

ПОДГОТОВКА ПОВЕРХНОСТИ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ДЛЯ НАНЕСЕНИЯ ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ

© Т. И. Девяткина, С. И. Лучнева*, Е. Н. Васин, Н. А. Черкашев,
В. В. Исаев, Е. С. Беляев, В. В. Рогожин

Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева,
603950, г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24

* E-mail: svetic_luch@mail.ru

Поступила в Редакцию 12 сентября 2019 г.

После доработки 19 мая 2020 г.

Принята к публикации 30 июня 2020 г.

Рассмотрены различные методы подготовки поверхности при нанесении гальванопокрытий на алюминиевые сплавы. Показано, что наиболее пригодным из них является электрохимическое анодирование. Разработан состав и режим работы электролита анодирования. Показано влияние состава электролита на структуру и степень развития поверхности пленки. Отмечена устойчивость оксидной пленки, полученной в результате анодирования, к растворению в электролитах меднения и никелирования. Установлена взаимосвязь адгезии гальванопокрытий к алюминиевой основе с рельефом и равномерностью оксидных пленок. Предложенная подготовка является универсальной и может применяться для любых алюминиевых сплавов в современных автоматических линиях без разрыва технологической цепочки процессов.

Ключевые слова: *алюминиевые сплавы; оксидная пленка; оксид алюминия; анодирование; электрохимическое оксидирование; химическое оксидирование; меднение; никелирование; медное покрытие; никелевое покрытие*

DOI: 10.31857/S0044461820090091

Алюминий и его сплавы с нанесенными на них металлопокрытиями широко используются во многих отраслях техники. Номенклатура алюминиевых сплавов многообразна, при этом к каждому типу сплава необходимо подбирать подходящий способ его обработки перед нанесением различных металлопокрытий, неправильный выбор способа подготовки ведет к неудовлетворительному качеству готовой продукции, что в основном заключается в отслоении покрытий от алюминиевой основы.

Для повышения адгезии покрытий на алюминиевых сплавах предлагается ряд методов их специальной подготовки. В мировой практике на действующих

производствах в основном применяется цинкатная обработка, которая требует соблюдения точной рецептуры раствора для каждого вида алюминиевого сплава и временного режима [1–4]. Недостатки такой подготовки более подробно описаны в [2, 4]. На сформированную цинковую поверхность наносят следующий подслои гальванопокрытия, после чего обязательна стадия термообработки для улучшения его адгезии с основой и выявления бракованных изделий. Необходимость промежуточной стадии термообработки и сложности, связанные с реализацией процесса цинкатной обработки, затрудняют автоматизацию всего технологического процесса осаждения

многослойных покрытий и проведение его на современных гальванических линиях.

В качестве специальной подготовки алюминиевых сплавов также используют предварительное формирование оксидных пленок на поверхности. Разнообразие свойств оксидных пленок, получаемых при окислении алюминия, дает большие возможности использования таких пленок при решении различных задач, в том числе и требующих дальнейшего нанесения металлопокрытий. Известны различные методы формирования оксидных пленок. Например, методы термообработок, к которым относятся лазерный [5–7], газоплазменный, газопламенный методы и термовоздушное оксидирование [8–10], позволяют получать беспористую оксидную пленку достаточно большой толщины (до 100 мкм), что неприемлемо для готовых изделий высокого класса точности. Кроме того, отсутствие пор может привести к непрокрытиям поверхности основы финишными слоями.

В последнее время активно разрабатывается метод микродугового оксидирования [11–14]. В отличие от рассмотренных выше методов с помощью микродугового оксидирования структурой оксидной пленки можно управлять [11, 12], что обеспечивает адгезию металлопокрытия с алюминиевой основой. Но данный метод можно использовать только для деформируемых сплавов, и отсутствует информация о возможности применения этого метода для получения оксидных пленок на литейных сплавах и силуминах. К тому же для осуществления микродугового оксидирования необходимо использовать сравнительно сложное оборудование, так как формирование оксидной пленки происходит при напряжении до 1000 В, что приводит к значительному удорожанию себестоимости единицы продукции.

Метод химического оксидирования алюминия и алюминиевых сплавов нашел весьма широкое применение для формирования подслоя под лакокрасочные покрытия. Можно предположить, что данный метод можно использовать и под нанесение гальванопокрытий. Основными достоинствами способа химического оксидирования являются его простота и экономичность [3, 12, 15].

В работах [12, 16, 17] отмечено, что анодные оксидные пленки, сформированные в водных растворах, можно использовать в качестве подслоя перед нанесением различных гальванопокрытий.

Анализируя представленные выше методы, можно заключить, что для нанесения гальванопокрытий наиболее перспективными являются оксидные пленки, сформированные химическим (оксидирование) и электрохимическим (анодирование) способами.

Цель работы — проведение исследований алюминиевых сплавов для установления физико-химических характеристик их поверхности и разработки универсальной технологии подготовки перед нанесением гальванических покрытий, что позволит использовать такую подготовку для поверхностей алюминиевых сплавов различных марок при сокращении технологических стадий металлизации, времени процесса и повышении качества изделий.

Экспериментальная часть

В качестве образцов использовались пластины, изготовленные из алюминиевых сплавов марок В95ПЧУМ, АМцН2, АД1М, Д16АТ, АМг6БМ.

Для приготовления электролитов анодирования, меднения и корректировки pH электролитов никелирования применяли H_2SO_4 — х.ч. (ООО «СИГМАТЕК»). Основные компоненты для электролитов никелирования и меднения $NiSO_4 \cdot 7H_2O$ и $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ — х.ч., винная кислота — ч.д.а., поливиниловый спирт — марки 16/1 (АО «Химреактив»). Все вещества, перечисленные в табл. 1 (кроме H_3PO_4 и H_2SO_4), — ч., H_3PO_4 — х.ч. (ООО «АО «Реахим»). Для приготовления электролитов меднения применяли 95%-ный медицинский спирт C_2H_5OH (ООО «Гиппократ»).

Подготовка поверхности алюминиевых сплавов осуществлялась по методике [17] и включала процессы совмещенного обезжиривания–травления с последующим осветлением поверхности образцов. После подготовки образцы подвергались химическому оксидированию или анодированию в течение 5 мин при анодной плотности тока $3 \text{ А} \cdot \text{дм}^{-2}$ в растворах, составы которых приведены в табл. 1. Затем наносилось никелевое покрытие из электролита состава ($\text{г} \cdot \text{л}^{-1}$): $NiSO_4 \cdot 7H_2O$ — 90, винная кислота — 6–8, поливиниловый спирт — 0.005–0.013, pH 2.3 [17] — или медное покрытие из стандартного сернокислого электролита состава ($\text{г} \cdot \text{л}^{-1}$): $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ — 200–250 $\text{г} \cdot \text{л}^{-1}$, H_2SO_4 — 50–70 $\text{г} \cdot \text{л}^{-1}$, C_2H_5OH — 7–10 $\text{мл} \cdot \text{л}^{-1}$. Время нанесения определялось требуемой толщиной металлопокрытия.

Толщину оксидного слоя определяли гравиметрически по методике ГОСТ 9.302–88 «Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Методы контроля».

Эластичность оксидных пленок определяли по методике ГОСТ 6806–73 «Материалы лакокрасочные. Метод определения эластичности пленки при изгибе». В качестве исследуемого материала использовали

алюминиевую фольгу, которую изгибали на трубках фиксированного диаметра от 26 до 20 мм.

Для определения устойчивости сформированных оксидных пленок на алюминиевых образцах к действию электролитов с помощью потенциостата Элинс Р-30S проводили регистрацию их электрохимических потенциалов в течение 15 мин в фоновом электролите без добавления солей металлов: H_2SO_4 — $70 \text{ г}\cdot\text{л}^{-1}$, $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ — $10 \text{ мл}\cdot\text{л}^{-1}$. В качестве вспомогательного и электрода сравнения использовались платиновые электроды. Оксидную пленку можно считать устойчивой к действию такого электролита при наблюдении сдвига потенциала исследуемого образца в положительную сторону от значений потенциала без обработки и сохранении этого положительного значения во времени.

Определение степени развития поверхности исследуемого образца в ходе анодирования проводили методом импедансной спектроскопии с использованием потенциостата Элинс Р-30S и импедансметра Элинс Z-2000 на сплаве АД1М из-за низкого содержания в нем легирующих компонентов. В условиях анодирования фиксировали реактивное сопротивление и рассчитывали емкость двойного электрического слоя. По соотношению начальной и конечной величин емкости двойного электрического слоя судили о степени развития поверхности оксида исследуемого образца.

Адгезию покрытий к основе определяли в соответствии с ГОСТ 9.302–88 «Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Методы контроля» методом нанесения сетки царапин (метод рисок), методом нагрева при температуре $200\text{--}210^\circ\text{C}$ в течение 1 ч в печи, методом изменения температуры и методом полирования с использованием бязевых кругов и пасты ГОИ № 1. Количественно адгезию определяли отрывом покрытия от алюминиевой основы с использованием цифрового датчика силы с предельно допустимым усилием 25 Н (ООО «Учебное и лабораторное оборудование»).

Фотографии микропрофиля и поверхностные микроструктуры покрытий получали с помощью оптического микроскопа Keyence VH-Z100UR при использовании универсальной увеличивающей линзы RZx100–x1000.

Обсуждение результатов

Алюминий, помещенный в электролиты, предназначенные для осаждения покрытий, обладает высоким отрицательным потенциалом, поэтому на алюминиевой поверхности в результате контактного

восстановления ионов металлопокрытия образуется металл в виде порошка, плохо сцепленного с основой. Такой контактный обмен можно снизить или устранить путем снижения отрицательного потенциала алюминия за счет формирования на его поверхности химическим или электрохимическим способом оксидных пленок.

Возможность применения в качестве подслоя перед нанесением гальванопокрытий оксидных пленок определяли по их устойчивости в кислых электролитах. В качестве такого электролита использовался фоновый раствор, являющийся базовым для электролита меднения: H_2SO_4 — $70 \text{ г}\cdot\text{л}^{-1}$, $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ — $10 \text{ мл}\cdot\text{л}^{-1}$, pH 0.9–1.0. Составы растворов химического и электрохимического оксидирования приведены в табл. 1.

Алюминиевые электроды с химически сформированными оксидными пленками (рис. 1, а, кривые 3–6) характеризуются более отрицательным электродным потенциалом по сравнению с вариантом без обработки (рис. 1, а, кривая 1), что впоследствии приводит к их растворению в фоновом растворе. Следует отметить, что наиболее устойчивой является химически сформированная пленка (рис. 1, а, кривая 2), полученная из раствора состава ($\text{г}\cdot\text{л}^{-1}$): CrO_3 — 8, $\text{NH}_4\text{F}\cdot\text{HF}$ — 2, $\text{K}_4\text{Fe}(\text{CN})_6$ — 1. Предположительно, данная пленка состоит из соединений хрома и алюминия [Al_2O_3 , Cr_2O_3 , $\text{Al}(\text{OH})_3$ и $\text{Cr}(\text{OH})_3$]. После погружения в кислый электролит меднения потенциал образца смещается в положительную сторону, поскольку на поверхности алюминиевого образца происходит образование дополнительной пассивной пленки [$\text{Cr}(\text{NH}_3)_6(\text{SO}_3\text{F})_2$ и $\text{Al}(\text{OH})_3$].

Однако и такая пленка подвергается растворению со сдвигом потенциала в отрицательную сторону. Таким образом, оксидные пленки, полученные химическим способом, не устраняют протекание реакции контактного обмена, что в дальнейшем приводит к получению покрытия, не имеющего прочной адгезии с основой.

Согласно проведенным исследованиям, медное покрытие, нанесенное на алюминиевые пластины с химически сформированными пленками, действительно обладает некоторой адгезией, но не выдерживает высокотемпературного нагрева. К тому же такие пленки не обладают достаточной эластичностью, о чем свидетельствуют отслоения покрытия на выступах сложнопрофильных деталей. При определении эластичности оксидной пленки ее растрескивание наблюдается уже при перегибе на трубке диаметром 24 мм, что свидетельствует о недостаточной эластичности по сравнению с электрохимическими оксидными

Таблица 1
Составы исследуемых электролитов для обработки алюминия и его сплавов

Вид электролита предварительной обработки	Состав электролита, г·л ⁻¹
Без обработки	Сплав без обработки
Химическое оксидирование	CrO ₃ — 8, NH ₄ F·HF — 2, K ₄ Fe(CN) ₆ — 1
	CrO ₃ — 7, NaF — 17, K ₄ Fe(CN) ₆ — 4, HNO ₃ — 5, H ₃ BO ₃ — 4
Пассивирование	(NH ₄) ₂ S ₂ O ₈ — 40
	CrO ₃ — 8, NaF — 1, H ₃ PO ₄ — 48
	Na ₂ SiF ₆ — 6, H ₃ PO ₄ — 100
Анодное оксидирование	H ₂ SO ₄ — 275, H ₃ PO ₄ — 300
	H ₂ SO ₄ — 275, H ₃ PO ₄ — 300, NH ₄ F·HF — 15
	H ₂ SO ₄ — 275, H ₃ PO ₄ — 300, NaF — 5
	H ₂ SO ₄ — 275, H ₃ PO ₄ — 300, (NH ₄) ₂ SO ₄ — 7.5
	H ₂ SO ₄ — 300
	H ₂ SO ₄ — 150, H ₃ PO ₄ — 150

ми пленками, выдерживающими перегиб на меньших диаметрах.

Ранее было показано [16, 17], что предварительное анодирование в растворах состава (г·л⁻¹): H₂SO₄ — 275, H₃PO₄ — 300 с добавками NH₄F·HF — 15 или NaF — 5 — дает возможность получить хорошее сцепление гальванических покрытий с основной алюминиевых сплавов различных марок. В присутствии

NH₄F·HF и NaF устойчивость пленок сохраняется (рис. 1, б, кривые 8, 9). Однако медное покрытие, нанесенное на оксидную пленку, сформированную в электролите с NaF, имеет крупнокристаллическую структуру, чего не наблюдается при анодировании в составе с NH₄F·HF. Поскольку поверхностная пористость оксидных пленок, сформированных в этих электролитах, примерно одинакова [16], различие

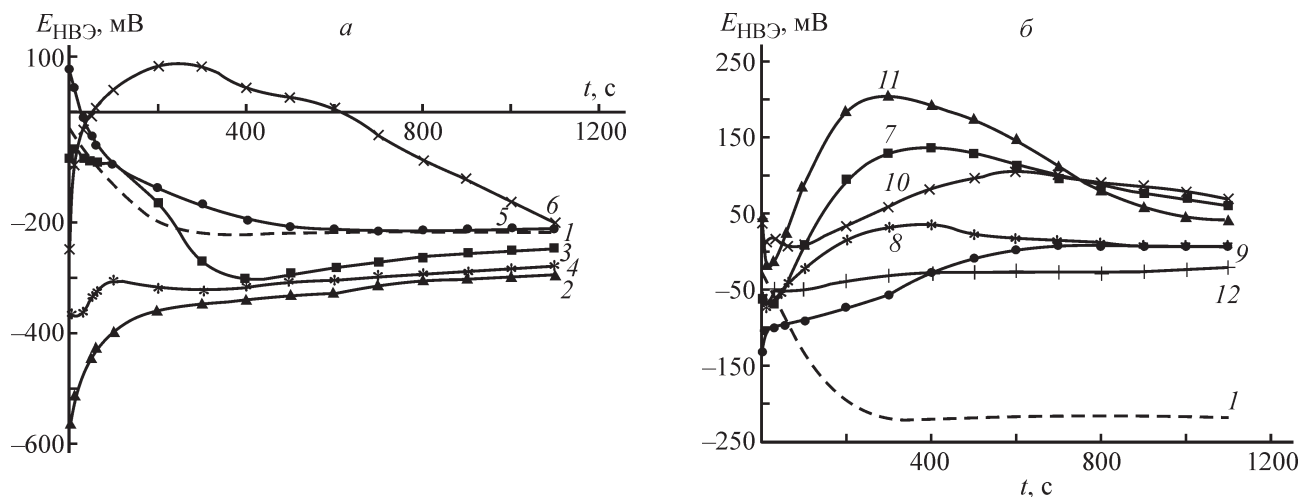


Рис. 1. Изменение во времени потенциала алюминиевого электрода с оксидными пленками, предварительно сформированными химическим (а) и электрохимическим (б) способами.

Состав фонового электролита: H₂SO₄ — 70 г·л⁻¹, C₂H₅OH — 10 мл·л⁻¹.

1 — Сплав без обработки; состав химического оксидирования (г·л⁻¹): 2 — CrO₃ — 8, NH₄F·HF — 2, K₄Fe(CN)₆ — 1; 3 — CrO₃ — 7, NaF — 17, K₄Fe(CN)₆ — 4, HNO₃ — 5, H₃BO₃ — 4; состав пассивирования (г·л⁻¹): 4 — (NH₄)₂S₂O₈ — 40; 5 — CrO₃ — 8, NaF — 1, H₃PO₄ — 48; 6 — Na₂SiF₆ — 6, H₃PO₄ — 100; состав электрохимического оксидирования (г·л⁻¹): 7 — H₂SO₄ — 275, H₃PO₄ — 300; 8 — H₂SO₄ — 275, H₃PO₄ — 300, NH₄F·HF — 15; 9 — H₂SO₄ — 275, H₃PO₄ — 300, NaF — 5; 10 — H₂SO₄ — 275, H₃PO₄ — 300, (NH₄)₂SO₄ — 7.5; 11 — H₂SO₄ — 300; 12 — H₂SO₄ — 150, H₃PO₄ — 150.

структур медных осадков обусловлено прежде всего поверхностным строением самой оксидной пленки. Действительно, в присутствии этих добавок микропрофиль оксидных пленок существенно различается (рис. 2). Перепад высот образца с оксидной пленкой, сформированной в электролите с NaF , составляет 120, а в электролите с $\text{NH}_4\text{F}\cdot\text{HF}$ — 80 мкм. Пленка, сформированная в составе с $\text{NH}_4\text{F}\cdot\text{HF}$, имеет более упорядоченное строение. Такая структура пленки и позволяет в дальнейшем получить мелкокристаллическое покрытие. Таким образом, улучшающей добавкой в электролите анодирования можно считать $\text{NH}_4\text{F}\cdot\text{HF}$.

Однако такой сульфатно-фосфатный электролит содержит в своем составе значительное количество

экологически небезопасной серной кислоты и дорогостоящей ортофосфорной кислоты. Поэтому целесообразно снижение концентраций этих компонентов. В связи с этим для последующих исследований был выбран разбавленный сульфатно-фосфатный электролит анодирования состава ($\text{г}\cdot\text{л}^{-1}$): H_2SO_4 — 150, H_3PO_4 — 150.

Оксидная пленка, сформированная в таком электролите, является самой устойчивой по сравнению с другими пленками, так как ее потенциал наиболее постоянен в течение времени (рис. 1, б, кривая 12). Однако микропрофиль поверхности оксидной пленки (рис. 2, в) имеет неравномерный характер с ярко выраженными кавернами, при этом значение перепада высот велико и составляет около 120 мкм. Следует

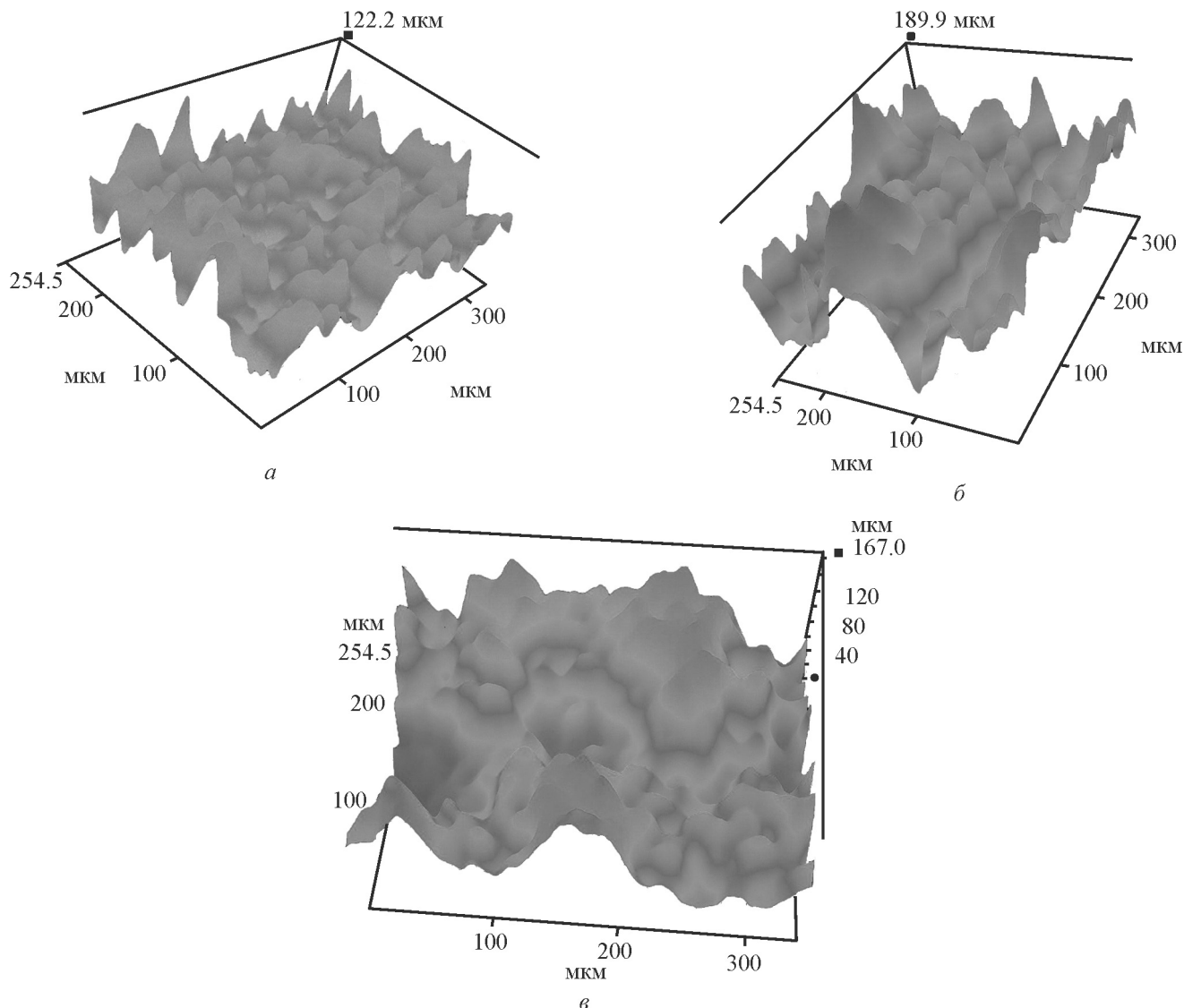


Рис. 2. Микропрофиль оксидных пленок, сформированных в процессе анодирования в электролитах ($\text{г}\cdot\text{л}^{-1}$): H_2SO_4 — 275, H_3PO_4 — 300, $\text{NH}_4\text{F}\cdot\text{HF}$ — 15 (а), H_2SO_4 — 275, H_3PO_4 — 300, NaF — 5 (б) и H_2SO_4 — 150, H_3PO_4 — 150 (в).

отметить, что последующее осаждение меди на оксидную пленку, сформированную в разбавленном электролите, приводит к непрокрытиям алюминиевой основы.

Таким образом, появилась необходимость улучшить структуру оксидной пленки, сформированной в разбавленном сульфатно-фосфатном электролите, путем введения в его состав $\text{NH}_4\text{F}\cdot\text{HF}$.

Оптимальное содержание $\text{NH}_4\text{F}\cdot\text{HF}$ в электролите определяли на основании изменения степени развития поверхности анодной пленки (рис. 3). Наибольшее развитие поверхности и упорядочение структуры у алюминиевого образца наблюдается у оксидной пленки, сформированной в присутствии 13–15 г·л⁻¹ этой добавки. Возможно, это произошло из-за того, что раствор, содержащий бифторид-анион ($\text{F}-\text{H}-\text{F}$)⁻, обладает более мягким травящим действием, чем электролит с фторид-ионом.

Нужно учитывать и тот факт, что травящее действие компонентов электролита анодирования может приводить и к уменьшению толщины оксидного слоя. Установлено, что толщина оксидной пленки, полученной в разбавленном сульфатно-фосфатном составе, на всех исследуемых сплавах увеличивается с течением времени процесса формирования оксида и изменяется от 1.8 спустя 3 мин анодирования до 4.0 мкм по прошествии 9 мин анодирования. При добавлении $\text{NH}_4\text{F}\cdot\text{HF}$ толщина пленки существенно меньше и спустя 5 мин практически не изменяется, составляя 1.0–1.5 мкм (табл. 2). Однако такой толщины оксидной пленки вполне достаточно для электроосаждения качественного медного покрытия с хорошей адгезией.

При анодировании в течение 4–5 мин наблюдается стабилизация напряжения, введение в электролит анодирования $\text{NH}_4\text{F}\cdot\text{HF}$ в концентрациях до 13–15 г·л⁻¹ позволяет снизить его величину примерно в 2 раза по сравнению с разбавленным сульфатно-фос-

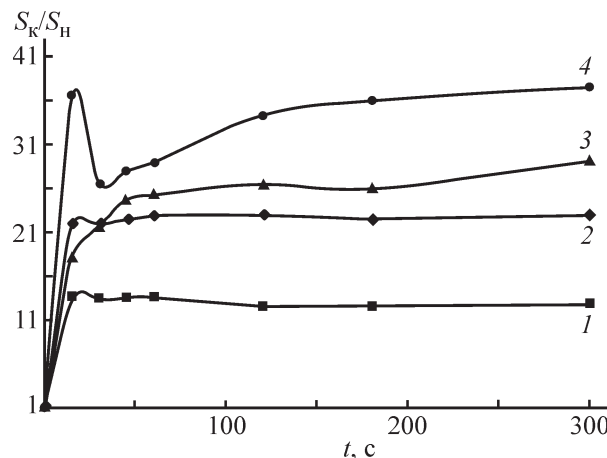


Рис. 3. Зависимость степени развития поверхности оксидной пленки от времени в электролите анодирования (г·л⁻¹): H_2SO_4 — 150, H_3PO_4 — 150 — с разным содержанием $\text{NH}_4\text{F}\cdot\text{HF}$.

1 — без добавок; содержание $\text{NH}_4\text{F}\cdot\text{HF}$ (г·л⁻¹): 2 — 5, 3 — 9, 4 — 13.

фатным электролитом. Это позволяет значительно снизить затраты на электроэнергию.

Изменение концентрации ортофосфорной кислоты может также привести к изменению напряжения на ванне анодирования (рис. 4). При концентрации H_3PO_4 250 г·л⁻¹ напряжение на ванне анодирования наименьшее.

Увеличение концентрации ортофосфорной кислоты благоприятным образом сказывается и на поверхностной микроструктуре оксидной пленки: увеличивается не только количество пор, но и их диаметр (рис. 5), а расположение при этом имеет равномерный характер. При дальнейшем увеличении концентрации H_3PO_4 свыше 250 г·л⁻¹ поры начинают образовывать отдельные конгломераты, расположенные в хаотичном порядке.

При увеличении концентрации ортофосфорной кислоты в незначительной мере снижается степень

Таблица 2

Толщина оксидной пленки, сформированной в электролите (г·л⁻¹): H_2SO_4 — 150, H_3PO_4 — 150 — с различным содержанием $\text{NH}_4\text{F}\cdot\text{HF}$

Содержание $\text{NH}_4\text{F}\cdot\text{HF}$, г·л ⁻¹	Толщина оксидной пленки, мкм, для сплава				
	АМг6БМ	АМцН2	В95ПЧУМ	Д16АГ	АД1М
0	2.332	2.667	2.849	3.198	2.92
5	1.955	1.34	2.137	1.257	1.964
9	1.187	0.936	1.662	1.2	1.556
11	0.782	0.796	1.369	0.554	1.51
13	0.766	1.084	1.098	0.563	1.092

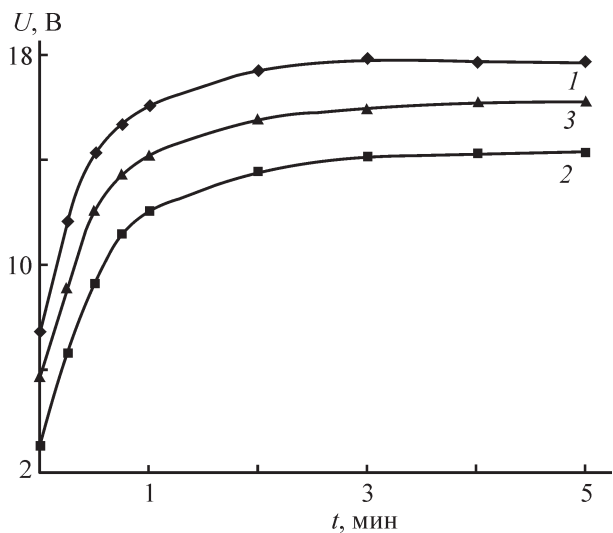


Рис. 4. Изменение напряжения на ванне анодирования во времени.

Фоновый электролит (г·л⁻¹): H₂SO₄ — 150, NH₄F·HF — 15.
 Содержание H₃PO₄ в фоновом электролите (г·л⁻¹):
 1 — 150, 2 — 250, 3 — 350.

развития оксидной поверхности. Однако эта величина, определенная для оксидной пленки, сформированной в разбавленном сульфатно-фосфатном электролите анодирования, остается выше, чем у оксида, полученного в концентрированном составе (г·л⁻¹): H₂SO₄ — 275, H₃PO₄ — 300, NH₄F·HF — 15 (рис. 6).

Таким образом, для проведения обработки алюминия и его сплавов можно рекомендовать следующий состав электролита анодирования (г·л⁻¹): H₂SO₄ — 150, H₃PO₄ — 250–275, NH₄F·HF — 13–15.

Необходимо отметить, что медное покрытие, осажденное на оксидную пленку, сформированную в рекомендуемом составе, имеет мелкокристаллическую структуру, обладает качественной адгезией даже в условиях термоудара, а катодный выход по току для меди составляет 100%.

При нанесении никелевого покрытия на оксидную пленку, полученную в рекомендуемом составе, катодный выход по току для никеля не превышает 60%, что является недостаточной величиной. Повысить

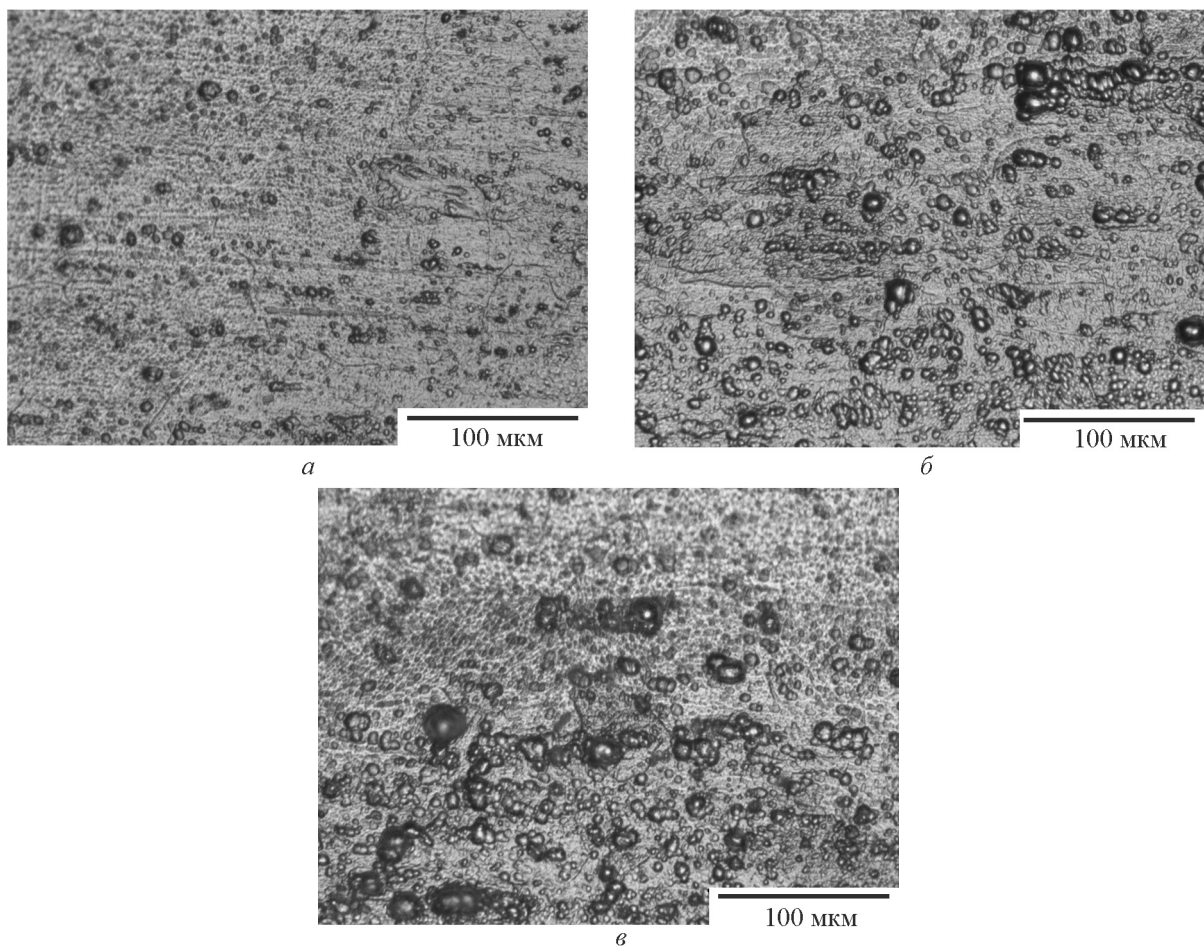


Рис. 5. Поверхностные микроструктуры оксидных пленок.

Фоновый электролит (г·л⁻¹): H₂SO₄ — 150, NH₄F·HF — 15.
 Содержание H₃PO₄ в фоновом электролите (г·л⁻¹): а — 150, б — 250, в — 350.

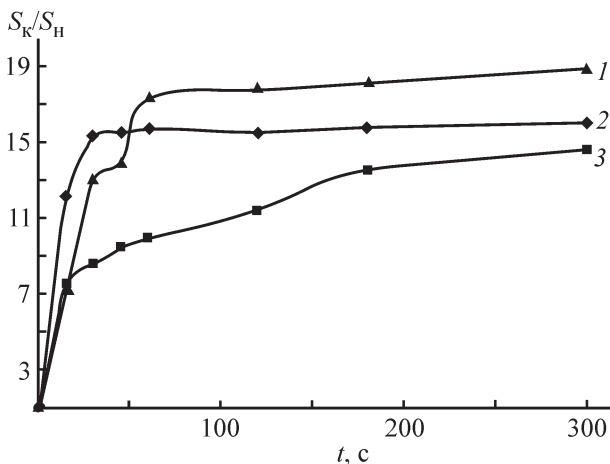


Рис. 6. Зависимость степени развития поверхности оксидной пленки от времени в электролитах анодирования.

Состав электролита (г·л⁻¹): 1 — H₂SO₄ — 150, H₃PO₄ — 250, NH₄F·HF — 15; 2 — H₂SO₄ — 150, H₃PO₄ — 400, NH₄F·HF — 15; 3 — H₂SO₄ — 275, H₃PO₄ — 300, NH₄F·HF — 15.

величину катодного выхода по току для никеля до 70% можно, применив дополнительную химическую обработку в хлоридно-фосфатном растворе, как показано в [17].

В проводимых нами исследованиях для нанесения никелевого покрытия с более высоким выходом по току предложено вводить в электролит анодирования не менее 1.7 г·л⁻¹ Ni²⁺ и выдерживать анодированные образцы непосредственно в электролите никелирования 1–2 мин. При этом были достигнуты высокие значения катодных выходов по току для никеля (80–83%) при катодной плотности 4–5 А·дм⁻², как и в ранее предложенном варианте технологии нанесения гальванопокрытий [17].

Адгезия никелевого и медного покрытий после предложенной обработки алюминия и его сплавов составляет не менее 26–30 Н·мм⁻², что позволяет использовать их как самостоятельно, так и в качестве подслоя под другие, в том числе многослойные, гальванопокрытия.

Необходимо отметить, что предложенный способ подготовки алюминиевой поверхности можно считать универсальным, так как он подходит для различных марок алюминиевых сплавов и позволяет вести технологический процесс получения гальванопокрытий, в том числе и многослойных, в единой технологической цепочке на современных гальванических линиях.

Выводы

Унификация поверхностного слоя алюминиевых сплавов для последующего электроосаждения металлопокрытий возможна в процессе анодирования в сульфатно-фосфатном растворе, содержащем бифторид-ион. Сформированные в этом процессе оксидные пленки являются более устойчивыми по сравнению с полученными химическим методом, что обеспечивает качественную адгезию металлопокрытий. Полученные электрохимическим путем оксидные пленки можно использовать для последующего нанесения медного и никелевого покрытий, а процесс анодирования положить в основу универсального способа подготовки поверхности алюминиевых сплавов. Преимуществом предложенного способа является возможность полной автоматизации всего процесса нанесения как медного и никелевого покрытия, так и многослойных покрытий.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

Информация об авторах

Десяткина Татьяна Игоревна, к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5363-9479>

Лучнева Светлана Игоревна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7190-6668>

Васин Евгений Николаевич, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1565-7286>

Черкашев Николай Андреевич, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3976-166X>

Исаев Валерий Васильевич, к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0610-5818>

Беляев Евгений Сергеевич, к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6870-5558>

Рогожин Вячеслав Вячеславович, д.т.н., проф., ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3229-4448>

Список литературы

- [1] Davis J. R. Corrosion of aluminum and aluminum alloy. Materials park: ASM Int., 1999. P. 211–214.
- [2] Pat. US 6692630 B2 (publ. 2004). Electroplated aluminum parts and process for production.
- [3] King R. G. Surface treatment & finishing of aluminium. Pergamon press, Oxford, 1988. P. 41–46. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-14664-0>
- [4] Court S., Kerr C., Ponce de León C., Smith J. R., Barker B. D., Walsh F. C. Monitoring of zincate pre treatment of aluminium prior to electroless nickel

- plating // *Trans. Inst. Met. Finish.* 2017. V. 95. N 2. P. 97–105.
<https://doi.org/10.1080/00202967.2016.1236573>
- [5] Сафонов А. Н. Основные направления эффективного использования лазерной техники для термической обработки сплавов // *Металловедение и термическая обработка металлов.* 1997. № 7. С. 2–6 [Safonov A. N. Basic directions of effective use of laser equipment for heat treatment of alloys // *Met. Sci. Heat Treat.* 1997. V. 39. N 7–8. P. 275–279.
<https://doi.org/10.1007/BF02467121>].
- [6] Vreeling J. A., Ocelík V., Pei Y. T., Agterveld D. T. L. V., Hosson J. T. M. D. Laser melt injection in aluminum alloys: On the role of the oxide skin // *Acta Materialia.* 2000. V. 48. N 17. P. 4225–4233.
[https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(00\)00278-0](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(00)00278-0)
- [7] Wu Y., Lin J., Carlson B. E., Lu P., Balogh M. P., Irish N. P., Mei Y. Effect of laser ablation surface treatment on performance of adhesive-bonded aluminum alloys // *Surf. Coat. Technol.* 2016. V. 304. P. 340–347.
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.04.051>
- [8] Пат. РФ 2218425 (опубл. 2003). Способ создания упрочненного поверхностного слоя на деталях из металлических сплавов и композиционных материалов.
- [9] Tolpygo V. K., Clarke D. R. Morphological evolution of thermal barrier coatings induced by cycling oxidation // *Surf. Coat. Technol.* 2003. V. 163–164. P. 81–86.
[https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(02\)00595-9](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(02)00595-9)
- [10] Evans A. G., Mumm D. R., Hutchinson J. W., Meier G. H., Pettit F. S. Mechanism controlling the durability of thermal barrier coatings // *Prog. Mater. Sci.* 2001. V. 46. P. 505–553.
[https://doi.org/10.1016/S0079-6425\(00\)00020-7](https://doi.org/10.1016/S0079-6425(00)00020-7)
- [11] Дударева Н. Ю., Бутусов И. А., Кальщиков Р. В. Влияние режимов микродугового оксидирования на механические свойства образцов из алюминиевого сплава // *Вестн. ПНИПУ.* 2014. № 4. С. 102–117. <https://doi.org/10.15593/perm.mech/2014.4.04>
- [12] Скопинцев В. Д. Оксидирование алюминия и его сплавов. М.: РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2015. С. 72–80.
- [13] Gu W.-C., Lv G.-H., Chen H., Chen G.-L., Feng W.-R., Yang S.-Z. Characterisation of ceramic coatings produced by plasma electrolytic oxidation of aluminum alloy // *Mater. Sci. Eng. A.* 2007. V. 447. N 1–2. P. 158–162.
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.09.004>
- [14] Pan M.-Q., Chi G.-X., Wei D.-B., Di S.-C. Current status of research and application of micro-arc oxidation of aluminum alloys and magnesium alloys in China // *Mater. Protect.* 2010. V. 43. N 4. P. 10–14.
- [15] Денкер И. И., Кулешова И. Д. Защита изделий из алюминия и его сплавов лакокрасочными покрытиями. М.: Химия, 1985. С. 23–27.
- [16] Девяткина Т. И., Яровая Е. И., Rogozhin V. V., Markova T. V., Михаленко М. Г. Анодное оксидирование сложнопрофильных деталей из алюминия и его сплавов с последующим электроосаждением медных покрытий // *ЖПХ.* 2014. Т. 87. № 1. С. 58–65 [Devyatkina T. I., Yarovaya E. I., Rogozhin V. V., Markova T. V., Mikhailenko M. G. Anodic oxidation of complex shaped items of aluminum and aluminum alloys with subsequent electrodeposition of copper coatings // *Russ. J. Appl. Chem.* 2014. V. 87. N 1. P. 54–60.
<https://doi.org/10.1134/S107042721401008X>].
- [17] Девяткина Т. И., Лучнева С. И., Борисова А. Е., Беляев Е. С., Михаленко М. Г., Rogozhin V. V., Наумов В. И. Нанесение защитно-декоративных покрытий на алюминиевые сплавы // *ЖПХ.* 2017. Т. 90. № 7. С. 861–868 [Devyatkina T. I., Luchneva S. I., Borisova A. E., Belyaev E. S., Mikhailenko M. G., Rogozhin V. V., Naumov V. I. Deposition of protective-decorative coatings onto aluminum alloys // *Russ. J. Appl. Chem.* 2017. V. 90. N 7. P. 1075–1081.
<https://doi.org/10.1134/S1070427217070084>].