгезионный подслой Ti	Переходной слой α -Ti + TiN	Рабочий слой TiN
Давление в рабочей камере P, Па	(1...3) $\times 10^{-3}$	(1...3) $\times 10^{-3}$	(1...7) $\times 10^{-2}$	(7...9) $\times 10^{-2}$
Ток дугового испарителя I, А	50-130	70-100	70-100	70-100
Напряжение на основе U, В	600-1500	50-100	50-100	50-150
Режим и время проведения операции	Импульсно 40-90 с	Непрерывно 2-3 мин	Непрерывно 2-3 мин	Импульсно 40-50 мин или непрерывно 20-25 мин

Трехслойное покрытие включает адгезионный слой из тугоплавкого металла 1, промежуточный слой из смеси тугоплавкого соединения 2 и рабочий слой из металлоподобного тугоплавкого соединения 3, нанесенных на основу 5, при этом толщины адгезионного и промежуточного слоев определяются выражениями:

$$d_1 = \left(\frac{1}{18} - \frac{4}{5} \right) d_3, \quad d_2 = \left(\frac{1}{18} - \frac{5}{4} \right) d_3,$$

$$d_1, d_2 \leq 5 \text{ мкм},$$

где d_1 - толщина адгезионного слоя, мкм;
 d_2 - толщина промежуточного слоя, мкм;
 d_3 - толщина рабочего слоя, мкм,

а материалы адгезионного, промежуточного и рабочего слоев должны удовлетворять соотношению

$$H_1 < H_2 < H_3,$$

где H_1 - микротвердость материала адгезионного слоя, МПа;
 H_2 - микротвердость материала промежуточного слоя, МПа;
 H_3 - микротвердость материала рабочего слоя, МПа.

Применение адгезионного слоя, состоящего из одного или нескольких металлов (титана, циркония, хрома, молибдена, гафния, вольфрама, тантала, ванадия или ниобия) дает возможность улучшить адгезию наносимого покрытия к основе, так как межъядерные расстояния у данных металлов и алюминиевой основы очень близки, и данные металлы легко диффундируют в алюминий.

Промежуточный слой, состоящий из смеси, одного или нескольких металлов с их металлоподобными тугоплавкими соединениями, является переходным слоем, дающим постепенность изменения свойств покрытия от слоя чистого металла или смеси металлов до наружного рабочего слоя из металлоподобного тугоплавкого соединения или смеси металлоподобных тугоплавких соединений.

Наружный рабочий слой из металлоподобного тугоплавкого соединения или смеси нескольких металлоподобных тугоплавких соединений выполняет свое назначение как износостойкое и антифрикционное покрытие при нанесении его на алюминиевую основу с температурой не более 300°C, и при наличии в покрытии адгезионного и промежуточного слоев. Величина этих слоев ограничена 5 мкм, так как этого достаточно для выполнения их функционального назначения, а нанесение слоев толщиной более 5 мкм ведет к снижению производительности процесса из-за увеличения времени напыления, а также к ухудшению качества покрытия за счет образования значительных остаточных напряжений в слое. При этом толщина адгезионного и промежуточного слоев не должна превышать 5/4 толщины рабочего слоя, чтобы антифрикционные свойства всего покрытия соответствовали свойствам рабочего слоя. При толщине этих слоев менее 1/18 толщины рабочего слоя резко ухудшается износостойкость покрытия из-за уменьшения демпфирующих свойств адгезионного и промежуточного слоев.

При высоких требованиях к твердости и несущей способности поверхностного слоя используется четырехслойное покрытие, которое состоит из адгезионного слоя 1, промежуточного слоя 2 из смеси тугоплавкого металла и его металлоподобного соединения, рабочего слоя 3 из металлоподобного тугоплавкого соединения и внешнего слоя 4 из алмазоподобной углеродной пленки, толщина которого определяется из выражения:

$$d_4 = \left(\frac{1}{18} - \frac{5}{4} \right) d_3,$$

где d_3, d_4 (мкм) - толщина рабочего и дополнительного слоев соответственно.

Причем после осаждения рабочего слоя его подвергают бомбардировке ионами инертного газа, после чего на него осаждают дополнительный слой из углеродной алмазоподобной пленки. В этом случае достигается хорошая адгезия внешнего слоя с рабочим слоем и снижается шероховатость поверхности. Нанесение углеродной алмазоподобной пленки производится путем осаждения углерода из низкотемпературной плазмы, когда высокие давления и температура, необходимые для образования алмазной структуры, достигаются при столкновении с основой ионов углерода, обладающих высокой кинетической энергией. Наличие на основе слоя тугоплавкого металлоподобного соединения позволяет увеличить прочность сцепления покрытия с основой, поскольку непосредственное нанесение углеродной алмазоподобной пленки на алюминиевую основу менее эффективно по следующим причинам:

- несоизмеримость размеров радиусов атомов алюминия и углерода (соответственно 0,143 и 0,077 нм), поэтому на алюминиевую основу первоначально наносится адгезионный слой, например, слой титана у которого радиус атома равен 0,147 нм;
- углерод не образует с алюминием твердого раствора и химического соединения, что затрудняет процесс диффузии атомов материала покрытия в основу при нанесении углеродной алмазоподобной пленки на алюминий. Нанесение этой пленки на рабочий слой из тугоплавкого металлоподобного соединения, (карбид, нитрид и т. п.), имеющего химиче-

ское сродство с углеродом, обеспечивает качественное нанесение углеродной алмазоподобной пленки.

Кроме того, наличие на алюминиевой основе промежуточных слоев, позволяет осуществить переход от мягкой основы к сверхтвердому внешнему слою из углеродной алмазоподобной пленки. Это увеличивает жесткость и адгезию пленки к основе за счет демпфирующих свойств многослойного покрытия и более благоприятного распределения напряжений по сечению покрытия.

Осаждение внешнего слоя из углеродной алмазоподобной пленки на основу из алюминия и ранее нанесенные слои, обеспечивает получение твердости поверхностного слоя детали порядка 10000 МПа при высокой адгезии и хороших эксплуатационных свойствах покрытия.

Таким образом, разработанная технология и конструкции многослойных покрытий обеспечивают формирование качественных вакуумно-плазменных покрытий на деталях из алюминия и его сплавов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Спиридонов Н.В., Кобяков О.С., Куприянов И.Л. Плазменные и лазерные методы упрочнения деталей машин. – Мн.: Высшая школа, 1988. – с. 2. Эксплуатационные характеристики тонкопленочных покрытий на немагнитных деталях/ С.А. Иващенко, А.М. Самаль, В.И. Плехотнюк и др.// Машиностроение. – Мн., 1988. - Вып. 13. – С. 81-86. 3. Справочник технолога машиностроителя. В 2-х т. Т. 2 / Под ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. – М.: Машиностроение, 1985. – 496 с. 4. Исследование и внедрение технологии электролитно-гшазменной обработки конструкционных сталей и алюминия: Отчет о НИР (заключит.) / Бел. политехн. ин-т; Рук. В.К. Станишевский; № 01.88.0014649. — Мн., 1990. — 68 с. 5. Волин Э.М., Суворов И.С., Булычев Г.Т. Нанесение ионно-плазменных износостойких покрытий на деформирующий инструмент // Современное электротермическое оборудование для поверхностного упрочнения деталей машин и инструментов: Тез. докл. 1-го Всесоюзного науч.-технич. симпозиума, Саратов, 30 мая-3 июня 1988 г. — М.: Информэлектро, 1988. — С. 27-28.

УДК 621

Шелез В.В., Журкевич Н.И.

ВАКУУМНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ НАНЕСЕНИЯ КОМБИНИРОВАННЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ

*Сморгонский завод оптического станкостроения Сморгонь,
Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

До настоящего времени оборудованием, способным наносить функциональные покрытия на основе Ti (и его соединений с азотом и углеродом) и тетраэдрического аморфного углерода, являлось вакуумная установка УВНИПА-1-001. Для данной вакуумной установки характерны следующие недостатки, а именно:

- маленькая зона нанесения углеродного покрытия (не более 60 мм);
- углеродное покрытие наносится на прямом потоке без сепарации;
- крайне низкая надежность работы углеродного источника;
- маленький запас материала графитового катода;
- возможность нанесения из стационарного дугового испарителя только одного покрытия.

Все вышеперечисленные недостатки устранены в предлагаемой системе.

Вакуумная система для нанесения комбинированных функциональных тонкопленочных покрытий на основе Ti (и его соединений с азотом и углеродом) и тетраэдрического аморфного углерода (рисунок 1) состоит из источника сепарированного по массам потока металлических ионов, низкоэнергетического ионного источника и источника сепарированного по массам потока ионов углерода. Для обработки поверхности образцов перед осаждением покрытия, а также для модификации пленки в процессе работы в систему введен низкоэнергетический (50 – 150 эВ) ион-