

## СТРУКТУРА И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АНОДИРОВАННОГО СЛОЯ НА ЭВТЕКТИЧЕСКОМ СИЛУМИНЕ, ПОДВЕРГНУТОГО ПРЕДВАРИТЕЛЬНОМУ ВОЗДЕЙСТВИЮ КОМПРЕССИОННЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ПОТОКОВ

Н.Н. Черенда<sup>1)</sup>, Н.В. Бибик<sup>1)</sup>, Л.С. Хорошко<sup>1), 2)</sup>, В.М. Асташинский<sup>3)</sup>, А.М. Кузьмицкий<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский государственный университет,

пр. Независимости 4, Минск 220030, Беларусь,

*Cherenda@bsu.by, Bibiknv@bsu.by, Khoroshko@bsu.by*

<sup>2)</sup>Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,

ул. П. Бровки 6, Минск 220013, Беларусь

<sup>3)</sup>Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси,

ул. П. Бровки 15, Минск 220072, Беларусь, *ast@imaph.bas-net.by*

В работе представлены результаты исследования морфологии, элементного состава и механических свойств анодированного слоя на эвтектическом легированном силумине, предварительно обработанном компрессионными плазменными потоками. Показано, что плазменное воздействие обеспечивает формирование сплошного анодированного слоя с мелкодисперсной структурой и гомогенным элементным составом. Сформированный таким образом анодированный слой обладает улучшенными механическими свойствами: микротвердостью  $\sim 2$  ГПа и коэффициентом трения  $\sim 0.2$ .

**Ключевые слова:** силумин; компрессионные плазменные потоки; анодное оксидирование.

## STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF ANODIZED LAYER ON EUTECTIC SILUMIN, PRELIMINARY TREATED BY THE COMPRESSION PLASMA FLOWS

N.N. Cherenda<sup>1)</sup>, N.V. Bibik<sup>1)</sup>, L.S. Khoroshko<sup>1), 2)</sup>, V.M. Astashynski<sup>3)</sup>, A.M. Kuzmitski<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>Belarusian State University, 4 Nezavisimosti Ave., 220030 Minsk, Belarus,

*Cherenda@bsu.by, Bibiknv@bsu.by, Khoroshko@bsu.by*

<sup>2)</sup>Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics,

6 P. Browki Str., 220013 Minsk, Belarus

<sup>3)</sup>A.V. Luikov Heat and mass transfer institute of National Academy of Science of Belarus,

15 P. Browki Str., 220072 Minsk, Belarus, *ast@imaph.bas-net.by*

Investigation of morphology, elemental composition and mechanical properties of an anodized layer grown on eutectic silumin, which was preliminary treated by compression plasma flows, were carried out in this work. It was shown, that plasma impact allows to form continuous anodic layer with dispersed structure and homogeneous elemental compositions. The coating formed in such a way has a microhardness of  $\sim 2$  GPa and a friction coefficient  $\sim 0.2$ .

**Keywords:** silumin; compression plasma flows; anodic oxidation.

### Введение

Легированные силуминовые сплавы широко используются в автомобилестроении, в частности, для изготовления поршней двигателей внутреннего сгорания (ДВС). В ходе эксплуатации ДВС днище поршня в результате соприкосновения с горящими газами испытывает высокие

тепловые нагрузки. Одним из наиболее эффективных методов защиты днища поршня от возникающих градиентов температур является формирование поверхностного анодированного слоя. Анодное оксидирование является отработанной и экономически выгодной технологией оксидирования алюминия [1]. Однако нали-

чие грубых включений кремния в составе эвтектических и заэвтектических Al-Si сплавов, а также интерметаллидных и силицидных соединений затрудняют процесс оксидирования по данной технологии, что связано с нарушением однородности анодированного слоя на поверхности материала, где присутствуют несколько фаз, кардинально отличающиеся друг от друга электрофизическими свойствами.

В работе [2] показано, что предварительная обработка поверхности сплавов системы Al-Si сильноточными электронными пучками позволяет эффективно преодолеть вышеуказанные ограничения. Известно [3], что воздействие высокогенеретическими потоками частиц на силуминовые сплавы позволяет сформировать приповерхностный модифицированный слой с гомогенным составом и дисперсной структурой, характеризующейся отсутствием крупных выделений кремния и интерметаллидов.

Целью данной работы явилось исследование влияния воздействия компрессионных плазменных потоков (КПП) на структуру и механические свойства анодированного слоя на сложнолегированном эвтектическом силумине.

### Методика эксперимента

В качестве объекта исследования были изготовлены образцы силумина следующего состава: 12.5 Si, 0.8 Mg, 0.5 Ni, 0.8 Cu, 0.5 Ni, 0.5 Fe, 0.3 Mn, остальное – Al (в ат. %). Образцы данного сплава подвергали воздействию тремя импульсами плазмы, генерируемых газоразрядным магнитоплазменным компрессором компактной геометрии [3]. Плотность энергии, поглощенной поверхностным слоем, составила 35 Дж/см<sup>2</sup> за импульс. Анодирование исследуемых образцов силумина проводилось в гальванистическом режиме в комбинированном сернокислом (120 г/л и 50 г/л, соответственно) электролите при средней плотности тока 10-24 мА/см<sup>2</sup>. В процессе анодирования осуществлялось термоста-

тирование ячейки (10-15 °C) и обеспечивалось постоянное перемешивание электролита. Оксидирование осуществлялось в течение 100 мин. По завершении образцы промывались проточной дистиллированной водой с последующей сушкой на воздухе при температуре 100 °C в течение 30 мин. Микроструктура образцов исследовалась с помощью растровой электронной микроскопии (РЭМ) на микроскопе Carl Zeiss LEO 1455VP, сопряженном с приставкой фирмы Oxford для определения элементного состава с помощью рентгеноспектрального микроанализа. Микротвердость образцов определялась на твердомере MVD 402 Wilson Instruments по методике Виккерса. Нагрузка на индентор составляла 25 г. Трибологические испытания проводились по схеме «палец-плоскость» на трибометре ТАУ-1М.

### Результаты и обсуждение

Исследование микроструктуры и элементного состава исходного силумина, подвергнутого оксидированию, выявило формирование неоднородного по составу и толщине анодированного слоя (рис. 1). Концентрация элементов в анализируемом рентгеноспектральным микроанализом слое составила: 52.2 O, 34.1 Al 12.6 Si, 0.8 S, 0.1 Cu, 0.3 Fe (в ат. %). Согласно полученным результатам, на поверхности присутствует кислород, концентрация которого меньше, чем стехиометрическая концентрация кислорода в оксиде. Видно, что оксид сформирован на поверхности неравномерно в виде островковых областей, характеризующихся повышенным содержанием кислорода (рис. 1).

Воздействие импульсами КПП на образцы исходного силумина приводит к плавлению приповерхностного слоя с последующей кристаллизацией в условиях быстрого охлаждения (10<sup>5</sup>-10<sup>7</sup> К/с). В результате воздействия формируется приповерхностный слой с дисперсной структурой и толщиной ~50 мкм. Микроструктура поверхности анодированного слоя, об-

разованного на модифицированной плазменным воздействием поверхности, представлена на рис. 2.

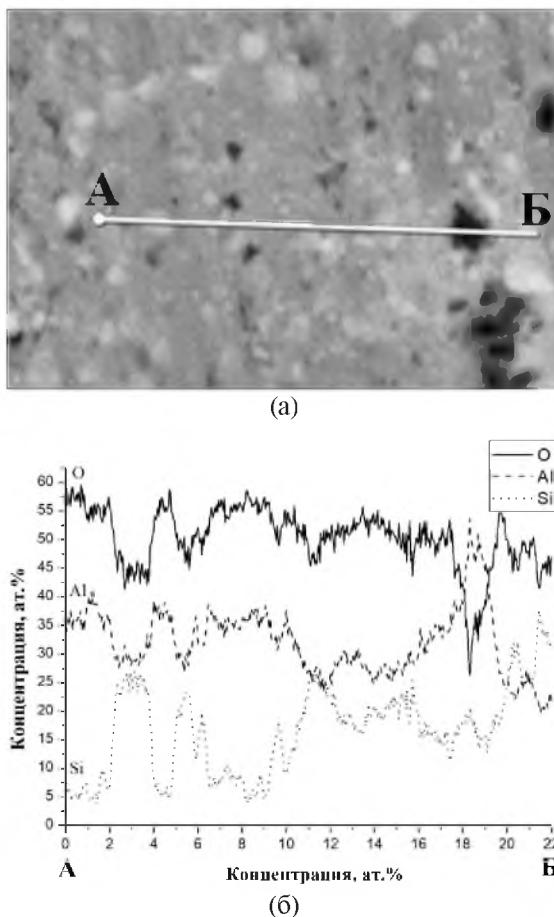


Рис. 1. Морфология поверхности исходного силумина, подвергнутого анодированию (а) и распределение элементов (б) вдоль линии АБ на рис. 1а

Анодированной слой также характеризуется дисперсной структурой и гомогенным элементным составом. Рентгеноспектральный анализ поверхности анодированного слоя показал, что в нем отсутствуют легирующие элементы исходного силумина (марганец, никель и железо), которые переходят в электролит в процессе анодирования и частично восстанавливаются на катоде. Концентрация кислорода при этом увеличилась по сравнению с оксидированным образцом без предварительной обработки на 9 ат.%, что может быть связано с увеличением сплошности оксидированного слоя.

Механические испытания образцов показали, что сформированное покрытие в результате анодирования, комбинирован-

ного с предварительным воздействием плазмы, позволяет увеличить микротвердость до 2 ГПа (микротвердость исходного силумина 1.1 ГПа); коэффициент трения при этом уменьшается от 0.8 до 0.2.

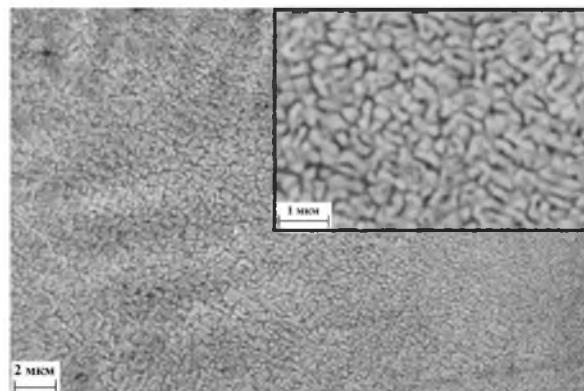


Рис. 2. Морфология поверхности силумина, подвергнутого воздействию КПП с последующим анодированием

### Заключение

Установлено, что предварительное воздействие импульсами КПП на эвтектический легированный силумин позволяет сформировать при последующем анодировании сплошный однородный оксидный слой с дисперсной структурой, обладающий большей микротвердостью и меньшим коэффициентом трения по сравнению с исходным силумином.

### Библиографические ссылки

- Хенли В.Ф. Анодное оксидирование алюминия и его сплавов. Пер. с анг. / под ред. Синявского В.С. М.: Металлургия, 1986. 152 с.
- Бестетти М., Андреа Л.Н., Батуан А., Ахмадеев У.Н., Петрикова Е.А., Иванов Ю.Ф., Москвин Р.В. и Коваль Н.Н. Исследование свойств анодных оксидов, выращенных на поверхности алюминиево-кремниевых сплавов, подвергнутых облучению импульсными электронными пучками. *Materials. Technologies. Design.* 2023; 3(13). 109-122.
- Ласковнев А.П., Иванов Ю.Ф., Петрикова Е.А., Коваль Н.Н., Углов В.В., Черенда Н.Н., Бибик Н.В., Асташинский В.М. Модификация структуры и свойств эвтектического силумина электронно-ионно-плазменной обработкой. Беларусская наука, Минск; 2013. 287 с.