

УДК 621.793:539.234:539.534.9

В.В. Поплавский, доц., канд. физ.-мат. наук;
О.Г. Бобрович, доц., канд. физ.-мат. наук;
А.В. Дорожко, доц., канд. техн. наук;
В.Г. Матыс, доц., канд. хим. наук
(БГТУ, г. Минск)

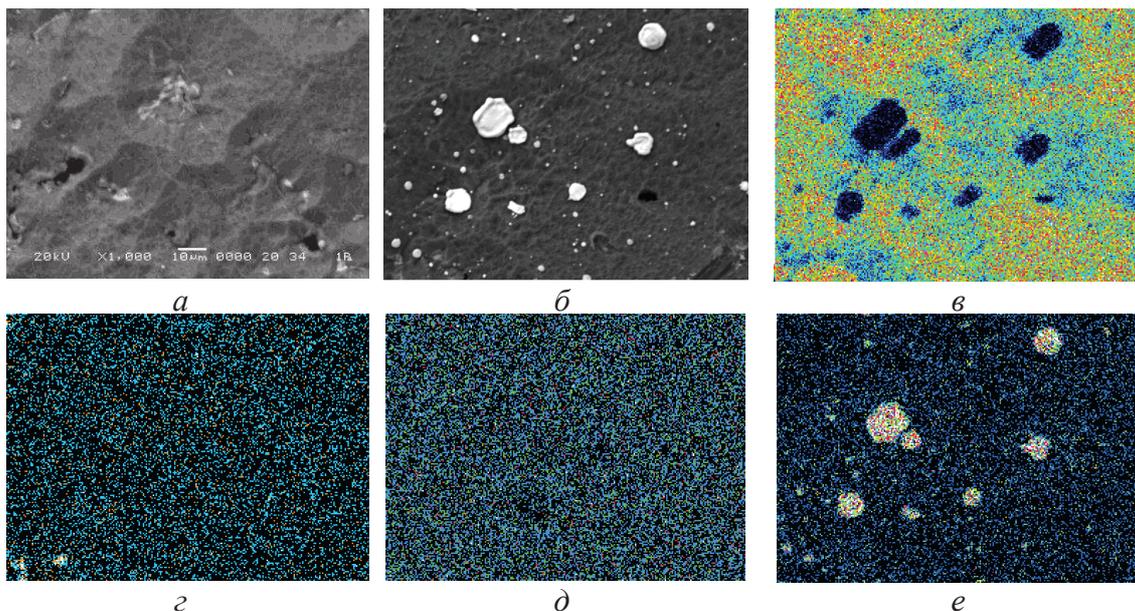
МИКРОСТРУКТУРА И СОСТАВ СЛОЕВ, ФОРМИРУЕМЫХ НА ПОВЕРХНОСТИ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА Д16 В ПРОЦЕССЕ ИОННО-АССИСТИРУЕМОГО ОСАЖДЕНИЯ МЕТАЛЛОВ

Вследствие образования на поверхности алюминия и его сплавов в атмосферных условиях стабильной и плотной оксидной пленки толщиной ~ 10 нм материалы обладают химической инертностью и могут, в частности, применяться в качестве электродов и основы электрокатализаторов электрохимических устройств – топливных элементов и электролизеров получения водорода. В условиях работы таких устройств исходной коррозионной стойкости материалов зачастую недостаточно. Для достижения необходимых свойств требуется модифицирование поверхности материалов с целью формирования устойчивых к коррозии и каталитически активных слоев, что может быть осуществлено посредством легирования ускоренными ионами металлов.

Формирование легированных металлами слоев осуществляли методом ионно-ассистируемого осаждения металлов 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, возбуждаемого в парах осаждаемого металла, ионного источника [1]. Исследуемые слои формировали на поверхности образцов из алюминиевых сплавов Д16 и Д16Т, а также из алюминия марки А7 осаждением хрома, циркония и церия.

Анализ микроструктуры и элементного состава исследуемых слоев проведен методами сканирующей электронной микроскопии и энергодисперсионного рентгеновского микроанализа с применением микроскопа JSM-5610LV и спектрометра EDX JED-2201 (JEOL). Элементный состав слоев и распределение атомов компонентов по толщине исследованы также методом спектрометрии резерфордовского рассеяния с применением ускорительного комплекса AN-2500 (High Voltage Engineering Europe).

В процессе ионно-лучевой обработки микроструктура сплавов не претерпевает существенных изменений; морфология поверхности лишь несколько изменяется за счет ионно-ассистированного осаждения металла (рис. 1). Для сплава характерна кристаллическая структура с размером зёрен ~ 10 мкм. На поверхности имеются кластеры размером порядка нескольких микрометров, наличие которых обусловлено осаждением капель металла из ионного источника. В частности отчетливо наблюдается характерная при осаждении церия капельная фаза (рис. 1б,е). Осаждение металлов, и в частности церия, проводилось с целью исследования возможности повышения коррозионной устойчивости сплавов, поскольку соединения редкоземельных металлов, и чаще всего церия, широко исследуются как альтернатива хроматам для пассивации алюминия и его сплавов, обеспечивая высокие защитные свойства формируемых гальванических конверсионных покрытий [2]. Интенсивность осаждения капель и их размеры зависят от рода осаждаемого металла; наиболее интенсивно идет процесс при осаждении церия, а также легкоплавких металлов, таких как олово, свинец. Капли имеются при осаждении любых металлов, в т.ч. и тугоплавких.



a, б – $\times 1000$; *в* – Al; *г* – Cu; *д* – Mg; *е* – Ce

Рисунок 1 – Электронно-микроскопические снимки участка поверхности образца сплава Д16 до (*a*) и после (*б*) ионно-ассистированного осаждения церия, и распределение элементов (Al, Cu, Mg, Ce) по поверхности образца

По данным энергодисперсионного анализа в составе исследуемых поверхностей содержатся атомы осаждаемых металлов и компонентов самого сплава, кислорода оксидной пленки на их поверхности, а также углерода. Содержание осажденных металлов невелико и составляет несколько процентов. Кислород входит в состав поверхностной оксидной пленки и сорбируется из остаточной атмосферы ваку-

умной камеры. Источником углерода является сорбция углеводородов – компонентов рабочей жидкости вакуумных насосов. Атомы легирующего элемента в составе слоя распределены по поверхности за исключением капельной фазы практически равномерно.

Результаты исследований элементного состава и распределения атомов элементов по толщине формируемых слоев, полученные с применением спектрометрии резерфордского обратного рассеяния, представлены в виде спектров на рис. 2. Вертикальными стрелками на спектрах указаны номера каналов анализатора, соответствующие значениям энергии анализирующих ионов гелия ^4He , претерпевших рассеяние на ядрах атомов элементов, расположенных на поверхности образцов.

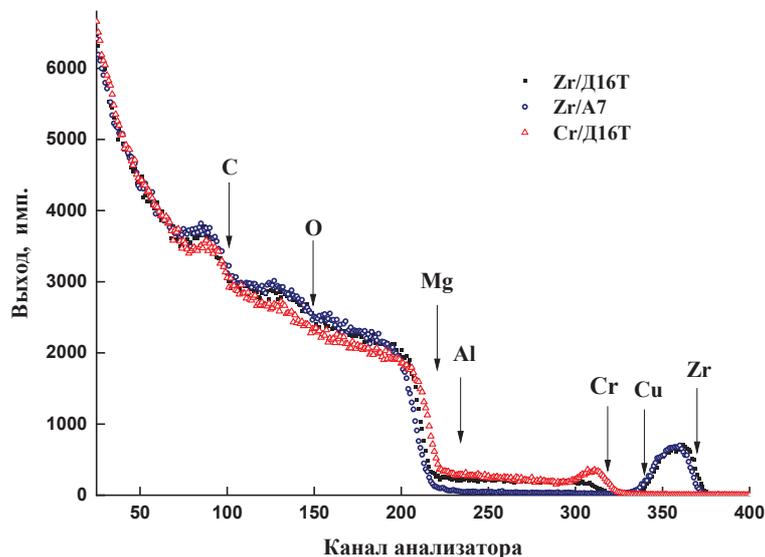


Рисунок 2 – Спектры резерфордского рассеяния ионов ^4He ($E_0 = 1,3 \text{ МэВ}$) на ядрах атомов элементов, входящих в состав слоев, сформированных на поверхности алюминия А7 и алюминиевого сплава Д16Т в процессе осаждения циркония и хрома

Анализ расположения сигналов рассеяния в спектрах от поверхности образцов свидетельствует о том, что атомы алюминия и компонентов сплава Д16Т (Al, Mg, Cu) не выходят на поверхность и исследуемые слои формируются в основном в оксидной пленке на поверхности. Содержание атомов этих металлов в слоях составляет $\sim 5 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$, в то время как содержание атомов каждого из осажденных металлов – $\sim (1-4) \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$. Содержание в слоях атомов легких элементов значительное: кислорода – $\sim (1-2) \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$, углерода – $\sim (5-7) \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$. Толщина формируемых слоев составляет $\sim 50 \text{ нм}$.

Таким образом, в процессе ионно-ассистированного осаждения металлов из плазмы вакуумного дугового разряда сформированы мно-

гокомпонентные аморфные слои толщиной до ~50 нм, включающие атомы осажденного металла, компонентов подложки, в т.ч. кислород оксидной пленки, и примеси углеводородов. Захват значительного количества газов из остаточной атмосферы вакуумной рабочей камеры и включение их в состав формируемого слоя имеют место при осаждении на поверхность алюминия, а также и других вентильных металлов (титана, тантала) и их сплавов переходных металлов, обладающих геттерными свойствами, таких как Cr, Zr, Ce и др. [3].

ЛИТЕРАТУРА

1. Poplavsky V. V., Mishchenko T. S., Matys V. G. Composition and Electrocatalytic Properties of the Coatings Formed by the Ion-Beam-Assisted Deposition of Platinum from a Pulsed Arc-Discharge Plasma onto Aluminium // *Technical Physics*. – 2010. – Vol. 55, № 2. – P. 296–302.

2. Becker M. Chromate-Free Chemical Conversion Coatings for Aluminum Alloys // *Corrosion Reviews*. – 2019. – V. 37, № 4. – P. 321–342.

3. 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. – V. 18, № 5. – P. 1065–1071.

УДК 535.343

Ю.И. Миксюк, доц., канд. физ.-мат. наук(БГТУ, г. Минск);

И.Г. Даденков, асп. (БГУ, г. Минск);

К.А. Саечников, доц., канд. физ.-мат. наук(БГПУ, г. Минск);

А.Л. Толстик, канд. физ.-мат. наук; с.н.с., (БГУ, г. Минск)

МУЛЬТИПЛЕКСНАЯ ЗАПИСЬ И ДИНАМИКА РЕЛАКСАЦИИ РЕШЕТОК В ФОТОРЕФРАКТИВНЫХ КРИСТАЛЛАХ

Фоторефрактивные кристаллы семейства силленитов обеспечивают возможность многократной динамической записи информации с использованием как непрерывного, так и импульсного лазерного излучения в видимом спектральном диапазоне, чем вызывают неизменный интерес у исследователей [1, 2]. Такие кристаллы рассматриваются перспективными для реализации систем голографического контроля и диагностики микроструктурированных объектов. Одним из важных и существенных преимуществ фоторефрактивных кристаллов семейства силленитов является тот факт, что запись и релаксация динамических голографических решеток осуществляется в реальном времени в диапа-