

УДК 629.7.023: 669.715

В.А. Дуюнова¹, И.А. Козлов¹, М.С. Оглодков¹, А.А. Козлова¹**СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ АНОДНОГО ОКСИДИРОВАНИЯ АЛЮМИНИЙ-ЛИТИЕВЫХ И АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ (обзор)**

DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-8-79-89

Работа посвящена анализу современных научных работ в области нанесения неметаллических неорганических покрытий методом анодного оксидирования на алюминиевые и алюминий-литиевые сплавы. Рассмотрены современные тенденции развития технологии анодного оксидирования, а также сопоставлены результаты научных исследований этой технологии с традиционными технологиями. Основное внимание при анализе научных исследований уделено: механизму влияния легирующих элементов алюминиевых сплавов, выходящих на поверхность заготовки, и технологическим решениям для исключения применения токсичных соединений при анодном оксидировании и последующем наполнении.

Ключевые слова: алюминий, алюминий-литиевые сплавы, анодное оксидирование, защитные покрытия, коррозия.

V.A. Dyuynova¹, I.A. Kozlov¹, M.S. Oglodkov¹, A.A. Kozlova¹**MODERN TRENDS IN THE ANODIC OXIDATION OF ALUMINUM-LITHIUM AND ALUMINUM ALLOYS (review)**

The work is devoted to the analysis of modern scientific works in the field of application of non-metallic inorganic coatings by anodic oxidation on aluminum and aluminum-lithium alloys. The modern trends of anodic oxidation technology are considered, and the results of scientific research are compared with traditional technologies. The main attention in the analysis of scientific research is focused on the mechanism of influence of alloying elements of aluminum alloys coming to the surface, technological solutions to eliminate the use of toxic compounds in anodic oxidation and subsequent filling.

Keywords: aluminum, aluminum-lithium alloys, anodic oxidation, protective coatings, corrosion.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

Алюминий занимает второе место после железа по объему использования его в мировой промышленности. Начиная с начала прошлого века, алюминий и его сплавы являются основным конструкционным материалом для изготовления планеров авиационной техники [1]. Химический состав и технологии изготовления алюминиевых сплавов, предназначенных для авиации, на протяжении прошедших десятилетий существенно преобразились, что позволило увеличить прочностные характеристики и коррозионную стойкость металла [2]. Основным трендом настоящего времени являются алюминий-литиевые сплавы. Еще в советское время академик И.Н. Фридляндер в своих трудах [3, 4] предсказал перспективность применения свариваемых алюминий-литиевых сплавов взамен традиционно применяющихся в конструкции самолета

с целью повышения его весовой эффективности, ресурса и надежности [5–7]. На протяжении последних десятилетий в России и зарубежных странах активно ведутся исследования в области разработки и освоения технологий изготовления полуфабрикатов из алюминий-литиевых сплавов.

В мировой авиационной отрасли совершен решительный переход на алюминий-литиевые сплавы [8, 9]. Признанные мировые лидеры гражданского авиастроения – компании Boeing и Airbus – за последние годы существенно расширили долю применения алюминий-литиевых сплавов в конструкции авиационной техники [10]. Данные материалы нашли применение в качестве обшивочных листов фюзеляжа, панелей крыла и в ряде элементов силового набора планера самолета.

Отечественными специалистами при разработке сплавов нового поколения с повышенными свойствами существенное внимание уделяется легированию металлами (Sc, Zr, In, Ce и др.), позволяющими модифицировать структуру материала. Однако изменение химического состава металлических материалов влияет не только на механические свойства, но и на коррозионную стойкость. Легирующие добавки в большинстве случаев являются активными катодами по отношению к алюминию и в коррозионной среде могут инициировать питтингообразование [11].

В настоящее время наиболее эффективным решением защиты от коррозии деталей из легких сплавов является формирование на поверхности неметаллического неорганического покрытия, которое существенно снижает риск возникновения коррозии и обеспечивает увеличение адгезии лакокрасочных материалов [12–14]. Формирование таких покрытий осуществляется за счет окислительно-восстановительной реакции, протекающей как при естественных условиях, так и принудительно инициируемой посредством наложения электрического тока [15–17]. Основываясь на этом, покрытия для алюминиевых сплавов делят на химические и электрохимические. Из них наиболее эффективным является электрохимическое покрытие, получаемое за счет анодного окисления металла в электролите. Данные электрохимические покрытия, в свою очередь, группируют по составам электролитов, в которых они были сформированы. В отечественной авиационной промышленности наиболее распространенным методом нанесения электрохимических покрытий является анодное окислирование в сернокислотном электролите с последующим наполнением пор покрытий в растворах хроматов.

Иностранные авиастроительные компании, такие как Airbus, используют хромовокислотные электролиты для анодного окислирования, которые имеют в 2 раза ниже защитную способность, однако их нанесение более технологично из-за отсутствия операции наполнения анодной пленки. Хромовокислотное анодное окислирование нашло применение и в отечественной промышленности в качестве подготовки поверхности под склеивание высокопрочными клеями [18, 19]. Данные технологии хорошо отработаны на традиционных сплавах, применяемых в авиационной отрасли. В связи с ужесточением экологических норм производства и желанием конструкторов повысить весовую эффективность авиационной техники путем применения материалов с высокой удельной прочностью, таких как алюминий-литиевые сплавы, многими научными коллективами ведутся работы по адаптации традиционных технологий и по поиску новых технологических решений при анодном окислировании алюминиевых и алюминий-литиевых сплавов, а также традиционных технологий нанесения покрытий [20–52].

В зарубежной научно-технической литературе наибольшее внимание уделяется многокомпонентным (комбинированным) электролитам для анодного окислирования. Основу таких электролитов составляют серная и винная кислоты. Комбинация данных

кислот позволяет снизить образование дефектов по причине фазовой гетерогенности поверхности алюминиевых сплавов [20–25]. Однако существуют и альтернативные варианты электролитов, позволяющие формировать покрытия в щелочной среде [26].

При адаптации технологических процессов для новых алюминиевых сплавов, научными коллективами большое внимание уделяется влиянию фазовых составляющих сплава на свойства и структуру анодно-оксидных покрытий. В работе [27] рассмотрена проблема включений железа в алюминий-литиевый сплав, а также влияние фаз системы Al–Fe–Mn–Cu, содержащих высокую (>22%) (рис. 1, а) и низкую концентрацию (<5%) меди (рис. 1, б). Проведенный анализ структуры анодного покрытия образцов из сплава AA2099 позволил оценить влияние каждой из них. Видно, что в местах, где на поверхность выходит фаза, содержащая медь, формируется дефектное анодно-оксидное покрытие. Можно предположить, что высокое газовыделение в процессе анодного окисления на фазах, содержащих медь, приводит к частичному уносу оксидной пленки и не позволяет формироваться покрытию с плотной структурой. Одновременно с этим авторы отмечают, что области с содержанием меньшего количества меди оказывают более негативное влияние на структуру и защитную способность покрытия.

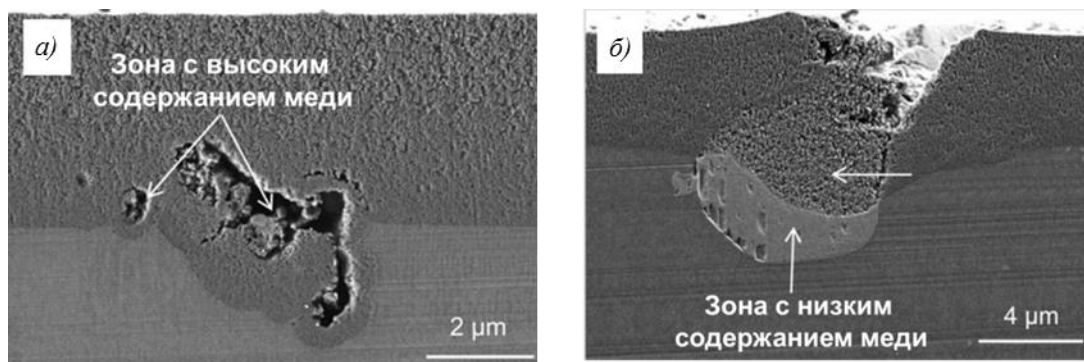


Рис. 1. Морфология поверхности образцов из сплава AA2099 после анодного оксидирования области фаз с высоким (а) и низким содержанием меди (б)

В процессе исследования влияния структуры сплава AA2297-T87 при различных уровнях напряжения в стандартном серноокислотном электролите выявлено, что фазы, содержащие незначительное количество меди, полностью растворяются в процессе оксидирования; фазы, содержащие среднее количество меди, частично растворяются и образуют дефекты; фазы, содержащие повышенное количество меди, не могут быть полностью растворены и переходят в оксидную пленку в виде оксида [28]. Растворение фаз сопровождается интенсивным выделением газов, что ведет к образованию в покрытии дефектов или отслоений (рис. 2).

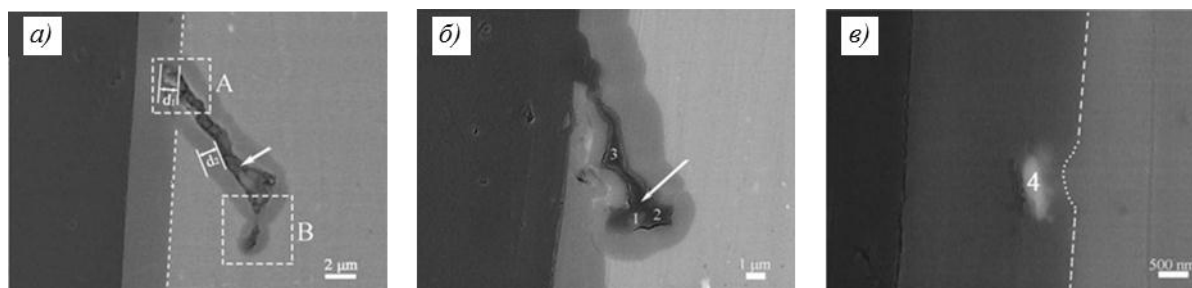


Рис. 2. Структура анодно-оксидного покрытия:

а – дефект на месте растворения медь-содержащей фазы; б – отслоение покрытия; в – участок покрытия с высоким содержанием меди

В работе [29] предложено схематическое описание формирования дефектов в анодной пленке у содержащих медь фаз алюминий-литиевого сплава AA2099 (рис. 3). Руководствуясь результатами более ранних работ [30, 31], установлено, что распределение фаз, содержащих медь, неравномерное. Структурам сплавов, легированных медью, присуще наличие слоев, содержащих медь. Такие слои становятся более различными при окислении алюминия [28, 32]. При накоплении критического объема меди в таких слоях начинается процесс окисления за счет подвода электролита через каналы анодной пленки (рис. 3, а). С течением времени в результате взаимодействия меди и электролита происходит образование пузырьков газа (рис. 3, б).

Далее мельчайшие пузырьки кислорода за счет диффузии в анодно-оксидную пленку коагулируют (рис. 3, в). Заполненная кислородом пустота ограничивает ионную миграцию, что приводит к уменьшению скорости окисления алюминиевого сплава, а, следовательно, и скорости роста покрытия. В дальнейшем происходит рост пузырька кислорода (рис. 3, г) внутри анодной пленки. При этом происходит трансформация слоя меди и скопление ионов меди непосредственно под образовавшимся пузырьком кислорода. На завершающей стадии образования дефекта происходит разрыв кислородного пузырька за счет избыточного внутреннего давления, сопровождающийся локальным разрушением анодного покрытия (рис. 3, д).

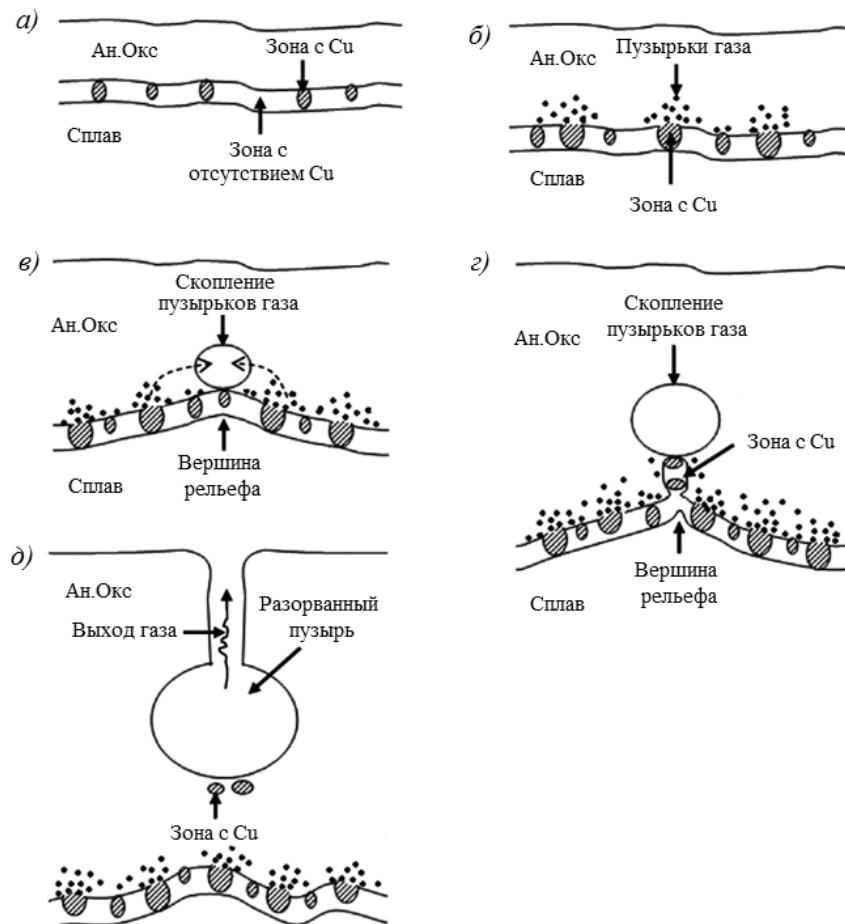


Рис. 3. Схематическая модель образования дефекта в анодно-оксидном покрытии:

а – образование нанослоя, обогащенного медью; б – окисление богатых медью наночастиц и образование пузырьков кислорода на границе раздела «анодное покрытие–сплав» с высоким содержанием меди; в – образование заполненной кислородом полости; г – рост полости, заполненной газообразным кислородом; д – разрыв, заполненного кислородом пузырька

Следует отметить, что помимо влияния фаз, содержащих медь, рассмотрено влияние фазы Al_3Zr . Данная фаза не вызывает появления разнородных дефектов в анодном покрытии (рис. 4) [33]. Авторы предполагают, что это связано со схожим электрохимическим потенциалом циркония и алюминия.

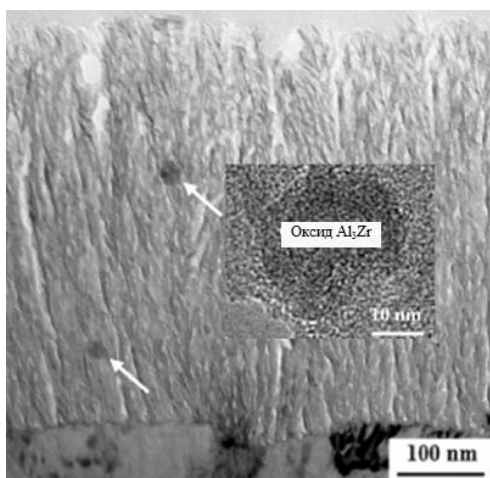


Рис. 4. Структура анодно-оксидного покрытия с окисленной фазой Al_3Zr

На основании полученных данных о влиянии фазового состава алюминий-литиевых сплавов на структуру и свойства анодно-оксидных покрытий авторами работы [34] рассмотрена возможность предварительной подготовки сплава перед анодным оксидированием путем щелочного травления с целью исключения негативного влияния фазового состава. Проведены сравнительные исследования влияния на свойства покрытия механической обработки и щелочного травления. По результатам исследований установлено, что такие фазы, как Al-Cu-Mn-Li или другие медьсодержащие фазы, растворяются при щелочном травлении за счет своей более высокой химической активности. Данный эффект позволяет формировать покрытия с меньшей пористостью, что существенно сказывается на защитных свойствах.

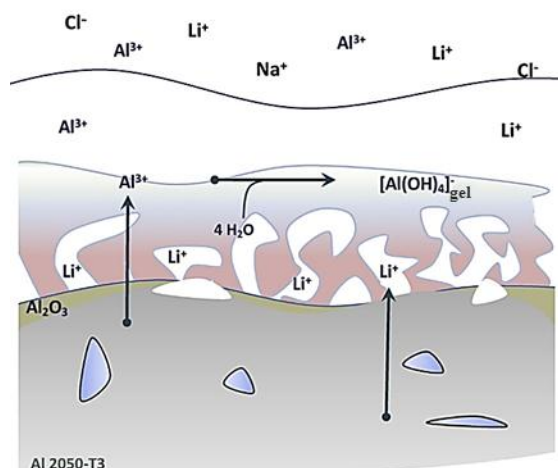


Рис. 5. Схематическая модель растворения сплава AA2050 в растворе щелочи

Проведенные исследования предварительной подготовки сплава AA2050, содержащего в своем составе литий и серебро, позволили установить, что при кратковременном травлении образцов в растворе щелочи снижается количество лития на поверхности [35]. Однако при длительном травлении на поверхности формируется гидроксидная пленка алюминия, которая, в свою очередь, существенно тормозит растворение

интерметаллидных фаз (рис. 5). Как и в предыдущих исследованиях авторов работы [36], при травлении наблюдается обогащение поверхности медью, которая также препятствует растворению фаз. Помимо этого, после длительного травления установлена необходимость в последующей обработке сплава в азотной кислоте для растворения меди и марганца, что делает электрохимический потенциал поверхности более однородным.

В более ранних работах [37] исследовано влияние трехступенчатой обработки в смеси азотной и плавиковой кислот с последующим травлением в щелочи и повторением обработки в кислотах. Установлено, что для образцов из сплавов 2024-T3, 6061-T6 и 7075-T6 на поверхности остается значительное количество меди, негативно влияющее на их коррозионную стойкость. Анализ химического состава поверхности после каждой обработки показал наличие не только гидроксида алюминия после щелочной обработки, но и гидроксида магния и цинка. Следует отметить, что введение в стандартный раствор азотной кислоты позволяет обеспечить вытравливание большего количества фазовых составляющих – в частности, кремния [38]. К сожалению, авторами не раскрыто влияние применения плавиковой кислоты на первоначальном этапе обработки, что не позволяет в полной мере оценить эффект от травления.

Тенденция по использованию комбинированных электролитов наблюдается не только для алюминиевых сплавов, содержащих литий. Так, проведены исследования влияния соли молибдена на свойства анодного покрытия на сплаве AA2024-T3 [39]. Сравнительный анализ образцов, обработанных при одних и тех же условиях в комбинированном электролите (22,5 г/л $C_4H_6O_6$ +100 г/л H_2SO_4) с добавлением натрия молибденовокислого при температуре 37°C, позволил установить, что присутствие молибдена существенно не изменило морфологию анодно-оксидного покрытия (рис. 6). Однако антикоррозионная защита в этом случае увеличивается в сравнении с обработкой в растворе винно-серной кислоты, что подтверждают измерения, полученные при электрохимическом исследовании, и результаты испытаний в камере солевого тумана (КСТ). Авторы утверждают, что достигли показателя >336 ч при экспозиции в КСТ до появления первых очагов коррозии. Это в 3,5 раза выше защитных свойств анодного оксидирования в винно-серном электролите. Данный результат достигнут без применения дополнительной обработки в виде наполнения пор.

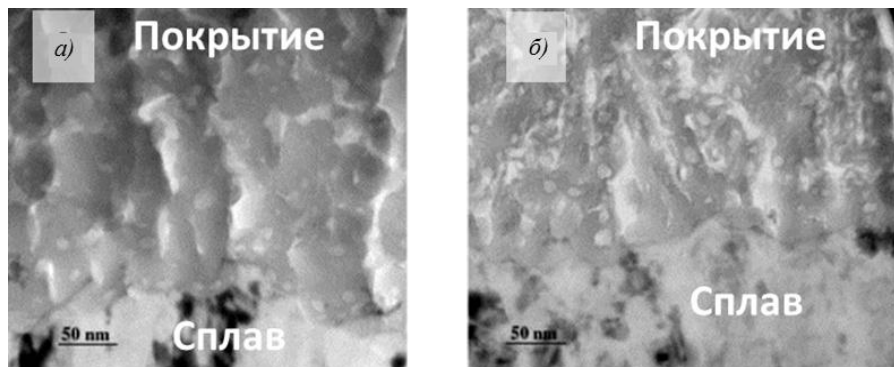


Рис. 6. Структура анодно-оксидного покрытия, сформированного в комбинированном электролите (а) и в комбинированном электролите, модифицированном молибденом (б)

Ввиду того, что технологии анодного оксидирования в комбинированных электролитах находятся на новой стадии развития, нет полного понимания механизма влияния винной или иных органических кислот на процесс анодного оксидирования и свойства формируемого покрытия.

Так, в работах [40, 41] рассматривается влияние винной кислоты при анодировании. Установлено, что для сплава AA2024 покрытие, сформированное с применением комбинированного состава (серная+винная кислоты), является более пористым по

сравнению с покрытием, полученным при традиционном сернокислотном анодном оксидировании. При исследовании влияния концентрации винной кислоты (80 и 150 г/л) [44], установлено, что добавление винной кислоты не приводит к существенному изменению электрических свойств защитного покрытия или его структуры. Однако более предпочтительно использовать концентрацию, близкую к 80 г/л.

В работе [42] приводится теоретическое обоснование влияния винной кислоты при анодном оксидировании алюминиевого сплава AA2024 в комбинированном электролите. Установлено, что при наполнении водой анодная пленка, сформированная в комбинированном электролите, имеет более высокие защитные свойства, чем стандартная сернокислотная. Данный факт авторы связывают с более интенсивным химическим взаимодействием анодной пленки с водой и последующим осаждением гидратированных ионов в каналах пор, что возможно за счет нахождения винной кислоты в порах и ее диссоциации. Одновременно с этим присутствующие ионы меди в поре или же мигрирующие внутри покрытия также вступают во взаимодействие с винной кислотой, образуя сложные комплексы.

В литературных научно-технических источниках также уделено внимание процессу твердого анодного оксидирования алюминий-литиевого сплава [43] в традиционном сернокислотном электролите. В работе [43] рассмотрено влияние температуры электролита, концентрации в электролите ионов алюминия и токового режима на свойства и структуру формируемого покрытия на сплаве системы Al–Cu–Li марки AA2099-T8. По результатам исследований установлено, что наиболее твердые покрытия формируются при отрицательной температуре электролита. Этот факт объясняется снижением химической активности электролита, что при высоких напряжениях тока не приводит к повышению пористости оксидного покрытия. Влияние температуры на толщину покрытия минимально. Толщина покрытия остается практически на одном уровне в температурном интервале от 0 до +4°C. Незначительно больше толщина покрытий при отрицательной температуре. Авторами предложена гипотеза, что увеличение толщины связано с нарушениями оксидной структуры из-за замедления кинетических процессов растворения и образования оксидов. Однако данная гипотеза противоречит приведенным данным в статье. Авторами не учтен факт об изменении реакционной способности сернокислотного электролита при низких температурах, что тормозит процесс травления формируемой оксидной пленки. Авторами подтверждено, что наличие ионов алюминия в электролите позволяет формировать покрытия с большей твердостью и меньшей пористостью. Оптимальное значение составляет 5 г/л. Увеличение концентрации ионов алюминия в электролите ведет к снижению электропроводности раствора вследствие образования комплексных солей [44] и, как следствие, к ухудшению свойств покрытия.

Проведенные исследования влияния импульсного тока отчасти не согласуются с результатом, полученным ранее на традиционных алюминиевых сплавах [45]. Так, наблюдается ухудшение структуры покрытия (наличие трещин и отслоений). При использовании традиционного режима с выпрямленным током столь значительных дефектов не наблюдается. Можно предположить, что возникновение трещин и других дефектов связано с чрезвычайно высокой химической активностью лития и фаз, его содержащих.

Помимо исследования влияния состава электролита, ведутся работы по поиску оптимальных технологических режимов. В работе [46] исследовано влияние температуры анодирования и концентрации винной кислоты на морфологию и защитные свойства анодных пленок на образцах из алюминий-литиевого сплава AA2099-T8. Температурный диапазон электролита во время исследований составил 22–47°C. Установлено, что при содержании винной кислоты на уровне с 80 г/л и температуре раствора 42°C формируется покрытие с наилучшими коррозионными свойствами. Превышение данной температуры приводит к незначительному ухудшению показателей. Использование более низких температур приводит к неравномерному росту покрытия и неравномерной структуре, что ухудшает защитные свойства.

Следует отметить, что наряду с поиском оптимальных технологических режимов и соотношения компонентов электролитов анодного оксидирования ведутся работы по разработке растворов наполнения покрытий, полученных методом анодного оксидирования. В работе [47] показана возможность использования раствора наполнения ионами трехвалентного хрома. Проведенные исследования на сплавах AA7075-T6 и AA2024-T3 показали, что использование раствора состава 4 г/л $\text{Cr}_4(\text{SO}_4)_5(\text{OH})_2$ +0,4 г/л Na_2SiF_6 +20 мкл 0,5 н. раствора NaOH при температуре 25°C в течение 10 мин позволяет увеличить в 3,5 раза защитную способность анодно-оксидного покрытия. Достигнут результат: 336 ч при экспозиции в КСТ без коррозионных поражений.

К сожалению, снижение концентрации ионов хрома более чем в 10 раз в растворе и переход на менее токсичные ингибирующие соединения не решают проблемы применения и утилизации растворов наполнения с хроматами, поэтому многие научные работы направлены на поиск альтернативных вариантов растворов наполнения, полностью исключая применение соединений хрома.

В работе [48] исследовали модифицирование анодно-оксидного покрытия в растворах, содержащих церий. В качестве образцов использовали алюминиевый сплав AA7075-T6 и два типа анодного оксидирования – с винной кислотой и без. Процесс наполнения осуществляли в растворе нитрата церия (3,5 г/л $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3$) и перекиси водорода (3 г/л H_2O_2). По результатам исследований структуры покрытия установлено, что применение комбинированного электролита позволяет получить пленку с лучшим насыщением церием, чем в стандартном сернокислотном электролите. Образцы, анодно-оксидированные в комбинированном электролите, продемонстрировали заметно улучшенную коррозионную стойкость по сравнению с образцами, анодированными только в серной кислоте.

Авторами работы [49] рассмотрен вариант антикоррозионной защиты с использованием гидроксидных пленок поверх анодного оксидирования. Материалом для исследования выбран алюминиевый сплав AA2024, анодированный в комбинированном электролите состава 80 г/л $\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_6$ +100 г/л H_2SO_4 при температуре 37°C и напряжении 14 В в течение 25 мин. Дополнительное модифицирование поверхности осуществляли с использованием двух растворов азотных (48 г/л $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ +48 г/л NH_4NO_3) или ванадиевых солей (12,5 г/л NaVO_3). При испытаниях в КСТ после 168 ч наблюдалась сильная питтинговая коррозия у образцов, обработанных в кипящей воде в течение 30 мин. При использовании раствора азотных солей количество питтинговых поражений меньше, а применение раствора ванадата натрия позволило получить максимальную защитную способность – только после 600 ч появилось некоторое обесцвечивание поверхности, а коррозионные поражения отсутствовали.

Существуют и более интересные решения по модифицированию процесса анодного оксидирования. Предложен вариант использования золь-гель пленки [50]. Для формирования таких пленок использовали растворы на основе тетраэтоксисилана, этанола и дистиллированной воды. Установлено, что защитные свойства анодно-оксидного покрытия при такой обработке увеличиваются. После испытаний в КСТ при длительной выдержке (>332 ч) коррозионные поражения отсутствуют.

Следует отметить применение и других растворов наполнения с солями металлов переходной группы, таких как молибден [51, 52]. Применение данных молибдатов благоприятно сказывается при введении в раствор анодного оксидирования и при использовании в качестве модифицирующей обработки. В работе [52] представлены результаты использования таких растворов. Так, уплотнение пленки образцов происходило путем погружения анодированного образца в ванну, содержащую перманганат калия (9,5 г/л), молибдат натрия (5 г/л) и нитрат лития (4 г/л), при температуре 78±2°C в течение ~30 мин. По результатам коррозионных испытаний установлено, что после 1000 ч в КСТ продукты коррозии на образцах отсутствуют.

Заключения

Наличие достаточно большого объема опубликованных исследований по такому известному и широко распространенному процессу, как анодное оксидирование алюминиевых сплавов, показывает актуальность исследований в данной области. Наблюдается заметный интерес исследователей к адаптации стандартной технологии анодного оксидирования применительно к литийсодержащим сплавам.

Исследования ведутся практически во всех аспектах технологии анодного оксидирования, таких как подготовка поверхности сплавов, составы электролитов анодного оксидирования и наполнения, технологические режимы оксидирования.

Основным трендом последнего десятилетия стал поиск альтернативных вариантов составов электролитов анодного оксидирования взамен хромовокислотного электролита. Установлено, что комбинированные электролиты на основе серной кислоты и органических кислот позволяют обеспечить тот же уровень свойств защитного покрытия на алюминиевых и алюминий-литиевых сплавах при удовлетворении жестких экологических норм.

Отдельно следует отметить, что вопросу модифицирования анодно-оксидного покрытия посвящено наибольшее количество публикаций. Одним из перспективных направлений считается разработка растворов на основе солей переходных металлов, таких как молибден. Однако предлагаемые способы обработки и концентрации растворов разнообразны и требуют систематизации.

В работах большое внимание уделено снижению влияния фазового состава непосредственно в процессе анодного оксидирования, однако в исследованиях не отражены возможности предварительной подготовки поверхности алюминиевых сплавов. Используются стандартные технологии травления в щелочном растворе с последующей обработкой в азотной кислоте. Совершенствование данного процесса с целью снижения химической гетерогенности поверхности и, как следствие, возможного уменьшения объемных дефектов покрытий является довольно актуальной задачей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н., Антипов В.В., Ключкова Ю.Ю. Алюминий-литиевые сплавы нового поколения и слоистые алюмокомпозиты на их основе // Цветные металлы. 2016. №8. С. 86–91.
2. Каблов Е.Н., Лукина Е.А., Сбитнева С.В., Хохлатова Л.Б., Зайцев Д.В. Формирование метастабильных фаз при распаде твердого раствора в процессе искусственного старения Al-сплавов // Технология легких сплавов. 2016. №3. С. 7–17.
3. Фридляндер И.Н., Дриц А.М., Вовнянко А.Г. Новые алюминиевые сплавы для ответственных силовых конструкций самолетов // Авиационная промышленность. 1985. №6. С. 56–58.
4. Шалин Р.Е., Фридляндер И.Н., Лещинер Л.Н., Бутусова И.В., Кузнецова Н.Б. Алюминиевые сплавы для пассажирских самолетов // Авиационная промышленность. 1988. №6. С. 88–89.
5. Фридляндер И.Н., Лещинер Л.Н., Сандлер В.С., Латушкина Л.В., Воробьев О.И., Никольская Т.И. Структура и свойства сплавов системы Al–Cu–Mg–Li // Авиационная промышленность. 1986. №8. С. 59–61.
6. Фридляндер И.Н., Грушко О.Е., Антипов В.В., Колобнев Н.И., Хохлатова Л.Б. Алюминий-литиевые сплавы // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2008. №8. С. 22–27.
7. Антипов В.В., Серебренникова Н.Ю., Нефедова Ю.Н., Козлова О.Ю., Пантелеев М.Д., Осипов Н.Н., Клычев А.В. Технологические особенности изготовления деталей из алюминий-литиевого сплава 1441 // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2018. №10 (70). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 17.06.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-10-17-26.
8. Антипов В.В. Перспективы развития алюминиевых, магниевых и титановых сплавов для изделий авиационно-космической техники // Авиационные материалы и технологии. 2017. №S. С. 186–194. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-186-194.
9. Антипов В.В., Ключкова Ю.Ю., Романенко В.А. Современные алюминиевые и алюминий-литиевые сплавы // Авиационные материалы и технологии. 2017. №S. С. 195–211. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-195-211.

10. Каблов Е.Н., Антипов В.В., Сенаторова О.Г. Слоистые алюмокомпозиты СИАЛ-1441 и сотрудничество с Airbus и TU Delft // Цветные металлы. 2013. №9. С. 50–53.
11. Кутырев А.Е., Чесноков Д.В., Антипов В.В., Вдовин А.И. Разработка раствора для нанесения коррозионных поражений на алюминиевых сплавах в гальваностатическом режиме // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2018. №9 (69). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 17.06.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-9-105-118.
12. Козлов И.А., Виноградов С.С., Тарасова К.Г., Кулюшина Н.В., Манченко В.А. Плазменное электролитическое оксидирование магниевых сплавов (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2019. №1 (54). С. 23–36. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-1-23-36.
13. Павловская Т.Г., Волков И.А., Козлов И.А., Наприенко С.А. Экологически улучшенная технология обработки поверхности алюминиевых сплавов // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2016. №7 (43). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 17.06.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-7-2-2.
14. Антипов В.В., Петрова А.П., Козлов И.А., Фомина М.А., Волков И.А. Влияние технологических нагревов и способов подготовки поверхности под склеивание на механические свойства алюминиевой фольги из сплава АМг2Н // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2018. №7 (67). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 17.06.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-7-10-24.
15. Способ получения покрытия на алюминиевых сплавах: пат. 2547983 Рос. Федерация; заявл. 14.04.14; опубл. 10.04.15.
16. Антипов В.В., Чесноков Д.В., Козлов И.А., Волков И.А., Петрова А.П. Подготовка поверхности алюминиевого сплава В-1469 перед применением в составе слоистого гибридного материала // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2018. №4 (64). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 17.06.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-4-59-65.
17. Раствор для уплотнения анодно-окисного покрытия алюминиевых сплавов: пат. 2447201 Рос. Федерация; заявл. 05.04.11; опубл. 10.04.12.
18. Harscoet E., Froelich D. Use of LCA to evaluate the environmental benefits of substituting chromic acid anodizing (CAA) // Journal of Cleaner Production. 2007. No. 16. P. 1294–1305.
19. Козлов И.А., Павловская Т.Г., Захаров К.Е., Волков И.А. Экологически улучшенные технологии подготовки поверхности алюминиевых сплавов // Адгезионные материалы: сб. докл. науч.-технич. конф. М.: ВИАМ, 2016. С. 13.
20. Chakravarthy V., Canulescu S., Shabadi R. et al. Structure of anodized Al–Zr sputter deposited coatings and effect on optical appearance // Applied Surface Science. 2014. No. 317. P. 1113–1124.
21. Zahavi J., Zangvil A., Metzger M. Structure and stability of anodic films formed on aluminum containing dispersed Al₃Fe phase // Journal of The Electrochemical Society. 1978. No. 125. P. 438–444.
22. Mukhopadhyay A.K., Sharma A.K. Influence of Fe-bearing particles and nature of electrolyte on the hard anodizing behaviour of AA7075 extrusion products // Surface and Coatings Technology. 1997. No. 92 (3). P. 212–220.
23. Mukhopadhyay A.K. On the nature of the Fe-bearing particles influencing hard anodizing behavior of AA7075 extrusion products // Metallurgical and Materials Transactions. 1998. No. 29 (3). P. 979–987.
24. Fratila-Apachitei L.E., Terryn H., Skeldon P. et al. Influence of substrate microstructure on the growth of anodic oxide layers // Electrochimica Acta. 2004. No. 49 (7). P. 1127–1140.
25. Iglesias-Rubianes L., Garcia-Vergara S.J., Skeldon P. et al. Cyclic oxidation processes during anodizing of Al–Cu alloys // Electrochimica Acta. 2007. No. 52 (24). P. 7148–7157.
26. Kikuchia T., Kunimotoa K., Ikeda H. Fabrication of anodic porous alumina via galvanostatic anodizing in alkaline sodium tetraborate solution and their morphology // Journal of Electroanalytical Chemistry. 2019. Vol. 846. P. 113–152.
27. Wu H., Ma Y., Huang W. et al. Effect of Iron-Containing Intermetallic Particles on Film Structure and Corrosion Resistance of Anodized AA2099 Alloy // Journal of the Electrochemical Society. 2018. Vol. 165 (9). P. 573–581.
28. Liu J., Rong G., Cen S. et al. Dissolution Behavior of Intermetallic Particles in AA2297-T87 during Anodizing in Adipic-Sulfuric Acid // Journal of the Electrochemical Society. 2018. No. 165 (16). P. C980–C990.
29. Ma Y., Zhou X., Thompson G.E. et al. Anodic film growth on Al–Li–Cu alloy AA2099-T8 // Electrochimica Acta. 2012. No. 80. P. 148–159.

30. Skeldon P., Thompson G.E., Wood G.C. et al. Effects of alloying elements in anodizing of aluminium // *Philosophical Magazine*. 1997. No. 76. P. 729–738.
31. Bailey P., Skeldon P., Noakes T.C.Q. et al. Composition and structure of enriched alloy layers in filmed Al alloys studied by medium-energy ion scattering // *Surface and Interface Analysis*. 2001. No. 31. P. 480–488.
32. Shimizu K., Brown G.M., Kobayashi K. et al. Anodising as pre-treatment before organic coating of extruded and cast aluminium alloys // *Corrosion Science*. 1998. No. 40 (7). P. 1049–1055.
33. Ma Y., Zhou X., Thompson G.E. et al. Discontinuities in the porous anodic film formed on AA2099-T8 aluminium alloy // *Corrosion Science*. 2011. No. 53. P. 4141–4151.
34. Ma Y., Zhou X., Thompson G.E. et al. Microstructural Modification Arising from Alkaline Etching and Its Effect on Anodizing Behavior of Al–Li–Cu Alloy // *Journal of the Electrochemical Society*. 2013. No. 160. P. 111–118.
35. Gharbia O., Birbilis N., Oglea K. Li reactivity during the surface pretreatment of Al–Li alloy AA2050-T3 // *Electrochimica Acta*. 2017. No. 243. P. 207–219.
36. Gharbi O., Birbilis N., Ogle K. In-Situ Monitoring of Alloy Dissolution and Residual Film Formation during the Pretreatment of Al-Alloy AA2024-T3 // *Journal of The Electrochemical Society*. 2016. No. 163 (5). P. 240–251.
37. Nelson K.J.H., Hughes A.E., Taylor R.J. et al. Characterisation of aluminium alloys after HNO_3/HF – NaOH – HNO_3/HF pretreatment // *Materials Science and Technology*. 2001. No. 17 (10). P. 1211–1221.
38. Hughes A.E., Theodossiou G., Elliott S. et al. Study of deoxidation of 2024-T3 with various acids // *Materials Science and Technology*. 2001. No. 17 (12). P. 1642–1652.
39. García-Rubio M., Ocón P., Climent-Font A. Influence of molybdate species on the tartaric acid/sulphuric acid anodic films grown on AA2024-T3 aerospace alloy // *Corrosion Science*. 2009. No. 51. P. 2034–2042.
40. Marzocchi V., Iglesias-Rubianes L., Thompson G.E., Bellucci F. The influence of tartaric acid additions on the anodizing behaviour of AA2024-T3 alloy in sulphuric acid // *Corrosion Science*. 2009. No. 25. P. 461–473.
41. Curioni M., Skeldon P., Koroleva E. et al. Role of tartaric acid on the anodizing and corrosion behavior of a 2024-T3 aluminum alloy // *Journal of the Electrochemical*. 2009. No. 156. P. 147–153.
42. Arenas M.A., Conde A., de Damborenea J.J. Effect of acid traces on hydrothermal sealing of anodising layers on 2024 aluminium alloy // *Electrochimica Acta*. 2010. No. 55. P. 8704–8708.
43. Bononi M., Conte M., Giovanardi R., Bozza A. Hard anodizing of AA2099-T8 aluminum lithium copper alloy: Influence of electric cycle, electrolytic bath composition and temperature // *Surface & Coatings Technology*. 2017. Vol. 325. P. 627–635.
44. Sposito G. *The Environmental Chemistry of Aluminum*/ CRC Press, 1995. 480 p.
45. Bozza A., Giovanardi R., Manfredini T., Mattioli P. Pulsed current effect on hard anodizing process of 7075-T6 aluminium alloy // *Surface and Coatings Technology*. 2015. No. 270. P. 139–144.
46. Ma Y., Zhou X., Liao Y. et al. Effect of anodizing parameters on film morphology and corrosion resistance of AA2099 // *Journal of the Electrochemical Society*. 2016. No. 163 (7). P. 369–376.
47. Pearlstein F., Agarwala V.S. Trivalent Chromium Solutions for Applying Chemical Conversion Coatings to Aluminum Alloys or for Sealing Anodized Aluminum // *Surface and Coatings Technology*. 1994. No. 81 (7). P. 50–55.
48. Gordovskaya I.V., Hashimoto T., Walton J. Development of Cerium-Rich Layers on Anodic Films Formed on Pure Aluminium and AA7075-T6 Alloy // *Journal of The Electrochemical Society*. 2014. No. 161 (14). P. 601–606.
49. Kuznetsov B., Serdechnova M., Tedim J. Sealing of tartaric sulfuric (TSA) anodized AA2024 with nanostructured LDH layers // *RSC Advanced*. 2016. No. 6. P. 13942–13952.
50. Capelossi V.R., Poelman M., Recloux I. et al. Corrosion protection of clad 2024 aluminum alloy anodized in tartaric-sulfuric acid bath and protected with hybrid sol–gel coating // *Electrochimica Acta*. 2014. No. 124. P. 69–79.
51. Balaraju J.N., Srinivasan A., Yoganandan G. Effect of Mn/Mo incorporated oxide layer on the corrosion behavior of AA2024 alloy // *Corrosion Science*. 2011. No. 53. P. 4084–4092.
52. Yoganandan G., Balaraju J.N., Christopher H.C. et al. Electrochemical and long term corrosion behavior of Mn and Mo oxyanions sealed anodic oxide surface developed on aerospace aluminum alloy (AA2024) // *Surface & Coatings Technology*. 2016. No. 288. P. 115–125.