

5. Ультразвуковое упрочнение металлов / А. В. Белоцкий [и др.]. – Киев: Техника, 1989. – С. 3365–3371.

6. Чигринова, Н. М. Микроплазменное легирование с ультразвуковым модифицированием поверхности / Н. М. Чигринова, А. А. Кулешов, В. В. Нелаев // Электронная обработка материалов / НАН Молдовы. – Кишинев, 2010. – № 2 (262). – С. 27–34.

## **МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ МИКРОДУГОВЫЕ ПОКРЫТИЯ КАК ЭФФЕКТИВНОЕ СРЕДСТВО ПРОДЛЕНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ АЛЮМИНИЕВЫХ ИЗДЕЛИЙ**

**Н. М. Чигринова<sup>1</sup>, В. Е. Чигринов<sup>1</sup>, А. А. Радченко<sup>2</sup>,  
С. И. Ловыгин<sup>2</sup>, А. А. Чевкота<sup>1</sup>**

*<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет,  
Минск, Беларусь, тел.: (+375 17) 293-95-81, (+375 17) 292-42-53,  
e-mail: chyrynova@yandex.ru*

*<sup>2</sup>Институт сварки и защитных покрытий, Минск, Беларусь,  
тел.: (+375 17) 293-98-07, (+375 17) 332-16-92*

Работоспособность и долговечность оксидо-керамического покрытия, формируемого на деталях из литейных сплавов алюминия методом анодного микродугового оксидирования (АМДО), существенно ограничена условиями эксплуатации, ключевыми факторами которых являются термоциклирование, перегрев и износ от механических воздействий.

В подавляющем большинстве случаев наиболее разрушительное влияние на качество и долговечность металлических изделий оказывает коррозия. Ежегодно она наносит огромный ущерб народному хозяйству каждой страны. В промышленно развитых странах убытки от коррозии за год составляют в среднем около 3–5% от внутреннего валового продукта. Потери металла достигают 20%. Ущерб от коррозии складывается из стоимости материалов, из затрат на изготовление пришедших в негодность конструкций, оборудования и различных изделий.

Поэтому разработка методологических решений по поиску и оптимизации технологий защиты алюминиевых изделий от преждевременной потери качества и с целью продления срока их службы является задачей актуальной и экономически целесообразной

Оптимальным решением указанной проблемы является применение метода анодного микродугового оксидирования (АМДО), который отличается возможностью низкотемпературной обработки ( $t < 80$  °С) металлических материалов, не вызывающей их разупрочнения и появления в структуре термических напряжений, с созданием оксидных керамикоподобных покрытий, обладающих требуемыми свойствами и качеством поверхности [1].

**Особенности процесса АМДО.** Микродуговое оксидирование алюминиевых сплавов для данной работы осуществлялось на серийных установках МДО-2 УВИЕ 440.329.005, содержащих трехфазный источник питания, формирующий импульсы выпрямленного напряжения частотой 150 Гц и амплитудой до 540 В, повышающий трансформатор и силовой блок. Процесс АМДО проводился в электролитической ванне из нержавеющей стали, стенки и дно которой являются катодом.

Для осуществления направленного микроплазменного синтеза пленок заданного химического состава и кристаллической структуры на аноде при микродуговом оксидировании обычно используются различные способы управления процессом МДО, но преимущество отдается варьированию химического состава электролита с целью интенсификации его химической активности.

Осуществляется такая интенсификация введением в стандартный электролит некоторых растворимых солей металлов, что приводит к образованию новых химических соединений, которые создают барьеры для взаимодействия кислорода с алюминием и кремнием. Перспективными представляются алюминаты натрия  $\text{NaOH} + \text{Na}_6\text{P}_6\text{O}_{18} + \text{NaAlO}_2$ , которые в комбинации со щелочью способствуют приросту толщины покрытия и повышению его износостойкости.

Контролю подвергались толщина слоя, создаваемого в течение 20–30 мин, оценивалась длительность обработки для полу-

чения на поверхности литейного сплава покрытий таких же толщин, как на деформируемых сплавах, изучалась микроструктура созданных покрытий.

**Экспериментальные исследования.** При разработке методик проводимых экспериментов учитывали физическую сущность и основные особенности метода АМДО. При проведении процесса в стандартном силикатнощелочном растворе ЭЩ плотность тока в микродуге, как правило, достигает 5000–6000 А/дм<sup>2</sup> [2]. Это приводит к появлению крупных сквозных пор в виде «кратеров вулканов», создающих механические напряжения, вызывающих микротрещины, соединяющих «кратеры». В дальнейшем по длине микротрещин возникает множество микроплазменных разрядов, определяющих появление пор маленьких размеров. Сквозные поры и микротрещины нарушают целостность покрытия и способствуют протеканию микроплазменного процесса в течение длительного времени, приводя к наращиванию толщины покрытия и залечиванию крупных пор (рис. 1).

При проведении АМДО в химически интенсифицированном электролите ЭЩ1 процесс формирования толстых слоев происходит при более низких уровнях токов, что обеспечивает получение равнотолщинных слоев с меньшим количеством менее крупных пор и структурных несовершенств (рис. 2).

Были проведены предварительные испытания основных свойств изделий из алюминиевых сплавов с покрытиями, нанесенными в активированном электролите (табл. 1).

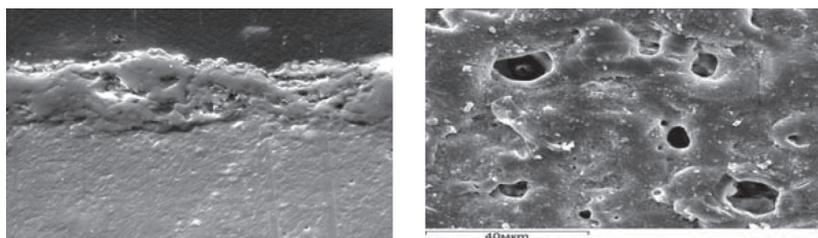


Рис. 1. Микроструктурные и топографические особенности покрытий, полученных в стандартном электролите

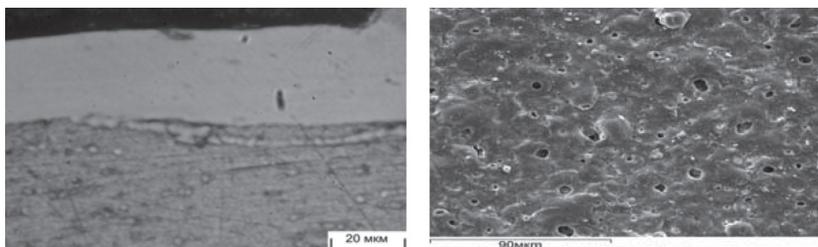


Рис. 2. Микроструктурные и топографические особенности покрытий, полученных в химически интенсифицированном электролите

Таблица 1. Результаты предварительных испытаний основных свойств покрытия из ЭЦ1

Характеристика внешнего вида покрытия	H $\mu$ , ГПа	Ra <sub>ep</sub> , мкм	$\delta$ , мкм
Покрытие с равномерной цветовой гаммой, без признаков нарушения сплошности, без трещин и вздутий, отслоений, следов местной коррозии и цветов побежалости. Видимых механических повреждений нет	8–10	0,65	30

Анализ содержания в покрытии алюминия и кислорода (рис. 3) показал, что основной фазой создаваемого в химически активированном растворе покрытия является износостойкий оксид  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. При этом отклонения от равнотолщинности не превышают 2–5 мкм (рис. 4), поверхностная пористость с неравномерными округлыми порами размером от 3 до 15 мкм составляет 1–3 %.

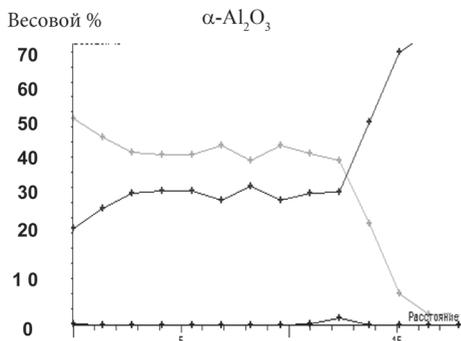


Рис. 3. Фазовый состав покрытия, полученного в химически активированном электролите

На рис. 5 приведены основные показатели покрытий, сформированных в химически интенсифицированном растворе на поверхности различных алюминиевых сплавов.

В табл. 2 представлены сравнительные данные по свойствам покрытий, полученных в стандартном ЭЦ и химически интенсифицированном ЭЦ1 электролитах на поверхности различных алюминиевых сплавов.

В процессе испытаний трибологических свойств созданных вариантов оксидных покрытий были построены диаграммы износа, в соответствии с которыми была рассчитана относительная износостойкость испытываемой поверхности (рис. 6).

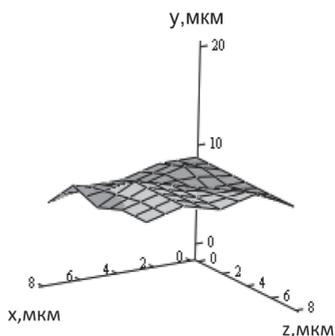


Рис. 4. Геометрия поверхности покрытия, представленного на рис. 3

Таблица 2. Сравнительные данные по свойствам покрытий

Электролит	Марка плава	$H_{\mu, \text{ср}}$ , МПа	$\sigma^*$ , МПа	Пробивное напряжение, В
ЭЦ	А 99	7560	1800	680
ЭЦ1		8800	1900	920
ЭЦ	Д16Т	8350	2300	930
ЭЦ1		9120	2470	1320
ЭЦ	В 96	11400	1700	1150
ЭЦ1		12760	1900	1720
ЭЦ	АМг	9300	900	1120
ЭЦ1		10150	925	1440

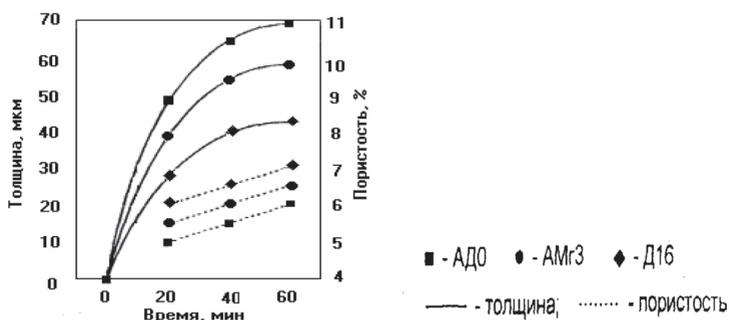


Рис. 5. Основные показатели покрытий, сформированных в химически интенсифицированном растворе на поверхности различных алюминиевых сплавов

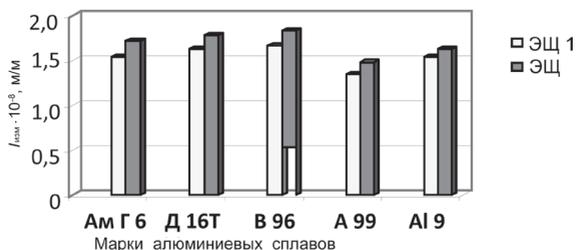


Рис. 6. Сравнительные характеристики интенсивности износа покрытий, полученных в ЭЩ и ЭЩ1

Более высокие механические и трибологические характеристики поверхностей, полученных интенсифицированным АМДО, обусловлены их микроструктурой, сформированной в процессе высокоскоростной кристаллизации в зоне дуги при перемещениях микродуг по поверхности анода на границе расплавленной области. Увеличенная износостойкость объясняется однородной ячеистой структурой покрытий из активированного электролита, которая способствует локализации очагов разрушения

Упрочненные изделия из алюминиевых сплавов в процессе интенсифицированного АМДО имеют в 2–2,5 раза более высокий уровень критической нагрузки разрушения, в 2,5–3,5 раза большую износостойкость и увеличенную на 35–65 % микротвердость, а также повышенное сопротивление пробойным напряжениям, что позволяет прогнозировать долговременную эксплуатацию таких изделий в условиях интенсивного абразивного износа, термоциклирования, высоких температур и т. п.

## Литература

1. Чигринова, Н. М. Интенсификация процессов микроплазменного упрочнения и восстановления металлических изделий повышенной точности электромеханическим воздействием: дис. ... д-ра техн. наук / Н. М. Чигринова. – Минск, 2010. – 310 л. (с прил. 265 л.).
2. Рост оксида алюминия в растворах силиката натрия в области предпробойных напряжений / Л. А. Снежко [и др.] // Защита металлов. – 1990. – Т. 26, № 6. – С. 998–1002.