

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИИ МИКРОДУГОВОГО ОКСИДИРОВАНИЯ АЛЮМИНИЕВО-КРЕМНИЕВЫХ СПЛАВОВ

© 2015

М.М. Криштал, доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Нанотехнологии, материаловедение и механика», ректор
П.В. Ивашин, кандидат технических наук, старший научный сотрудник НИО-4
А.В. Полунин, младший научный сотрудник НИО-4
Е.Д. Боргардт, лаборант-исследователь НИО-4
А.Я. Твердохлебов, младший научный сотрудник НИО-4
Тольяттинский государственный университет, Тольятти (Россия)

Ключевые слова: микродуговое оксидирование; силумин; наночастицы; диоксид кремния; оксидный слой; микротвердость; износостойкость; теплопроводность.

Аннотация: Работа посвящена улучшению процесса микродугового оксидирования наиболее применяемых литейных алюминиевых сплавов - алюминиево-кремниевых сплавов (силуминов). На силуминах АК6М2 и АК9пч методом микродугового оксидирования были получены образцы оксидных слоев, синтезированные в электролите базового состава и с добавкой в электролит небольшого количества наноразмерного порошка диоксида кремния SiO₂. Проведены экспериментальные исследования производительности процесса микродугового оксидирования, поперечной структуры полученных оксидных слоев, их фазового состава, морфологии поверхности, микротвердости, трибологических и теплоизоляционных характеристик. Обнаружено, что при введении в состав электролита наноразмерного порошка диоксида кремния SiO₂ существенно повышается производительность процесса микродугового оксидирования. Оксидные слои, сформированные в модифицированном наночастицами диоксида кремния электролите, обладают улучшенной поперечной макроструктурой и микрорельефом по сравнению с базовым вариантом. Обнаружено увеличение содержания в оксидном слое высокотемпературных прочных фаз при одновременном снижении содержания метастабильных и низкотемпературных фаз. Установлено повышение микротвердости и износостойкости оксидных слоев, а также значительное снижение теплопроводности оксидных слоев, синтезированных в электролите с добавками наночастиц диоксида кремния.

Увеличение содержания высокотемпературной и наиболее прочной фазы α -Al₂O₃, образование в оксидном слое высокотемпературной фазы SiO₂ тридимита и других уникальных фаз, а также повышение скорости формирования оксидного слоя свидетельствуют о росте температур в зоне реакций его синтеза. Данный факт является нетривиальным и, видимо, связан с влиянием наночастиц диоксида кремния на микродуговые разряды и кинетику окисления в реакционной зоне МДО.

ВВЕДЕНИЕ

Растущие требования к применяемым материалам в машиностроении и в аэрокосмической отрасли обуславливают необходимость развития технологий создания функциональных поверхностных слоев на алюминиево-кремниевых сплавах (силуминах), т. к. они составляют 85–90 % алюминиевых сплавов, применяемых в машиностроении [1]. Перспективной технологией комбинированного метода поверхностного упрочнения и модифицирования таких конструкционных материалов является микродуговое оксидирование (МДО) [2]. Однако, по данным [2], на силуминах достаточно трудно добиться стабильного качества оксидных слоев.

В работе [3] исследована проблема МДО силуминов и предложен механизм влияния кремния в составе сплава на процесс МДО и свойства оксидных слоев на силуминах, что позволило во многом решить проблему. Влияние соединений кремния, находящихся в составе электролита, также известно [2], но механизм этого влияния на процесс МДО не представляется достаточно изученным и зачастую описан в виде гипотез [4; 5].

Кроме оксидирования силуминов, перспективным направлением современных исследований МДО является использование добавок в электролит наноразмерных частиц различных соединений с целью внедрения этих частиц в оксидный слой и придания ему новых функциональных свойств, связанных со свойствами добавляемого вещества [6–8]. Однако ранее проведенные авторами исследования [9] влияния добавки нано-

частиц SiO₂ в электролит на функциональные свойства оксидных слоев при МДО силумина показали интересный результат: неожиданно значительное, не связанное напрямую с функциональными свойствами самой вводимой добавки влияние на механические свойства слоя. Данный факт говорит о сложности прогнозирования функциональных свойств оксидных слоев при добавках наноразмерных материалов в электролит при МДО. Механизм взаимодействия наночастиц с электролитической плазмой и жидкостью не изучен и, основываясь на известных теоретических и экспериментальных исследованиях [10–12], представляется весьма сложным.

Настоящая работа посвящена исследованию влияния наноразмерного порошка диоксида кремния, добавляемого в электролит при МДО, на функциональные свойства и процесс формирования оксидных слоев на силуминах. Такая постановка задачи объединяет перспективные для практики и достаточно новые для науки вопросы.

МЕТОДИКИ ПОЛУЧЕНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЯ ОКСИДНЫХ СЛОЕВ

Исследуемые слои на основе оксида алюминия Al₂O₃ были получены при МДО на плоских образцах сплавов АК6М2 и АК9пч (ГОСТ 1583-93) размером 20×60×10 мм.

Оксидирование велось в водном щелочно-силикатном растворе, содержащем дистиллированную воду с добавлением щелочи NaOH (марка ЧДА, ГОСТ 4328-77),

жидкого натриевого стекла Na_2SiO_3 (плотность $\rho=1,45 \times 10^3$ кг/м³, силикатный модуль $m=3$, ГОСТ 13078-81) и двузамещенного фосфорнокислого натрия $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ (ГОСТ 4172-76). В электролит добавлялся рентгеноаморфный нанодисперсный диоксид кремния марки «Таркосил Т20» со средней дисперсностью частиц 20...23 нм [13] в концентрации 3–5 г/л.

Оксидирование проводили в анодно-катодном режиме от источника питания переменного тока 50 Гц. Отношение катодного тока к анодному устанавливалось 1,05...1,1 и поддерживалось постоянным на протяжении процесса МДО. Величина анодного формовочного напряжения составляла $U_A=600\text{...}850$ В при постоянной плотности тока 30...35 А/дм².

За толщину оксидного слоя на образце принимали среднее значение толщины по результатам всех измерений. Среднюю толщину оценивали с использованием вихретокового толщиномера КОНСТАНТА К6 с датчиками-преобразователями ИД0 и ПД1. Измерения толщины проводились не менее 10 раз. Погрешность определяли с помощью критерия Стьюдента при доверительной вероятности 0,9.

Рентгеноструктурный анализ оксидных слоев осуществляли на рентгеновском дифрактометре Shimadzu Maxima XRD-7000 с фильтрованным Cu-K α излучением. Количественное содержание различных фазовых составляющих оксидного слоя уточняли по методу Ритвельда.

Структуру и морфологию поверхности оксидных слоев исследовали с помощью сканирующего электронного микроскопа Carl Zeiss Sigma 02-09 и конфокального лазерного микроскопа Olympus LEXT OLS4000.

Микротвердость оценивали по Виккерсу (ГОСТ Р ИСО 6507-1 – 2007) с помощью микротвердомера Shimadzu HNV-2 при нагрузке 1 Н (HV0,1).

Триботехнические свойства исследовали по схеме возвратно-поступательного движения индентора по плоскому образцу в режиме сухого трения, используя универсальный трибометр Nanovea TRB 50N с индентором типа шар из стали SCH12 (40X24H12CJL) в соответствии с требованиями стандарта ASTM G133 – 95 Type A. Методика исследований подробно изложена в [9].

Коэффициент теплопроводности определяли методом постоянного теплового потока на установке и по методике, подробно изложенной в [14].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Эксперименты показали, что применение нанопорошка диоксида кремния в качестве добавки в электролит положительно сказывается на производительности МДО-процесса (рис. 1).

Эксперименты показали, что применение нанопорошка диоксида кремния в качестве добавки в электролит положительно сказывается на структуре оксидного слоя: снижается количество микротрещин, пор и других внутренних дефектов (рис. 2 и 3), а также становится более однородной поверхность получаемого покрытия (таблица 1).

При добавке нанодисперсного SiO_2 в количестве 3–5 г/л выявлено повышение содержания в оксидном слое наиболее прочной и износостойкой фазы $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (корунд) при одновременном снижении содержания метастабильных фаз ($\gamma+\gamma'$)- Al_2O_3 (алюмоокислородная

шпинель) и муллита (рис. 4 а и б). Кроме того, при концентрации наночастиц SiO_2 в электролите 3 г/л в оксидном слое формируется высокотемпературная фаза SiO_2 тридимит и другие уникальные фазы общим содержанием 3...7 %, в отношении которых требуется проведение дополнительных исследований. Увеличение содержания в оксидном слое $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ожидаемо приводит к повышению микротвердости и износостойкости синтезированных оксидных слоев (таблица 2 и рис. 5). При модифицировании электролита наночастицами SiO_2 микротвердость оксидных слоев увеличилась приблизительно на 30–35 %.

Трибологические испытания показали, что оксидные слои на алюминиево-кремниевых сплавах (на примере силумина АК9пч), полученные в модифицированном наночастицами SiO_2 электролите, обладают существенно более высокой износостойкостью по сравнению с базовым вариантом (рис. 5). Приведенный износ образца оксидного слоя уменьшился при модифицировании электролита с $19,3 \cdot 10^{-6}$ г/(м·Н) до $5,7 \cdot 10^{-6}$ г/(м·Н), то есть более чем в три раза (рис. 5 а). Линейная интенсивность изнашивания уменьшилась более чем в 3 раза – с 14,2 мкм/м до 4 мкм/м (рис. 5 б). Необходимо отметить снижение износа индентора приблизительно в 7 раз при модифицировании электролита нанодисперсным SiO_2 .

Исследование теплоизоляционных свойств оксидных слоев на силуминах показало, что модифицирование электролита нанодисперсным SiO_2 приводит к существенному снижению коэффициента теплопроводности более чем в 5 раз по сравнению с базовым вариантом (рис. 6).

ОБСУЖДЕНИЕ

Обнаруженное ускорение роста оксидного слоя свидетельствует о росте температуры в реакционной зоне и, соответственно, интенсификации химических реакций, протекающих при МДО.

О росте температур в реакционной зоне свидетельствуют результаты фазового анализа. Известно [15], что оксиды алюминия образуются при температурах 600–1200 °С. Переход метастабильных полиморфных модификаций (γ -, δ -, χ -, η -) Al_2O_3 в стабильную форму $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (корунд) начинается при 800–900 °С, а наиболее интенсивно протекает при 1100–1200 °С и выше. Именно увеличение количественного содержания $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ в оксидном слое почти в 2 раза при одновременном снижении количества $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ и муллита свидетельствует о значительном возрастании температур в реакционной зоне МДО, что приводит к уменьшению содержания нежелательных по своим свойствам фаз [15] в синтезированном оксидном слое. Это объясняет существенное повышение механических и трибологических свойств модифицированных покрытий, т. к. именно корунд обладает превосходными механическими свойствами для использования в парах трения при экстремальных нагрузках (твердость корунда по шкале Мооса составляет 9 единиц). От концентрации $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ в оксидном слое прямо зависит микротвердость, износостойкость и, как следствие, качество работы в парах трения [2; 9]. Повышение однородности фазового состава слоя также способствует уменьшению количества дефектов вследствие снижения содержания хрупких

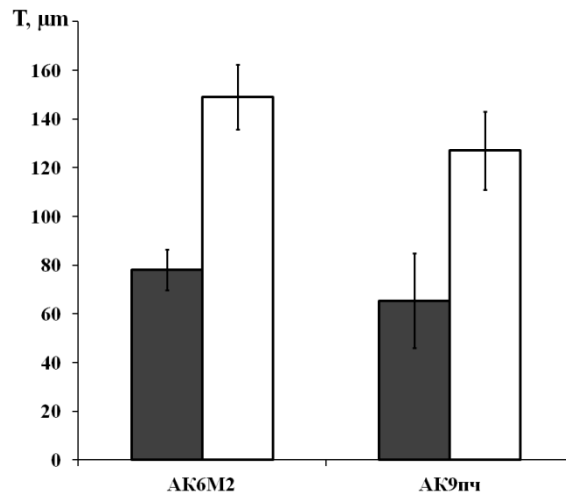


Рис. 1. Толщина оксидных слоев, полученных в базовом и модифицированном Т20 электролитах на силуминах при длительности МДО 5400 с
 ■ – оксидный слой, полученный в базовом электролите,
 □ – в модифицированном наночастицами SiO₂ электролите

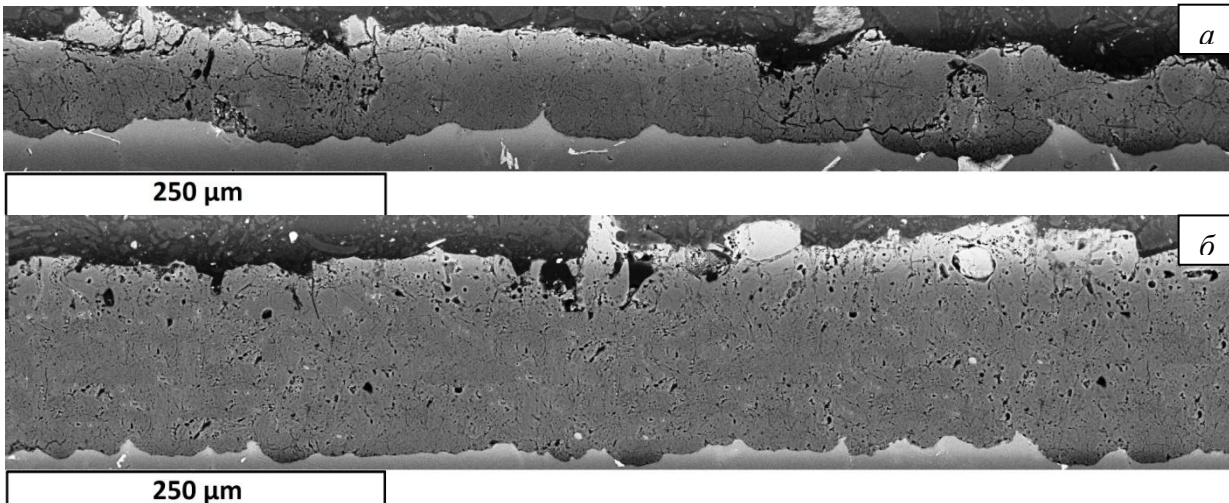


Рис. 2. Макроструктура оксидного слоя на алюминиево-кремниевом сплаве АК6М2:
 а – базовый электролит; б – модифицированный наночастицами SiO₂ электролит

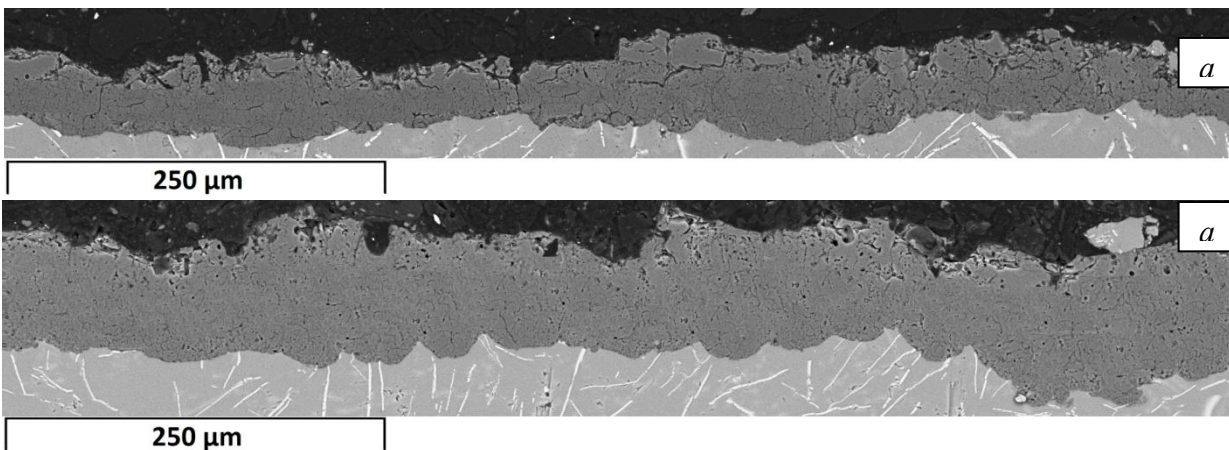


Рис. 3. Макроструктура оксидного слоя на алюминиево-кремниевом сплаве АК9пч:
 а – базовый электролит; б – модифицированный наночастицами SiO₂ электролит

Таблица 1. Шероховатость Rz и Ra, мкм, оксидного слоя после его синтеза

Электролит	Материал			
	АК6М2		АК9пч	
	Rz	Ra	Rz	Ra
Базовый	26	5,5	36	7,5
Модифицированный SiO ₂	15	3	20	4

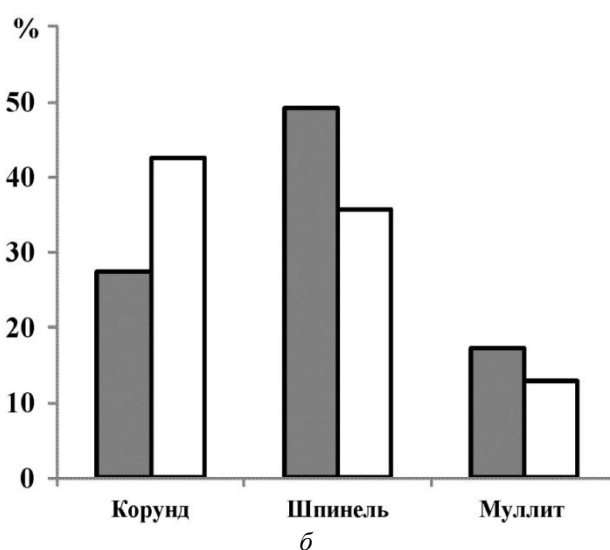
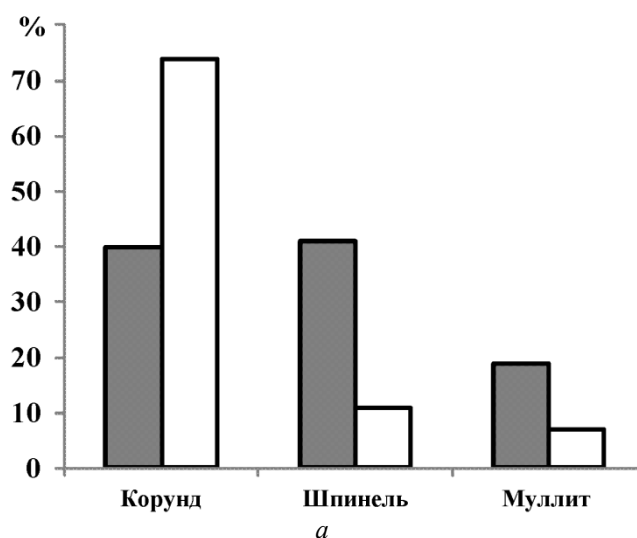


Рис. 4. Фазовый состав оксидных слоев на алюминиево-кремниевых сплавах:
 а – АК6М2; б – АК9пч
 ■ – оксидный слой, полученный в базовом электролите,
 □ – в модифицированном наночастицами SiO₂ электролите)

Таблица 2. Микротвердость HV0.1, МПа, оксидного слоя на алюминиево-кремниевых сплавах АК6М2 и АК9пч

Электролит	Материал	
	АК6М2	АК9пч
Базовый	690...740 (719*)	360...410 (390*)
Модифицированный SiO ₂	880...930 (900*)	500...550 (520*)

* Среднее значение по результатам 10-ти измерений

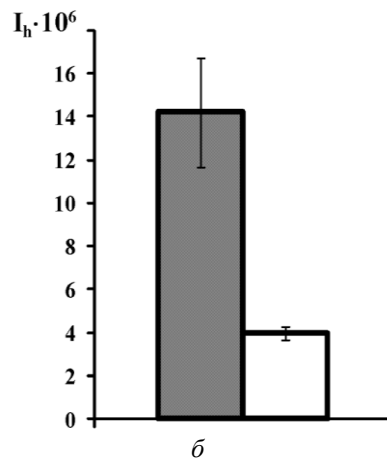
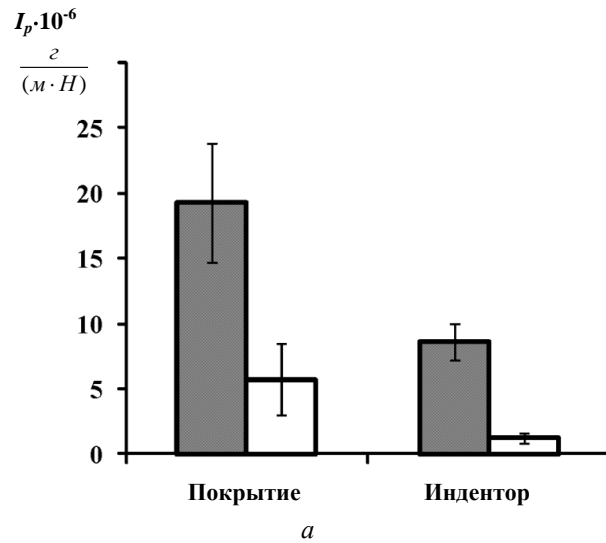


Рис. 5. Приведенный износ (а) и линейная интенсивность изнашивания (б) в паре трения «МДО-слой – сталь SCH12»
 ■ – оксидный слой, полученный в базовом электролите,
 □ – в модифицированном наночастицами SiO₂ электролите

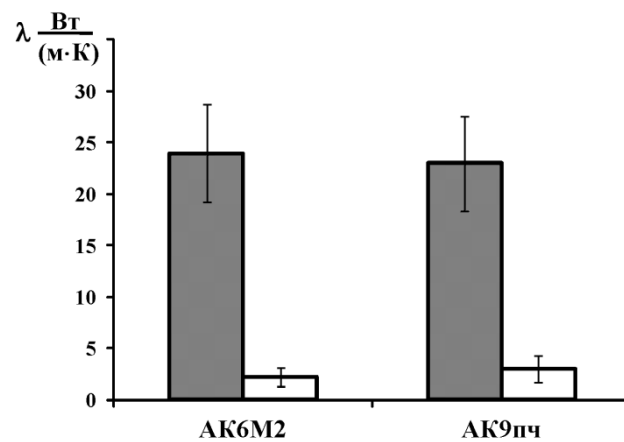


Рис. 6. Теплопроводность оксидных слоев на силуминах АК6М2 и АК9пч при температуре 100 °С
 ■ – оксидный слой, полученный в базовом электролите,
 □ – в модифицированном наночастицами SiO₂ электролите

и пористых метастабильных фаз большего удельного объема, чем корунд. Например, $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ имеет почти на 10 % меньшую плотность, чем $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (3,68 г/см³ и 3,99 г/см³ соответственно).

Возможно, повышение температур в зоне синтеза оксидного слоя до значений 1200–1500 °С в щелочной среде приводит к интенсификации процессов разложения муллита на корунд и прочие высокотемпературные фазы [16], о чем свидетельствует снижение содержания муллита в оксидном слое при одновременном увеличении содержания корунда $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (рис. 4), а также образование высокотемпературных фаз – тридимита и других.

Снижение количества структурных дефектов и фазовой неоднородности, а также выравнивание микро рельефа оксидного слоя свидетельствует о повышении однородности температурного поля на обрабатываемой поверхности во время формирования оксидного слоя, что может быть объяснено изменениями в процессах зажигания и горения микродуговых разрядов.

Резкое снижение теплопроводности оксидного слоя, вероятнее всего, обусловлено двумя причинами: внедрением в него нанодисперсного диоксида кремния и изменением его макроструктуры. Известно [17], что вводимый в электролит нанопорошок SiO_2 обладает крайне низкой теплопроводностью и является прекрасным теплоизолятором. Вероятно, в процессе синтеза оксидного слоя наноразмерные частицы SiO_2 внедряются в оксидный слой, распределяются по нему, заполняя дефекты и пустоты, что влияет на теплопроводность слоя. Изменение макроструктуры оксидного слоя при добавке нанопорошка SiO_2 в электролит выражается в формировании более рыхлой наружной части (шубы). Эта структура имеет больше, чем базовая, мелких воздушных пузырей и тонких перемычек, что обеспечивает низкую теплопроводность слоя.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Наблюдается значительное ускорение процесса формирования оксидного слоя на силуминах при введении в электролит добавки нанодисперсного диоксида кремния.

2. При применении нанодисперсного диоксида кремния в качестве добавки в электролит выявлено улучшение поперечной макроструктуры и микро рельефа формируемых оксидных слоев.

3. Введение в электролит незначительной добавки наночастиц SiO_2 приводит к существенному увеличению содержания наиболее прочной фазы $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ в составе формируемых оксидных слоев и снижению фазовой неоднородности.

4. Установлено, что сформированные в модифицированном нанодиоксидом кремния электролите оксидные слои отличаются увеличенной \approx на 30 % микротвердостью, существенно возросшей износостойкостью (\approx в 3 раза) и улучшенными теплоизоляционными свойствами (коэффициент теплопроводности снижается более чем в 5 раз).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Повышение производительности процесса МДО, механических и теплоизоляционных свойств оксидных

слоев на силуминах обуславливает практическую значимость полученных результатов.

Увеличение содержания высокотемпературной и наиболее прочной фазы $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, образование в оксидном слое высокотемпературной фазы SiO_2 тридимита и других уникальных фаз, а также повышение скорости формирования оксидного слоя свидетельствуют о росте температур в зоне его синтеза. Данный факт является нетривиальным и, видимо, связан с влиянием наночастиц диоксида кремния на микродуговые разряды и кинетику окисления в реакционной зоне МДО. Механизм этого влияния требует дополнительных исследований.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства образования и науки Российской Федерации высшим учебным заведениям и научным организациям в сфере научной деятельности. Код проекта 887.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белов Н.А., Савченко С.В., Белов В.Д. Атлас микроструктур промышленных силуминов. М.: МИСиС, 2009. 204 с.
2. Плазменно-электролитическое модифицирование поверхности металлов и сплавов. Т. 2 / под ред. И.В. Суминова. М.: Техносфера, 2011. 512 с.
3. Криштал М.М., Рюмкин М.О. Влияние исходной структуры Al-Si сплавов на свойства получаемых методом микродугового оксидирования оксидных слоев и торможение частицами кремния роста оксидного слоя // *Материаловедение*. 2008. № 12. С. 50–61.
4. Dehnavi V., Luan B., Shoesmith D., Liu X.Y., Rohani S. Effect of duty cycle and applied current frequency on plasma electrolytic oxidation (PEO) coating growth behavior // *Surface & Coatings Technology*. 2013. V. 226. P. 100–107.
5. Monfort F., Berkani A., Matykina E., Skeldon P., Thompson G.E., Habazaki H., Shimizu K. Development of anodic coatings on aluminium under sparking conditions in silicate electrolyte // *Corros. Sci.* 2007. Vol. 49. № 2. P. 672–693.
6. Руднев В.С., Ваганов-Вилькинс А.А., Яровая Т.П., Недозоров П.М. Способ получения композитных полимер-оксидных покрытий на вентилях металлах и их сплавах: патент РФ № 2483144, 16.12.2011.
7. Мамаев А.И., Бутягин П.И. Способ получения оксидных каталитически активных слоев и каталитически активный материал, полученный данным способом: патент РФ № 2152255, 14.07.1998.
8. Matykina E., Arrabal R., Skeldon P. Incorporation of zirconia nanoparticles into coatings formed on aluminium by AC plasma electrolytic oxidation // *Journal of Applied Electrochemistry*. 2008. Vol. 38. № 10. P. 1375–1383.
9. Полунин А.В., Ивашин П.В., Растегаев И.А., Боргардт Е.Д., Криштал М.М. Исследование износостойкости оксидных слоев, сформированных микродуговым оксидированием на силумине АК9ПЧ в модифицированном наночастицами диоксида кремния электролите // *Деформация и разрушение материалов*. 2015. № 2. С. 21–25.

10. Рудяк В.Я., Белкин А.А., Томилина Е.А. Сила, действующая на наночастицу в жидкости // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. № 2. С. 69–74.
11. Кульчин Ю.Н., Витрик О.Б., Дзюба В.П., Краева Н.П. Релаксация скорости неравновесных наночастиц в жидкости // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37. № 12. С. 58–66.
12. Мартыненко Ю.В., Нагель М.Ю., Орлов М.А. Наночастица в плазме // Физика плазмы. 2009. Т. 35. № 6. С. 542–546.
13. Бардаханов С.П., Лысенко В.И., Номоев А.В., Труфанов Д.Ю. Керамика из нанопорошков и ее свойства // Стекло и керамика. 2008. № 12. С. 10–13.
14. Криштал М.М., Ивашин П.В., Павлов Д.А., Полунин А.В. О теплопроводности оксидных покрытий, полученных методом микродугового оксидирования на силумине АК9ПЧ // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2012. № 4. С. 169–172.
15. Чукин Г.Д. Строение оксида алюминия и катализаторов гидрообессеривания. Механизмы реакций. М.: Принта, 2010. 288 с.
16. Стрелов К.К., Мамыкин П.С. Технология огнеупоров. 3-е изд. М.: Металлургия, 1978. 376 с.
17. Бардаханов С., Завьялов А., Зобов К., Лысенко В., Номоев А., Обанин В., Труфанов Д. Определение коэффициента теплопроводности нанопорошков диоксида кремния // Наноиндустрия. 2008. № 5. С. 24–27.
6. Rudnev V.S., Vaganov-Vilkins A.A., Yarovaya T.P., Nedorozov P.M. *Sposob polucheniya kompozitnykh polimer-oksidnykh pokritiy na ventilnykh metallakh i ikh splavakh* [Method of production of composite polymer-oxide coatings on the valve metals and their alloys], patent RF no. 2483144, 2011.
7. Mamaev A.I., Butyagin P.I. *Sposob polucheniya oksidnykh kataliticheskikh aktivnykh sloev i kataliticheskikh aktivnykh material, poluchennykh dannim sposobom* [Method of production of oxide catalytically-active layers and catalytically-active material produced by this method], patent RF no. 2152255, 1998.
8. Matykina E., Arrabal R., Skeldon P. Incorporation of zirconia nanoparticles into coatings formed on aluminum by AC plasma electrolytic oxidation. *Journal of Applied Electrochemistry*, 2008, vol. 38, no. 10, pp. 1375–1383.
9. Polunin A.V., Ivashin P.V., Rastegayev I.A., Borgardt E.D., Krishtal M.M. Durability study of oxide layers formed by microarc-oxidation on silumin AK9pch with addition of nano-sized silicon dioxide in electrolyte. *Deformatsiya i razrushenie materialov*, 2015, no. 2, pp. 21–25.
10. Rudyak V.Ya., Dubtsov S.N., Baklanov A.M. Temperature dependence of the diffusion coefficient of nanoparticles. *Technical physics letters*, 2008, vol. 34, no. 6, pp. 519–521.
11. Kulchin Yu.N., Vitrik O.B., Dzyuba V.P., Kraeva N.P. Speed relaxation of nonsynchronous nanoparticles in fluid. *Pisma v zhurnal tekhnicheskoy fiziki*, 2011, vol. 37, no. 12, pp. 58–66.
12. Martynenko Y.V., Nagel' M.Y., Orlov M.A. A nanoparticle in plasma. *Plasma Physics Reports*, 2009, vol. 35, no. 6, pp. 494–498.
13. Bardakhanov S.P., Lysenko V.I., Nomoev A.V., Trufanov D.Yu. Properties of the nanopowder ceramics. *Steklo i keramika*, 2008, no. 12, pp. 10–13.
14. Krishtal M.M., Ivashin P.V., Pavlov D.A., Polunin A.V. Thermal conductivity of oxide coatings obtained by micro-arc oxidation, on silumin AK9. *Vektor nauki Tolyattinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2012, no. 4, pp. 169–172.
15. Chukin G.D. *Stroenie oksida alyuminiya i katalizatorov gidroobesserivaniya. Mekhanizmy reaktsiy* [Composition of aluminum oxide and hydrodesulphurization catalytic agents. Reactions mechanisms]. Moscow, Printa publ., 2010, 288 p.
16. Strelou K.K., Mamykin P.S. *Tekhnologiya ogneuporou* [Refractories technology]. 3rd ed. Moscow, Metallurgiya publ., 1978, 376 p.
17. Bardahanov S., Zavyalov A., Zobov K., Lisenko V., Nomoev A., Obanin V., Trufanov D. Determination of Heat Transfer Coefficient of Silica Nanopowders. *Nanoindustriya*, 2008, no. 5, pp. 24–27.

REFERENCES

1. Belov N.A., Savchenko S.V., Belov V.D. *Atlas mikrostruktur promyshlennikh siluminou* [Atlas of microstructures of industrial silumins]. Moscow, MISiS publ., 2009, 204 p.
2. Suminov I.V., ed. *Plazmenno-elektroliticheskoe modifitsirovanie poverkhnosti metallov i splavou* [Plasma-electrolytic modification of metals and alloys surface]. Moscow, Tekhnosfera publ., 2011, vol. 2, 512 p.
3. Krishtal M.M., Ryumkin M.O. Influence of the starting structure of Al-Si alloys on the properties of oxide layers obtained by the microarc oxidation, and retardation of the oxide growth by the silicon particles. *Materialovedenie*, 2008, no. 12, pp. 50–61.
4. Dehnavi V., Luan B., Shoesmith D., Liu X.Y., Rohani S. Effect of duty cycle and applied current frequency on plasma electrolytic oxidation (PEO) coating growth behavior. *Surface & Coatings Technology*, 2013, vol. 226, pp. 100–107.
5. Monfort F., Berkani A., Matykina E., Skeldon P., Thompson G.E., Habazaki H., Shimizu K. Development of anodic coatings on aluminium under sparking conditions in silicate electrolyte. *Corros. Sci.*, 2007, vol. 49, no. 2, pp. 672–693.

IMPROVEMENT OF THE EFFICIENCY OF MICRO-ARC OXIDATION TECHNOLOGY ON ALUMINUM-SILICON ALLOYS

© 2015

M.M. Krishtal, Doctor of Physics and Mathematics,
professor of the Department «Nanotechnologies, materials sciences and mechanics», Rector
P.V. Ivashin, candidate of technical sciences, Head of the Research division № 4
A.V. Polunin, junior researcher of the Research division № 4
E.D. Borgardt, assistant researcher of the Research division № 4
A.Y. Tverдохлебов, junior researcher of the Research division № 4
Togliatti State University, Togliatti (Russia)

Keywords: microarc oxidation; silumin; nanoparticles; dioxide silica; oxide layer; microhardness; wear resistance; thermal conductivity.

Abstract: The work is devoted to the question of improving of oxidizable the most used cast aluminum alloys – aluminium-silicon alloys (silumin). The specimens of aluminium-silicon alloys 361.0 and 319.0 with oxide layers, synthesized with MAO-method in the base-composition electrolyte and in the electrolyte with addition of a small amount of nano-sized silica dioxide powder SiO_2 , were obtained. The experimental analysis of performance of micro-arc oxidation process was carried out with the base-composition electrolyte and with the modified electrolyte. The analysis of transverse structure of the obtained oxide layers, phase composition, surface morphology, microhardness, tribological and thermal insulating characteristics was performed. Founded that modification of the electrolyte with nanoscale dioxide silica powder SiO_2 significantly increases productivity of micro-arc oxidation process. Oxide layers formed in the modified electrolyte exhibit improved transverse macrostructure and microrelief compared to the base case. Adding of the nanoparticles in the electrolyte promotes formation of high-temperature phases and reduces content of metastable low-temperature phases in the oxide layers. This indicates increasing of effective temperature in a synthesis zone of the oxide layers during a process of micro-arc oxidation. The positive effect of additives SiO_2 nanoparticles in the electrolyte on microhardness was revealed. Has been founded that addition into the electrolyte of small nano-sized silica dioxide powder SiO_2 significantly increases wear resistance of the oxide layers formed on aluminum-silicon alloys. Also oxide layers formed in the modified electrolyte have a relatively high thermal insulating properties comparing with base electrolyte composition layers.