

новые возможности для создания более устойчивых, легких и эффективных беспилотников, что делает использование эластомерных материалов эффективным и актуальным решением для будущего аэрокосмической отрасли.

ЛИТЕРАТУРА

1. Anand S., Mishra A.K. High-Performance Materials used for UAV Manufacturing: Classified Review // International Journal of All Research Education and Scientific Methods. – 2022. – Vol. 10. – P. 2811–2819.

УДК 544.653.2

ФОРМИРОВАНИЕ АНОДНО-ОКСИДНЫХ ПОКРЫТИЙ НА СПЛАВАХ АЛЮМИНИЯ В ВОДНЫХ РАСТВОРАХ ИМПУЛЬСНЫМ ТОКОМ

П.Б. КУБРАК, А.А. ЧЕРНИК, М.С. БОГДАНОВ

Белорусский государственный технологический университет
Минск, Беларусь

Оксидный слой является одним из самых жаростойких и электроизоляционных видов покрытий на алюминии и его сплавах. Его теплопроводность значительно ниже, чем металла. Коэффициент теплового излучения оксидированного алюминия достигает 80 % излучения абсолютно чёрного тела. Пленки, полученные эматалированием алюминия, выдерживают нагрев до 500 °С без видимых изменений. Удельное объемное электросопротивление оксидной пленки 10^{12} - 10^{13} Ом · см. Пробивное напряжение в зависимости от толщины пленки и способа её получения изменяется от нескольких сот до нескольких тысяч вольт [1]. Однако, в настоящий момент времени актуальным остается вопрос модификации анодно-оксидных покрытий на алюминии и его сплавах с целью увеличения физико-химических и триботехнических свойств применяя различные режимы анодирования и составы электролитов. Одним из таких режимов является анодирование с использованием импульсной подачи тока (импульсное анодирование), которое можно охарактеризовать как комбинацию нормального и экстремального анодирования [2]. Используя различные параметры импульсного процесса, среди которых время, температура, предел плотности тока, частота и скважность, можно получить толстые и твердые анодные оксиды с

хорошей межфазной адгезией, обладающие повышенной коррозионной стойкостью и сопротивлением истиранию [3].

В настоящей работе исследовалось влияние импульсной токовой нагрузки на свойства получаемых анодно-оксидных покрытий на образцах из сплава алюминия АД31, который широко используется в автомобильной, авиационной, в частности при конструировании беспилотных летательных аппаратов, легкой и мебельной промышленности.

Процесс анодирования проводили в гальваностатическом режиме при импульсной и стационарной токовой нагрузке в электролите содержащем 180 г/дм³ серной кислоты. Предварительная подготовка образцов осуществлялась химически в соответствующих для промышленного применения растворах и условиях [4]. Режимы импульсного анодирования сплава алюминия АД31 представлены в табл. 1.

Табл. 1. Режимы импульсного анодирования сплава АД31

Соотношение импульса и паузы ($\tau_{и}:\tau_{п}$)	Длительность амплитуды тока, мс				Коэффициент заполнения D	Скважность S
	1	10	50	100		
1:1	1:1	10:10	50:50	100:100	0,5	2
2:1	1:0,5	10:5	50:25	100:50	0,667	1,5
5:1	1:0,2	10:2	50:10	100:20	0,833	1,2
10:1	1:0,1	10:1	50:5	100:10	0,909	1,1

Электролиз проводили при плотности тока 1 А/дм² и температуре электролита 18-21 °С. Длительность электролиза составляла 30 минут. При проведении исследований определяли микротвердость анодных пленок по Виккерсу. Защитную способность измеряли методом капли [5], пробивное напряжение определяли на разработанной на кафедре Х, ТЭХП и МЭТ установке, соответствующей требованиям [5].

При проведении исследования процесса импульсного анодирования сплава алюминия АД31 получены осциллограммы тока и напряжения, представленные на рис. 1.

При скважности импульсов, равной 2, значение амплитуды напряжения процесса возрастает от 8,8 до 10,7 В с увеличением длительности анодного импульса от 1 до 100 мс, что может указывать на инерционность процесса роста пленки (рисунок 1). При коротких импульсах тока образуется тонкий барьерный слой оксида, а роста оксидной пористой части пленки почти не происходит. За время релаксации часть оксида взаимодействует с электролитом, толщина пленки на локальных участках снижается. При подаче следующего импульса процесс образования оксида повторяется, напряжение при этом возрастает и устанавливается вне зависимости от длительности паузы в течение 0,3-0,4 мс.

безполяризационного взаимодействия свежесформирующегося покрытия с электролитом. Подобная закономерность наблюдается при уменьшении длительностей импульсов тока, что может быть объяснено в дополнении к вышесказанному увеличением общего количества импульсов, способствующего формированию тонких плотных слоев оксида.

Установлено, что применение импульсного режима позволяет увеличить защитную способность и электроизоляционные свойства формируемых анодно-оксидных покрытий по сравнению со стационарным режимом. При уменьшении скважности, и, следовательно, увеличении количества пропущенного электричества от 0,250 (А · ч)/дм² до 0,455 (А · ч)/дм² толщина образующейся оксидной пленки возрастает от 2,9 мкм до 5,5 мкм. Выход по току образования анодной пленки возрастает до 70% и выше с увеличением длительности анодных импульсов при скважностях 1,5-2,0 и практически не изменяется при величинах 1,2-1,1, вследствие сокращения доли бестоковых пауз в процессе импульсного оксидирования и, соответственно, времени взаимодействия электролита с поверхностью образцов без поляризации. Пробивное напряжение анодных пленок, сформированных при исследованных скважностях, достигает максимальных значений 260 В при длительности импульса 10 мс. Это может говорить о том, что при указанной длительности происходит формирование плотных и равномерных слоев анодного оксида. Наиболее вероятно при более коротких импульсах оксид формируется на локальных участках с постепенным заполнением всей поверхности в последующих импульсах. Увеличение длительности импульса более 10 мс приводит к разрыхлению пленки, вследствие локального разогрева поверхности и интенсификации точечных химических реакций оксида с электролитом.

Таким образом, использование импульсного режима анодирования позволяет повысить электроизоляционные и защитные свойства анодных покрытий на поверхности сплава алюминия АД31 до 30 % и более по сравнению со стационарным режимом электролиза. Наиболее высокие значения указанных показателей соответствуют импульсному режиму с длительностью импульсов 10 мс и скважностью процесса 1.1.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кудрявцев, Н. Т. Электролитические покрытия металлами. / Кудрявцев, Н. Т. – М.: Химия. – 1979. – 352 с.
2. Захаров, Я. А. Морфология анодного оксида алюминия и методы ее модификации / Я. А. Захаров, А. Н. Плиговка, А. А. Позняк //

НАНБ. Порошковая металлургия. Физико-химические исследования материалов. – 2021. – № 43. – С.106-115.

3. Медведева, Н. В. Модулирование пор анодного оксида алюминия в процессе его получения для формирования фотонных кристаллов / Н. В. Медведева // Вестник БГУИР. Электронные системы и технологии. – 2021. – С.216-218.

4. Грилихес, С. Я. Оксидирование и фосфатирование металлов/ С. Я. Грилихес. – 3-е изд. – Ленинград: Машиностроение, 1971. – 117 с.

5. Аверьянов Е. Е. Справочник по анодированию. — М.: Машиностроение. – 1988. – 224 с.

УДК 621.793.182

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ФОРМИРОВАНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ ПОКРЫТИЙ МЕТОДАМИ ВАКУУМНО-ДУГОВОГО ОСАЖДЕНИЯ

С.Д. ЛАТУШКИНА¹, Д.Д. ГОРДИЕНКО², Д.В. КУИС²,
И.А. СЕЧКО¹, А.А. ЧАЙКИН¹

¹ Физико-технический институт НАН Беларуси, Минск, Беларусь

² Белорусский государственный технологический университет
Минск, Беларусь

При создании функциональных покрытий различного назначения, способных удовлетворять зачастую противоречивым требованиям, наиболее перспективной является концепция многослойной архитектуры покрытий. Многослойная архитектура позволяет создавать покрытия, одновременно включающие метастабильные и многокомпонентные материалы в едином геометрическом теле, и таким образом даёт возможность сочетать различные концепции отдельных слоёв в многослойном покрытии. В составе покрытий необходимо наличие пластичных фаз, осуществляющих релаксацию внутренних напряжений и подавление роста зародышевых трещин.

Каждый из слоёв многослойно-композиционного покрытия может иметь как монослойную, так и многослойную архитектуру. Слоистая архитектура покрытий наноразмерной толщины позволяет стабилизировать определенную текстуру каждого слоя покрытия и создавать материалы для покрытий нового типа. Наноструктурированные многослойные покрытия можно классифицировать следующим образом[1]: