

## МИКРОСТРУКТУРА, СОСТАВ И СВОЙСТВА СЛОЕВ, ФОРМИРУЕМЫХ НА ПОВЕРХНОСТИ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ АД1 И Д16 В ПРОЦЕССАХ ИОННО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ

В.В. Поплавский<sup>1)</sup>, В.Г. Матыс<sup>1)</sup>, А.А. Могдалова<sup>2)</sup>, И.Л. Поболь<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский государственный технологический университет,  
ул. Свердлова 13а, Минск 220006, Беларусь, vasily.poplav@tut.by

<sup>2)</sup>Физико-технический институт НАН Беларуси,  
ул. Купревича 10, Минск 220141, Беларусь, pobol@phti.by

Проведены исследования микроструктуры и состава слоев, формируемых на поверхности алюминиевых сплавов различного состава АД1 и Д16 в процессах ионно-плазменного азотирования и последующего ионно-ассистированного осаждения церия, и влияния ионно-плазменной обработки на коррозионные свойства материалов. В процессе ионно-плазменного азотирования сплавов в среде, содержащей азот, аргон и водород в различных комбинациях, получены азотсодержащие с включением кислорода слои толщиной  $\sim(1.0\text{--}1.5\text{ мкм})$ . При последующем ионно-ассистированном осаждении церия из плазмы вакуумного дугового разряда сформированы многокомпонентные аморфные слои толщиной до 50 нм, включающие атомы осажденного металла, азота, компонентов подложки, в т.ч. кислород оксидной пленки, и примеси углеводородов. Анализируется влияние комбинированной ионно-плазменной обработки поверхности на коррозионную устойчивость сплавов в хлоридной среде.

**Ключевые слова:** алюминиевые сплавы; ионно-плазменное азотирование; ионно-ассистированное осаждение; церий; коррозионные свойства.

## MICROSTRUCTURE, COMPOSITION AND PROPERTIES OF LAYERS FORMED ON SURFACE OF ALUMINUM ALLOYS AD1 AD16 DURING COMBINED ION PLASMA TREATMENT

Vasily Poplavsky<sup>1)</sup>, Vladimir Matys<sup>1)</sup>, Anastasia Mogdalova<sup>2)</sup>, Igor Pobol<sup>2)</sup>,

<sup>1)</sup>Belarusian State Technological University,  
13a Sverdlova Str., 220006 Minsk, Belarus, vasily.poplav@tut.by

<sup>2)</sup>Physical-Technical Institute of NAS of Belarus,  
10 Kuprevicha Str., 220141 Minsk, Belarus, pobol@phti.by

Studies of the microstructure and composition of layers formed on the surface of aluminum alloys of various compositions AD1 and D16 in the processes of ion-plasma nitriding and subsequent ion-assisted deposition of cerium, and the effect of ion-plasma treatment on the corrosion properties of materials have been carried out. In the process of ion-plasma nitriding of alloys in a medium containing nitrogen, argon, and hydrogen in various combinations, nitrogen-containing layers with oxygen inclusions with a thickness of  $\sim(1.0\text{--}1.5\text{ }\mu\text{m})$  were obtained. During the subsequent ion beam assisted deposition of cerium from the plasma of a vacuum arc discharge, multicomponent amorphous layers up to 50 nm thick were formed, including atoms of the deposited metal, nitrogen, and substrate components, including oxygen from the oxide film, and hydrocarbon impurities. The effect of combined ion-plasma surface treatment on the corrosion resistance of alloys in a chloride environment is analyzed.

**Keywords:** aluminum alloys; ion-plasma nitriding; ion beam assisted deposition; cerium; corrosion properties.

### Введение

Алюминиевые сплавы широко применяются в авиа- и машиностроении благодаря высокому соотношению плотности и прочности. Вследствие образования на поверхности алюминия и его сплавов в атмосферных условиях стабильной и плотной оксидной пленки толщиной

$\sim 10$  нм материалы обладают химической инертностью. В настоящей работе исследованы коррозионные свойства сплавов АД1 и Д16, подвергнутых ионно-плазменной обработке. Сплав АД1 содержит не менее 99.3 % алюминия, т.е. представляет собой технически чистый алюминий с хорошими антикоррозионными свойствами, высокой

пластичностью, но малой прочностью (70–100 МПа). Алюминиевый сплав Д16 относится к классу высоколегированных дуралюминов, в котором легирующие элементы – Cu, Mg, Mn, Zn – улучшают механические свойства. Высокая прочность (до 470 МПа) делают его незаменимым материалом для конструкций, подвергающихся динамическим нагрузкам. Однако наличие в его составе меди (3.8–4.9%), несмотря на ее положительный вклад в упрочнение, снижает устойчивость сплава к коррозии, особенно в средах с повышенной влажностью и под воздействием хлоридов.

Для повышения коррозионной устойчивости, а также механических свойств материалов используют метод ионно-плазменного азотирования [1]. Другим перспективным методом ионно-плазменной обработки поверхности с целью повышения коррозионной стойкости является ионно-ассистированное осаждение легирующих металлов [2]. К таким металлам можно отнести церий, поскольку соединения церия широко исследуются как альтернатива хроматам для пассивации алюминия и его сплавов, обеспечивая высокие защитные свойства формируемых конверсионных покрытий [3].

Цель данной работы: исследование микроструктуры и состава слоев, формируемых на поверхности алюминиевых сплавов АД1 и Д16 в процессах ионно-плазменного азотирования и последующего ионно-ассистированного осаждения церия, и влияния ионно-плазменной обработки на коррозионные свойства материалов.

### Методика эксперимента

Ионно-плазменное азотирование поверхности образцов проводили на установке, разработанной в ФТИ НАН Беларуси. Осуществлялась предварительная ионно-плазменная очистка поверхности в газовой среде, содержащей аргон и водород. В качестве среды на стадии выдержки использовали газовые смеси азота, аргона и водорода в различных комбинациях. Водород в смесь технологических газов включали для

удаления с поверхности алюминия оксидного слоя, наличие которого блокирует обрабатываемую поверхность, а также для предотвращения повторного окисления поверхности во время самого процесса азотирования. Азотирование проводили при температурах 420, 450 и 500 °С.

Ионно-ассистированное осаждение церия осуществляли при комнатной температуре в режиме, при котором в качестве ассистирующих процессу осаждения используются ионы осаждаемого металла. Осаждение металла и перемешивание осаждаемого слоя с поверхностным слоем подложки ускоренными ( $U = 10$  кВ) ионами того же металла проводили в экспериментальной установке, соответственно, из нейтральной фракции пара и плазмы вакуумного ( $\sim 10^{-2}$  Па) дугового разряда импульсного электродугового ионного источника.

### Результаты и обсуждение

В процессе ионно-лучевой обработки микроструктура сплава не претерпевает существенных изменений. После ионно-ассистированного осаждения церия морфология поверхности несколько изменяется – выравнивается. Имеются кластеры размером  $\sim 1$ – $10$  мкм, наличие которых обусловлено осаждением капель металла из электродугового ионного источника (рис. 1).

По данным энергодисперсионного анализа в составе исследуемых поверхностей содержатся атомы осаждаемого металла, азота и компонентов самого сплава, кислорода оксидной пленки на их поверхности, а также углерода. Содержание церия составляет несколько процентов, его атомы распределены по поверхности практически равномерно за исключением капельной фазы.

Измерение электрохимических характеристик образцов проводили в растворе 3.5% NaCl. На анодных участках поляризационных кривых (рис. 2) сплавов проявляется резкое скачкообразное возрастание анодного тока, обусловленное электрическим пробоем оксидного слоя.

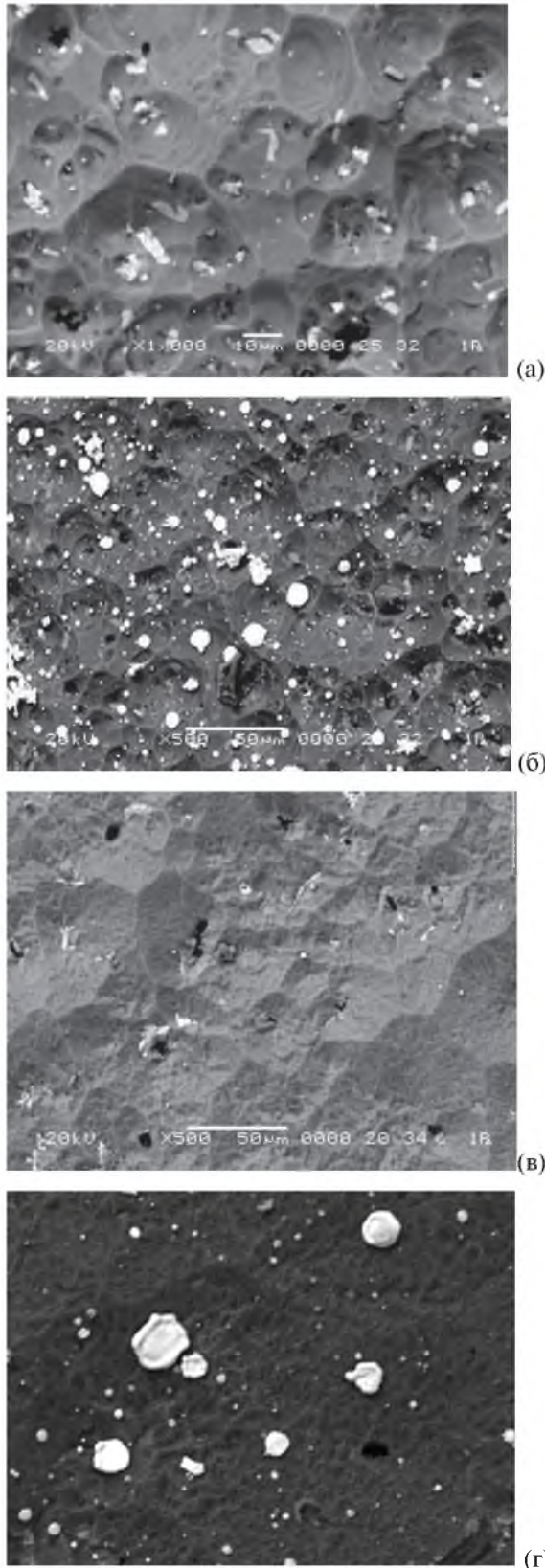


Рис. 1. Изображения поверхности образцов сплавов АД1 (а, б) и Д16 (в, г) после ионно-плазменного азотирования (а, в) и последующего ионно-ассистированного осаждения церия (б, г)

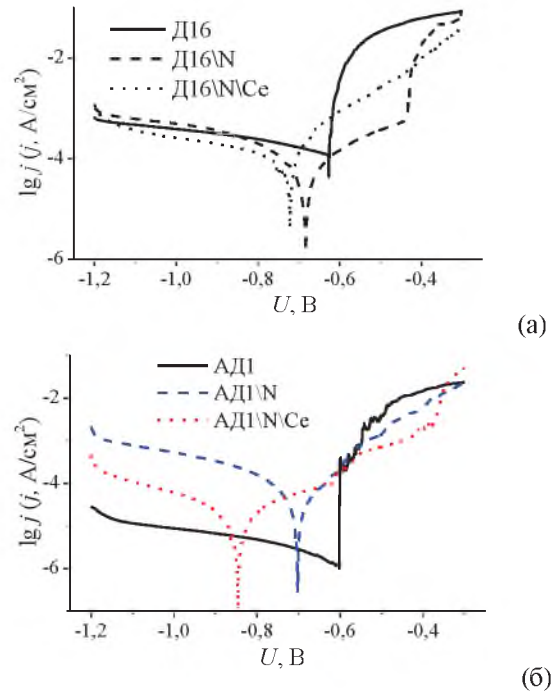


Рис. 2. Поляризационные кривые образцов сплавов Д16 (а) и АД1 (б) исходных, подвергнутых азотированию (\N) и последующему осаждению церия (\N\Ce)

Плотности тока коррозии для образцов сплавов после азотирования и осаждения церия практически не меняются и составляют примерно  $10^{-4}$  А/см<sup>2</sup>. Для сплава Д16 азотирование значительно повышает потенциал пробоя оксидной пленки на его поверхности.

### Закключение

В процессе ионно-плазменного азотирования алюминиевых сплавов в среде, содержащей азот, аргон и водород в различных комбинациях, получены азотсодержащие с включением кислорода слои толщиной  $\sim(1.0-1.5$  мкм). При последующем ионно-ассистированном осаждении церия из плазмы вакуумного дугового разряда сформированы многокомпонентные аморфные слои толщиной до 50 нм, включающие атомы осажденного металла, азота, компонентов подложки, в т.ч. кислород оксидной пленки, и примеси углеводородов [4].

Ионно-плазменное азотирование и последующее ионно-ассистированное осаждение церия практически не влияют на токи коррозии сплава Д16. Однако азотирова-



ние значительно повышает потенциал пробоя пассивной пленки на сплаве, что указывает на положительное влияние ионно-плазменного азотирования на коррозионную стойкость сплава. Осаждение церия практически не изменяет коррозионную стойкость азотированного сплава Д16 и немного улучшает коррозионную стойкость сплава АД1 снижая в несколько раз значение плотности тока коррозии.

#### Библиографические ссылки

1. Savonov G.S., Camarinha G., Rocha L.O., Barbosa M.J.R. Study of the influence of the RRA thermal treatment and plasma nitriding on corrosion behavior of 7075-T6 aluminum alloy *Surf. Coat. Technol.* 2019; 374: 736-744.
2. Poplavsky V.V., Dorozhko A.V., Matys V.G. Study of the composition and properties of protective layers formed by the ion-beam-assisted deposition of cadmium, zinc, and aluminum onto steel surfaces *J. Surf. Invest.: X-Ray, Synchrotron Neutron Tech.* 2016; 10(5): 981-988.
3. Uhart A., Ledeuil J.-B., Gonbeau D., Dupin J.-C., Bonino J.-P., Ansart F., et al. An Auger and XPS survey of cerium active corrosion protection for AA2024-T3 aluminum alloy *Appl. Surf. Sci.* 2016; 390: 751-759.
4. Poplavsky V.V., Bobrovich O.G., Dorozhko A.V., Matys V.G. Features of layer formation on the surface of valve metals in the process of the ion-beam-assisted deposition of metals from vacuum-arc discharge plasma *J. Surf. Invest.: X-Ray, Synchrotron Neutron Tech.* 2024; 18(5): 1065-1071.