

tional Conference on Plasma Surface Engineering. – Sept. 12–16, 2005. – Qingdao City, China, Surf. Coat. Technol. – V. 201. – P. 5148–5152.

4. Структура и свойства твердых и сверхтвердых нанокomпозиционных покрытий / А.Д. Погребняк [и др.] // Успехи физических наук. – 2009. – Т. 179, № 1. – С. 35–64.

5. Свойства нанокристаллических покрытий на основе легированного примесью нитрида титана / Ф.Ф. Комаров [и др.] // Вестник Барановичского гос. ун-та. – 2013. – Вып. 1. – С. 14–21.

6. Oliver, W.C. An Improved Technique for Determining Hardness and Elastic Modulus Using Load and Displacement Sensing Indentation Experiments / W.C. Oliver, G.M. Pharr // J. Mater. Res. – 1992. – Vol. 7 (No. 6). – P. 1564–1583.

7. Русаков, А.А. Рентгенография металлов: учебник для вузов по специальности «Физика металлов» / А.А. Русаков. – М.: Атомиздат, 1977. – 480 с.

8. Hanawalt, J.D. Chemical analysis by X-ray diffraction – classification and use of X-ray diffraction patterns / J.D. Hanawalt // Adv. X-ray anal. – 1977. – V. 22. – P. 63–73.

УДК 621.794.61:620.197

А.А. ПАРШУТО (ФТИ НАН Беларуси)

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДОВ ОКСИДИРОВАНИЯ

Анодная электрохимическая обработка металлов (оксидирование) является наиболее эффективным методом получения покрытий с заданными свойствами. С помощью анодного оксидирования можно изменять такие свойства металлов, как прочностные и электроизоляционные характеристики, износо- и термостойкость, каталитическую активность.

К наиболее распространенным методам получения оксидных пленок относится обработка в растворах электролитов. Эти методы можно разделить на следующие типы: электрохимическое оксидирование при постоянном и импульсном токе [1], твердое анодиро-

вание [2], микродуговое оксидирование (МДО) [3], высоковольтное электрохимическое оксидирование (ВВЭО) [4].

Электрохимическое оксидирование или анодирование – процесс нанесения оксидной пленки на поверхность металлов и сплавов. Пленки выполняют функции защиты подложки и увеличивают износостойкость поверхности. Оксидная пленка может быть выращена на различных металлах: алюминии, ниобии, тантале, титане, цирконии и т.д.

Большинство существующих технологий используют при оксидировании алюминия и его сплавов постоянный или импульсный ток с длительностью импульса в несколько миллисекунд. Данные процессы позволяют формировать пленки оксида алюминия толщиной до 20 мкм приблизительно за 60 мин [1, 5].

Твердое анодирование алюминия или анодирование при низких температурах нашло широкое распространение в связи с высокими параметрами твердости и износостойкости пленок оксида алюминия по сравнению с обычным электрохимическим оксидированием.

Твердое анодирование большей частью проводят в 17–30%-х растворах серной кислоты. При этом имеет место сильное растравливание формирующейся оксидной пленки. Установлено что скорость растворения оксидной пленки возрастает примерно в 10 раз при повышении температуры раствора на каждые 20 °С. Для предотвращения сильного растравливания пленки процесс приходится вести при охлаждении электролита до минусовых температур [2].

Однако получение высококачественных слоев методом твердого анодирования сопряжено со сложностью технологических условий, таких как низкая температура процесса, поддержание токовых режимов, усиление механизма держателей.

Одним из относительно новых направлений оксидирования является МДО [6]. МДО можно проводить на постоянном и переменном токах. На постоянном токе необходимо повышать напряжение с течением времени, так как в зону разряда не привносятся дополнительные электроны, но по этой же причине процесс МДО, осуществляемый на постоянном токе, занимает более длительное время. При использовании переменного тока на отрицательной полуволне в зону разряда вносятся дополнительные электроны, которые увеличивают разрядный ток и повышают температуру в зоне разряда, что способствует формированию высокотемпературных модифика-

ций оксида Al_2O_3 с высокой микротвердостью (~ 20 ГПа). Однако это может быть и причиной начала разрушительного дугового процесса [3].

Основными недостатками МДО являются:

– высокое энергопотребление, так как при получении толстых слоев применяется либо большая плотность переменного тока, либо увеличенная длительность процесса, что значительно снижает экономическую эффективность данного метода;

– сложность получения гладких и равномерных, с требуемыми толщиной и функциональными свойствами, слоев на всю или заданную поверхность изделий сложной геометрической формы.

В последнее время все чаще рекомендуется использовать при анодировании импульсную подачу тока [5]. Подобная схема дает особые преимущества в случаях, когда требуется использование тока высокой плотности или при обработке сплавов с высоким содержанием меди. Пленки, полученные при анодировании с использованием импульсного тока, обладают повышенной коррозионной стойкостью и сопротивлением истиранию. На практике подобные источники тока позволяют применять ток большей плотности без риска разрушения формируемого оксидного слоя. Разрушение в данном случае означает неконтролируемый прожог, возникновение микродуг, и растворение пленок, вызванное высокой локальной температурой электролита и большим электрическим током, и может представлять большую проблему при осуществлении таких процессов, как твердое анодирование. Разрушение происходит тогда, когда становится возможным локализованное нагревание. Оно начинается, когда напряжение достигает критического значения, которое зависит от типа, состава и температуры электролита. Пороговая толщина пленки и время анодирования, при которых происходит разрушение, снижаются при использовании тока более высокой плотности.

Комбинированная технология ВВЭО с предварительной электролитно-плазменной обработкой (ЭПО), является усовершенствованием технологии оксидирования алюминия и его сплавов.

За основу технологии ВВЭО была принята физико-геометрическая модель Келлера, суть которой заключается в том, что размер и количество пор обратно пропорционально напряжению процесса. При ВВЭО максимальное значение напряжения в

импульсе достигает 460–520 В, однако формирование микродуг при таких режимах не происходит, благодаря разработанной конструкции блока управления источником питания [7]. Предварительная ЭПО перед оксидированием осуществляет тонкую очистку поверхности с удалением всех видов загрязнений, снятие заусенцев, притупление острых кромок, выравнивание и удаление дефектных поверхностных слоев после механической обработки. Процесс ЭПО проводится в электролитах с содержанием компонентов до 5 % при температуре 70–90 °С и напряжении 260–330 В, время обработки 1–10 мин. При этом такие стадии предварительной обработки, как обезжиривание, травление, осветление, полирование переходят в одну стадию, что значительно упрощает технологический процесс оксидирования [8].

Последующее высоковольтное электрохимическое оксидирование проводится в водном растворе щавелевой кислоты. Процесс протекает при температурах в диапазоне от 1 до 25 °С. Детали обрабатываются в гальваностатическом импульсном анодном режиме при плотностях тока до 5 А/дм² и средней плотности тока 80–160 В. Следует сразу отметить, что среднее рабочее напряжение не отражает истинную картину процесса, так как при оксидировании реализуется импульсный режим обработки, а максимальное напряжение в импульсе гораздо выше и зависит от плотности тока обработки [9].

В таблице 1 приведены уточненные характеристики различных методов оксидирования [10]. Использование высокого анодного импульсного напряжения с предварительной ЭПО при формировании оксидного слоя позволяет получить пленки микротвердостью до 10 ГПа, с напряжением пробоя свыше 2000 В. Скорость роста пленки составляет 1–1,5 мкм/мин. Кроме того, повышенное напряжение формирования оксидной пленки приводит к уменьшению размера и количества пор в пленке, что приводит к повышению коррозионной стойкости. На рисунке 1 представлена морфология поверхности оксидных пленок, полученных различными методами. Как видно из рисунка, поверхность алюмооксидной керамики, сформированной комбинированным методом ВВЭО с ЭПО, характеризуется глобулярной плотной структурой с малым количеством пор и низкой шероховатостью (0,05–0,2 мкм). На поверхности присутствуют микронеровности различной природы, при этом поверх-

ность равномерная, без провалов и выступов. Поры в пленке расположенные хаотично, не образуют четко выраженную матрицу. Размеры пор от 3 до 10 нм, расстояние между порами от 5 нм до 1 мкм.

Таблица 1 – Сравнение свойств пленок анодного оксида алюминия в зависимости от метода получения

	ВВЭО с ЭПО	МДО	Твердое анодирование	Электрохимическое оксидирование
Максимальная толщина покрытия, мкм	70	150	60	50
Время обработки, мин	90	120	120	120
Микротвердость, ГПа	до 10,0	> 21,0	5–5,5	3,6
Коррозионная стойкость, ч	1600	2000	1000	500
Напряжение пробоя, В	> 2000	> 2000	до 1000	до 600
Параметр шероховатости Ra, мкм	> 0,1	> 0,80	> 0,20	> 0,30
Энергозатраты, кВт·ч	0,26	4,60	0,30	0,12

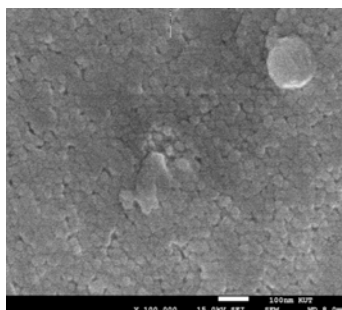


Рисунок 1 – Морфология поверхности оксидного слоя полученного методом ВВЭО

Таким образом, разработанный комбинированный метод высоковольтного электрохимического оксидирования с предварительной электролитно-плазменной обработкой можно эффективно использовать для формирования оксидных слоев толщиной до 70 мкм и напряжением пробоя свыше 2000 В на поверхности изделий из алюминия и его сплавов. Параметр шероховатости Ra оксидной пленки после ВВЭО с предварительной ЭПО до 0,1 и микротвердостью до 10 ГПа против 5,5 и 3,6 ГПа при твердом и электрохимическом оксидировании соответственно. Однако микротвердость ВВЭО уступает МДО (21 ГПа). При этом параметр шероховатости поверхности пленки, полученной МДО, доходит до ~ Ra 3 мкм. Метод ВВЭО с предварительной ЭПО характеризуется низким энергопотреблением и высокими физико-механическими свойствами, что делает его конкурентно способным среди других методов оксидирования алюминия и его сплавов.

Литература

- 1. Хенли, В.Ф.** Анодное оксидирование алюминия и его сплавов / В.Ф. Хенли. – Пер. с англ. Под ред. Синявского В.С. – М.: Металлургия, 1986. – 153 с.
- 2. Беленький, М.А.** Электроосаждение металлических покрытий: Справочник / М.А. Беленький, А.Ф. Иванов. – М.: Металлургия, 1985. – 288 с.
- 3. Томашов, Н.Д.** Толстослойное анодирование алюминия и его сплавов / Н.Д. Томашов, М.Н. Тюкина, Ф.П. Заливалов. – М.: Машиностроение, 1968. – 156 с.
- 4. Метод** высоковольтного электрохимического оксидирования алюминия / А.А. Паршуто [и др.] // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: материалы VI Междунар. науч.-техн. конф., Минск 14-16 сентября 2011, в 3 кн. – Кн. 2. – С. 294–298.
- 5. Juhl, A.** A New Approach to Pulse Anodizing. Decreasing energy Consumption / A. Juhl // Increasing Productivity World Congress; 6th, Aluminium two thousand, Italy, – 2007.
- 6. Шандров, Б.В.** Основы технологии микродугового оксидирования: Учебное пособие / Б.В. Шандров, Е.М. Морозов, А.В. Жуковский. – М: ИД Альянс, 2008. – 80 с.

7. Разработка источника питания для высоковольтного электрохимического оксидирования. Высоковольтное оксидирование оксидных пленок алюминия / Н.М. Чекан [и др.] // Наука, образованию, производству, экономике: материалы 9-й Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 12–14 июля 2011 г. / БНТУ. – Минск, 2011. – Т. 1. – С. 326.

8. Томило, В.А. Высоковольтное электрохимическое оксидирование алюминия с предварительной электролитно-плазменной обработкой поверхности / В.А. Томило, Ю.В. Соколов, А.А. Паршутто // Весці Нац. акад. Навук Беларусі. Сер. физ.-техн. навук. – 2013. – № 2. – С. 25–27.

9. Композиционный материал для узлов безсмазочного трения космических аппаратов / Н.М. Чекан [и др.] // Веснік Гродзенскага дзярж. ўн-та імя Я. Купалы. Серыя 6, Тэхніка. – 2013. – № 1. – С. 24–32.

10. Перспективы использования высоковольтного электрохимического оксидирования алюминия / С.И. Багаев [и др.] // Взаимодействие излучений с твердым телом: материалы 10-й Междунар. конф. – Минск, 2013. – С. 155–157.

УДК 621.774

В.М. КОНСТАНТИНОВ, д-р техн. наук,
Э.П. ПУЧКОВ, канд. техн. наук,
А.И. ГАЛИМСКИЙ (БНТУ),
Д.А. СЕМЕНОВ (РУП БМЗ)

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГОРЯЧЕКАТАНЫХ ТРУБ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ИЗ СТАЛИ 09Г2С*

Введение. В настоящее время металлургические заводы выпускают широкий ассортимент труб, отличающийся химическим составом, уровнем механических свойств, надежностью и долговечностью в процессе эксплуатации. По химическому составу и уровню прочностных и пластических характеристик существует класс