ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

«Физическая мезомеханика.

**Материалы с многоуровневой иерархически
организованной структурой и интеллектуальные
производственные технологии»,**

**посвященная 90-летию со дня рождения
основателя и первого директора ИФПМ СО РАН
академика Виктора Евгеньевича Панина**

в рамках

**Международного междисциплинарного симпозиума
«Иерархические материалы: разработка и приложения
для новых технологий и надежных конструкций»**

**5–9 октября 2020 года
Томск, Россия**

Томск
Издательство ТГУ
2020

DOI: 10.17223/9785946219242/284

**ВЛИЯНИЕ ПЛОТНОСТИ ТОКА МИКРОДУГОВОГО ОКСИДИРОВАНИЯ ПОД
ДЕЙСТВИЕМ ВНЕШНЕГО УЛЬТРАЗВУКА НА ЗАКОНОМЕРНОСТИ РОСТА
КАЛЬЦИЙФОСФАТНЫХ ПОКРЫТИЙ**

^{1,2}Казанцева Е.А., ¹Комарова Е.Г., ¹Шаркеев С.О.П.

¹Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск

²НИ Томский государственный университет, Томск

Выполнено исследование закономерностей роста кальцийфосфатных (КФ) покрытий при микродуговом оксидировании (МДО) в условиях внешнего ультразвукового (УЗ) поля. Установлена взаимосвязь между электрофизическими параметрами МДО (плотность тока, длительность процесса) с внешним УЗ воздействием и физико-химическими свойствами покрытий (толщина, шероховатость, скорость роста толщины, скорость роста шероховатости).

Синтез КФ покрытий на образцы из титана марки ВТ1-0 проводили методом МДО в базовом электролите [1] в импульсном однополярном анодном режиме при следующих параметрах: напряжение - 200 В, длительность импульсов - 100 мкс, частота - 50 Гц, время нанесения покрытий - 10 мин. В зависимости от условий наложенного УЗ в процессе МДО было выбрано три режима: МДО (стандартный режим без внешнего УЗ); МДО/ИУЗ (МДО с наложением импульсного УЗ, частота УЗ - 35 кГц, мощность УЗ - 35 Вт); МДО/НУЗ (МДО с наложением синусоидального УЗ, частота УЗ - 35 кГц, мощность УЗ - 100 Вт) [1].

Показано, что со временем осаждения покрытий в процессе МДО с внешним УЗ плотность тока монотонно снижается от 0,50 до 0,03 А/см². Тогда как при осаждении покрытий в стандартном режиме начальная плотность тока характеризуется меньшими значениями ~0,30 А/см², которые со временем микродуговой обработки снижаются до 0,01 А/см². Для всех режимов нанесения покрытий изменение плотности тока со временем процесса МДО описывается одинаковой аппроксимирующей функцией - гиперболической, следующего вида: $j(t) = a/(t + b)$, где a , b - коэффициенты. Подобная зависимость вызвана формированием и ростом толщины на поверхности образцов диэлектрического КФ слоя, препятствующего дальнейшим электрическим пробоям. Действительно, толщина и шероховатость поверхности (параметр Ra) всех типов покрытий со временем микродуговой обработки увеличиваются по логарифмической аппроксимирующей функции вида: $y(t) = b \cdot \ln(t + a)$, где a , b - коэффициенты. Аппроксимация экспериментальных данных проводилась с помощью метода наименьших квадратов, коэффициенты аппроксимации функций составили $\geq 0,90$. Следует отметить, что за 10 мин процесса МДО с внешним УЗ толщина и шероховатость покрытий увеличиваются соответственно до 60 мкм и 4,4 мкм, тогда как в стандартном режиме формируются покрытия с меньшими толщиной и шероховатостью равными соответственно 50 мкм и 3,4 мкм.

В работе были определены скорости роста толщины и шероховатости покрытий в процессе МДО, как производные соответствующих функций по времени. Установлено, что найденные зависимости для всех режимов нанесения покрытий описываются теми же гиперболическими функциями вида: $v(t) = a/(t + b)$, что и функции плотности тока от времени. Это значит, что скорость роста таких характеристик покрытий, как толщина и шероховатость, находится в прямой корреляции с величиной плотности тока МДО (рис. 1). Были построены линейные регрессии, описываемые уравнением: $y(j) = a + b \cdot j$, где b - коэффициент регрессии. Следует отметить, что при построении зависимостей мы опирались на временную хронологию процесса МДО, поэтому по оси абсцисс значения плотности тока приведены в обратном порядке. Корреляционный анализ выявил тесную прямую взаимосвязь ($r \geq 0,90$) между величиной плотности тока и скоростью роста толщины и шероховатости покрытий для всех режимов нанесения. Регрессионный анализ показал, что коэффициент регрессии скорости роста толщины от плотности тока имеет значительно большее значение для МДО покрытий ($b = 78,88$), сформированных в стандартном режиме,

Секция 7. Тонкие пленки и многослойные покрытия как иерархически организованные структуры

по сравнению с покрытиями, нанесенных в условиях внешнего УЗ ($b = 47,92$ для МДО/ИУЗ покрытий; $b = 57,85$ для МДО/НУЗ покрытий) (рис. 1 а). Такая же закономерность наблюдается и для функций скорости роста шероховатости покрытий от плотности тока. Так, коэффициент регрессии МДО покрытий составляет $b = 5,64$, тогда как для МДО/ИУЗ покрытий – $b = 2,66$ и для МДО/НУЗ покрытий – $b = 2,93$ (рис. 1 б). Таким образом, в стандартном режиме МДО снижение плотности тока в большей степени влияет на падение скорости роста толщины и шероховатости покрытий, тогда как для режимов с наложением внешнего УЗ дополнительное энергетическое воздействие замедляет падение скорости роста данных характеристик покрытий.

Рис. 1. Зависимости скорости роста толщины v_d (а) и шероховатости v_{Ra} (б) покрытий от величины плотности тока процесса МДО в стандартном режиме и в режимах с приложенным импульсным или синусоидальным УЗ

Из графиков видно, что для режимов МДО с внешним УЗ скорость роста толщины покрытий имеет более высокие начальные значения $\sim 23,5$ мкм/мин, по сравнению со стандартным режимом, для которого характерно начальное значение – $18,5$ мкм/мин (рис. 1 а). Это может быть связано с возникновением дополнительного энергетического импульса при пропускании через электролит ультразвуковых колебаний, что сопровождается ускоренным осаждением покрытий [2]. При этом для всех режимов нанесения со временем процесса МДО скорость роста толщины покрытий снижается до одинакового конечного значения $\sim 1,6$ мкм/мин. В то же время установлено, что внешнее УЗ воздействие в процессе МДО не влияет на начальную скорость роста шероховатости покрытий, которая составляет $\sim 1,2$ мкм/мин и снижается со временем микродуговой обработки до $0,1$ мкм/мин для всех режимов нанесения (рис. 1 б).

Таким образом, выявлена гиперболическая зависимость между скоростью роста толщины и шероховатости покрытий и длительностью процесса МДО, а также положительная корреляция между скоростью роста данных характеристик покрытий и величиной плотности тока. При этом, снижение плотности тока со временем нанесения в большей степени влияет на падение скорости роста толщины и шероховатости покрытий в стандартном режиме МДО, тогда как в режимах МДО с наложением внешнего УЗ дополнительное энергетическое воздействие замедляет падение скорости роста толщины и шероховатости покрытий.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект №13-03-07659 и программы фундаментальных исследований ИФПМ СО РАН, проект III.23.2.5

1. Kazantseva E.A., Komarova E.G., Sharkeev Yu.P. Structural and morphological features of the ultrasound-assisted micro-arc oxidation coatings // AIP Conference Proceedings. 2019. V. 2167. P. 020156(4).
2. Dejiu S., Jingrui C., Guolong L., Donglei H., Laili W., Haojie M., Yonghong X., He C., Yaqian Y. Effect of ultrasonic on microstructure and growth characteristics of micro-arc oxidation ceramic coatings on 6061 aluminum alloy // Vacuum. 2014. V. 9. P. 143–148.