

**ВЛИЯНИЕ УГЛЕРОДНЫХ НАНОЧАСТИЦ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА  
ОКСИДОКЕРАМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ НА СИЛУМИНАХ С РАЗЛИЧНЫМ  
СОДЕРЖАНИЕМ КРЕМНИЯ**

**Комаров А.И., Комарова В.И.**

*Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси,  
г. Минск, Беларусь, E-mail: al\_kom@tut.by*

**Введение**

Структура и свойства оксидокерамических покрытий (КП), получаемых микродуговым оксидированием (МДО) на алюминии и его сплавах, во многом определяются режимами и условиями этого процесса, который можно регулировать в относительно широких пределах. Основными методами воздействия на микроплазменный процесс с целью повышения структурных параметров КП, ответственных за требуемые их функциональные свойства, является модифицирование покрытий и оксидными наночастицами различной природы. В ранее проведенных нами исследованиях, в частности [1,2], показана высокая эффективность использования в качестве неоксидных модификаторов углеродных наночастиц различной структурно-фазовой организации – наноалмазы, фуллеренсодержащие сажи, углеродные нанотрубки (УНТ), наноуглерод, полученный электроразрядной обработкой углеводородных жидкостей. При введении углеродных наночастиц в электролиты было достигнуто повышение толщины КП на деформируемых сплавах в 1,5–2 раза, микротвердости, износостойкости, несущей способности по сравнению с базовыми КП не менее 2-х раз при одновременном снижении коэффициента трения в условиях граничного трения до 8 раз [1,2]. В настоящее время значительный интерес проявляется к использованию в процессе МДО в качестве модификаторов таких оксидных наночастиц как  $TiO_2$ ,  $ZrO_2$ ,  $\alpha-Al_2O_3$  [3]. В настоящей работе представлены результаты систематических исследований по формированию КП на силуминах под воздействием углеродных наночастиц.

**Материалы и методика исследования**

Процесс МДО проводился в анодно-катодном режиме на разработанной в Объединенном институте машиностроения НАН Беларуси установке УЭМПО при использовании силикатно-щелочного электролита – базового (4 г/л  $Na_2SiO_3$ , 2 г/л KOH) и модифицированного наночастицами углерода. Концентрация неоксидных добавок варьировалась в диапазоне 125–750 мг/л.

Структурно-фазовое состояние КП изучалось на поперечных шлифах методами рентгеноструктурного и металлографического анализов. Для получения информации о характере изменения фазового состава и микротвердости КП по его глубине осуществлялось послойное механическое удаление слоев с поверхности к основе с последующей рентгеновской съемкой каждого слоя. Съемка проводилась в режиме сканирования с шагом  $0,1^\circ$  продолжительностью 20 с в каждой точке. Морфология структурных составляющих образцов КП изучалась на поперечных шлифах на микроскопах МИМ-8, JX-200E. ДюрOMETрический анализ поперечных шлифов КП проводился на приборе ПМТ-3 при нагрузке на индентор 0,20; 0,49 Н в зависимости от исследуемого участка шлифа.

**Результаты исследования и их обсуждение**

Для получения информации о степени влияния УНЧ на характеристики покрытия на силуминах проведем анализ структуры КП на доэвтектическом (AK5M2) и заэвтектическом (KC740) силуминах.

Сплав AK5M2 (Si-6,8, Cu-2,5, Mg-0,5, Mn-0,4, Fe-0,96, Ti-0,13, Al-ост.) относится к группе Al-Si-Cu материалов, отличающихся высокой жаропрочностью, но по литейным свойствам, коррозионной стойкости и герметичности уступают сплавам Al-Si и Al-Si-Mg. Термическая обработка по предлагаемым режимам, не всегда обеспечивает требуемые свойства и, в первую очередь, упрочнение поверхности изделий, что может быть решено формированием на ней покрытий.

На рисунке 1 приведены микроструктуры КП образцов сплава АК5М2, полученного в базовом (а) и модифицированном шихтой алмазосодержащей ША-А (б) электролитах. Видно, что при добавке ША-А в электролит толщина покрытия  $\delta$  достигает 225 мкм, что 2 раза больше базового.

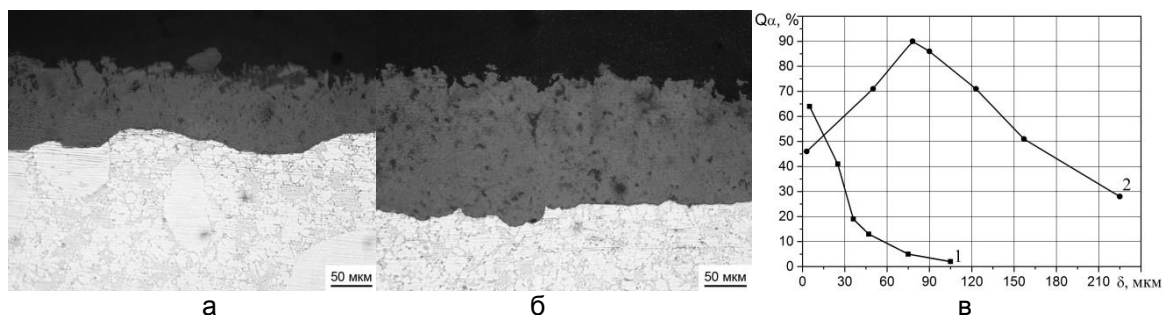


Рисунок 1 – Микроструктуры КП на АК5М2, полученного в базовом (а) и с добавкой ША-А с концентрацией 125 мг/л; послойное распределение корунда ( $\alpha$ - $Al_2O_3$ ) по глубине покрытия без добавки (1), при ее концентрации 125 мг/л (2)

Согласно данным рентгенофазового анализа (РФА), в обоих случаях состав КП представлен низкотемпературной фазой  $\gamma$ - $Al_2O_3$  и корундом  $\alpha$ - $Al_2O_3$ , в небольшом количестве присутствует муллит ( $Al_6Si_2O_{13}$ ). Как следует из рисунка 1, в модифицирование покрытия наноалмазами сопровождается резким возрастанием во всех слоях покрытия корунда, который в слое КП, равном 70 мкм, достигает 90 %, что, как установлено, приводит к выходу микротвердости на уровень 22 ГПа, тогда как в базовом КП он составляет 12,5 ГПа.

Учитывая эффективное воздействие фуллеренсодержащих саж на микроплазменные процессы создания поверхностных оксидных слоев на сплавах алюминия [2], были проведены исследования по созданию покрытий на силумине КС740 (Si-16-18, Cu-1,5-2,5, Mg-1,8-2,8, Mn-0,6-1,0, Fe-0,7, Al-ост.) в электролитах, включающих катодный депозит (КД), являющийся осадком на катоде при получении фуллеренов, и базовом. Состав КД представлен смесью УНТ, фуллерена  $C_{60}$  и графита. На рисунке 2 приведены микроструктуры КП на образцах из КС740, полученных в базовом (а) и модифицированном КД (б) электролитах с концентрацией 750 мг/л.

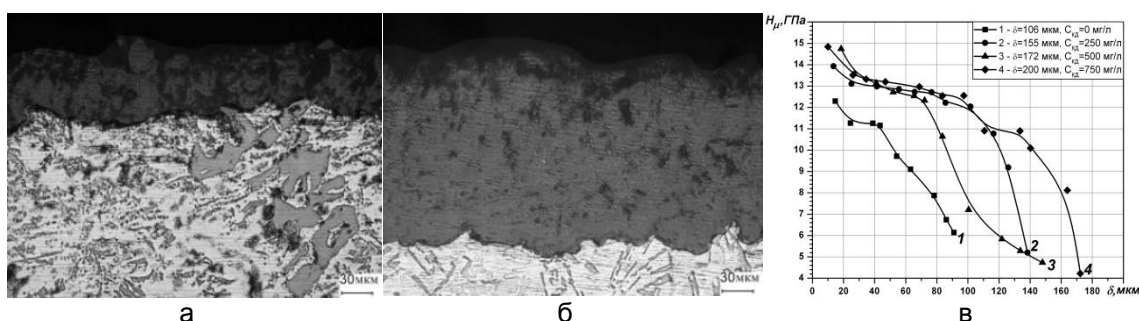


Рисунок 2 – Микроструктуры КП на образцах из КС740, полученных в базовом (а) и модифицированном КД электролитах с  $C=750$  мг/л; распределение микротвердости по глубине КП

Из анализа приведенных данных следует, что включение катодного депозита в базовый раствор сопровождается, как и в случае ША-А для сплава АК5М2, существенным (в 2,5 раза) ростом толщины  $\delta$  покрытия, что свидетельствует о интенсифицирующем влиянии КД на процесс МДО. В отличие от КП на сплаве АК5М2 на заэвтектическом силумине КС740, кроме  $\gamma$  – и  $\alpha$  - $Al_2O_3$  образуется в значительном количестве муллит. Установлено, что распределение фаз по толщине покрытия неравномерно. Наибольшее содержание  $\alpha$ - $Al_2O_3$  в модифицированном покрытии составляет 40%, доля муллита в рабочем слое (20–0 мкм) этого покрытия – 35 %, а в

поверхностных слоя (170–200 мкм) – 58%. При  $C_{\text{кд}}=0$  мг/л преобладающей фазой в покрытии является  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ .

Показано, что характер распределения фаз в слоях КП определяет изменение и величину микротвердости  $H_{\mu}$  (рис.2,в). Все образцы покрытия, полученные в модифицированном КД электролите, имеют характерные участки с равномерным распределением микротвердости по глубине КП. При этом максимальный уровень  $H_{\mu}$  соответствует большему содержанию корунда в КП, что определяет его превышение относительно базового КП в ~ 1,3 раза.

Было установлено, что особенностью МДО-процесса на силуминах в электролитах с добавками углеродных наночастиц является повышенное содержание муллита в формируемых покрытиях. Следует отметить, что это дает дополнительные возможности использования технологии МДО для получения теплозащитных покрытий, поскольку, как показано в [4], покрытия с повышенным содержанием муллита обладают низкой теплопроводностью (до  $0,5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ) при повышенной стойкости к растрескиванию при термоциклировании.

### Заключение

В результате проведенных исследований показано, что введение алмазсодержащей шихты (ША-А) и катодного депозита в базовые электролиты приводит к значительной интенсификации процесса МДО как в случае доэвтектического сплава АК5М2, так и заэвтектического КС740, о чем непосредственно свидетельствует увеличение толщины покрытия на них до 2-х раз.

Одновременно с этим углеродные наночастицы, включенные в электролиты, способствуют более интенсивному образованию корунда (в КП на АК5М2 до 90%) и муллита в КС740, что может быть связано с повышением температуры протекающих плазмохимических реакций, либо со снижением температуры фазовых переходов оксидов алюминия. Последнее приводит к повышению прочностных свойств покрытия, в частности микротвердости до 2-х раз.

### Список литературы:

1. Витязь П.А. Наноалмазы детонационного синтеза: получение и применение / П.А.Витязь, В.И. Жорник, А.Ф. Ильющенко, В.Т. Сенюль, А.И. Комаров и др. – Минск: Беларуская навука. – 2013. - 380 с.
2. Витязь П.А. Наноалмазы детонационного синтеза: получение и применение / П.А.Витязь, В.И. Жорник, А.Ф. Ильющенко, В.Т. Сенюль, А.И. Комаров и др. – Минск: Беларуская навука. – 2013. - 380 с.
3. Xiaopeng Lu. Plasma electrolytic oxidation coatings with particle additions – A review / Lu Xiaopeng, M. Mohedano, C. Blawert, E. Matykina, R. Arrabal, K. Ulrich Kainer, M.L. Zheludkevich // Surface & Coatings Technology. – 2016, v. 307, p. 1165 – 1182.
4. J.A. Curran, H. Kalkanci, Yu. Magurova, T.W. Clyne. Multi-rich plasma electrolytic oxide coatings for thermal barrier applications // Surface & Coatings Technology. 201 (2007) 8683-8687.