

Научная статья

УДК 620.179

DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-11-90-98

ОСОБЕННОСТИ ХИМИЧЕСКОГО ОКСИДИРОВАНИЯ ПОЛУФАБРИКАТОВ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ ИЗ МЕТАЛЛОПОРОШКОВОЙ КОМПОЗИЦИИ СПЛАВА ВАС1

И.А. Козлов¹, И.А. Волков¹, М.А. Фомина¹, К.Е. Захаров¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. Работа посвящена вопросу адаптации традиционной технологии химического оксидирования деталей и заготовок из алюминиевых сплавов, полученных традиционными способами, для обработки поверхности деталей, изготовленных методом селективного лазерного сплавления из металлопорошковой композиции сплава ВАС1. Исследованы совместимость и влияние основных химических компонентов электролитов на стабильность растворов и качество формируемого покрытия. Рассмотрены работоспособность электролитов для оксидирования и различные варианты химической подготовки поверхности образцов из сплава ВАС1.

Ключевые слова: химическое оксидирование, коррозия, покрытия, аддитивные технологии, алюминиевые сплавы

Для цитирования: Козлов И.А., Волков И.А., Фомина М.А., Захаров К.Е. Особенности химического оксидирования полуфабрикатов, полученных методом селективного лазерного сплавления из металлопорошковой композиции сплава ВАС1 // Труды ВИАМ. 2023. № 11 (129). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-11-90-98.

Scientific article

FEATURES OF CHEMICAL OXIDATION OF SEMI-FINISHED PRODUCTS OBTAINED BY SELECTIVE LASER MELTING FROM A METAL POWDER COMPOSITION OF THE ALLOY VAS1

I.A. Kozlov¹, I.A. Volkov¹, M.A. Fomina¹, K.E. Zakharov¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. The work is devoted to the adaptation of the traditional technology of chemical oxidation of parts and workpieces made of aluminum alloys obtained by traditional methods for surface treatment of parts manufactured by selective laser fusion and metal powder composition of the VAS1 alloy. The work investigated the compatibility and influence of the main chemical components of electrolytes on the stability of solutions and the quality of the formed coating. The performance of electrolytes for oxidation and various options for chemical preparation of the surface of samples from the alloy VAS1 are considered.

Keywords: chemical oxidation, corrosion, coatings, additive technologies, aluminum alloys

For citation: Kozlov I.A., Volkov I.A., Fomina M.A., Zakharov K.E. Features of chemical oxidation of semi-finished products obtained by selective laser melting from a metal powder composition of the alloy VAS1. *Trudy VIAM*, 2023, no. 11 (129), paper no. 09. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-11-90-98.

Введение

Для обеспечения высоких аэродинамических и ресурсных показателей к качеству поверхности деталей современной авиационной техники предъявляются особые требования по ее шероховатости [1–3]. Для повышения данных показателей детали, изготавливаемые традиционными способами, на различных стадиях изготовления подвергаются дополнительной обработке, в том числе облагораживанию путем механического шлифования и полирования, что обеспечивает получение поверхности высокого качества даже для внутренних поверхностей детали [4, 5].

Относительно новые технологии изготовления деталей методом селективного лазерного сплавления из металлопорошковой композиции алюминиевого сплава ВАС1 обеспечивают получение за одну операцию детали или заготовки инновационной (оригинальной) геометрической формы со сложной конфигурацией и наличием внутренних труднодоступных поверхностей. Применение традиционных технологий облагораживающей обработки поверхности для деталей, изготовленных методом селективного лазерного сплавления из металлопорошковой композиции алюминиевого сплава ВАС1, трудоемко и не всегда обеспечивает требуемый результат. Снижение шероховатости таких деталей возможно путем применения электрохимических, химических или электролитно-плазменных методов обработки в растворах. Однако в настоящее время в РФ отсутствуют технологии, обеспечивающие снижение шероховатости поверхности деталей, изготовленных методом селективного лазерного сплавления.

Важным фактором для деталей из алюминиевых сплавов является антикоррозионная защита, позволяющая обеспечить требуемый срок службы изделия и существенно снизить вероятность отказа по причине коррозии [6]. Как показывает практика отечественного и зарубежного авиастроения, неметаллические неорганические оксидные покрытия в комплексе с системой лакокрасочных покрытий (ЛКП) являются наиболее эффективной защитой, в том числе для всеклиматического исполнения изделий. Оксидные покрытия имеют важное значение в комплексной системе защиты – на них приходится до 60–70 % защитных свойств. Наиболее широко используемые технологии формирования неметаллических неорганических покрытий – химическое и анодное оксидирование, которые обеспечивают образование качественных покрытий с высокими защитными и адгезионными свойствами на большинстве деформируемых и литейных алюминиевых сплавов. Процесс их образования связан с особенностями протекания окислительно-восстановительных реакций, в результате которых на поверхности формируется слой из частично гидратированного оксида алюминия.

Кроме состава электролита оксидирования, немаловажное значение в формировании неметаллических неорганических покрытий на алюминиевых сплавах имеет химический состав поверхности деталей и полуфабрикатов, особенно наличие редкоземельных и неметаллических легирующих компонентов, которое негативно влияет на образование защитных покрытий, снижая их уровень защитных и адгезионных свойств, ввиду формирования неоднородной структуры и толщины, а также повышенной пористости.

Согласно ранее проведенным исследованиям по формированию неметаллических неорганических покрытий на деталях и образцах, изготовленных методом селективного лазерного сплавления из металлопорошковой композиции алюминиевого сплава ВАС1, установлена невозможность применения классических методов подготовки и оксидирования поверхности. В частности, применение процесса анодного оксидирования в растворе хромовой кислоты приводит к сильному растраву поверхности деталей, а также неконтролируемому повышению температуры в ванне оксидирования. При анодном оксидировании в растворе серной кислоты на поверхности формируются несплошные дефектные оксидные пленки, не обладающие хорошими защитными и адгезионными свойствами.

Материалы и методы

Для проведения исследований использованы образцы из алюминиевого сплава ВАС1 (система Al–Si–Mg–Cu), изготовленные методом селективного лазерного сплавления из металлопорошковой композиции на 3D-принтере для аддитивного производства с последующей термической обработкой. Металлопорошковая композиция изготовлена в условиях НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ из шихтовых заготовок методом газовой атомизации в среде нейтрального газа с последующим рассевом на фракции частиц размерами 10–63 мкм; геометрические размеры образцов 100×50×3 мм. Состав алюминиевого сплава ВАС1 приведен в табл. 1.

Таблица 1

Компонентный состав алюминиевого сплава ВАС1*

Содержание элементов, % (по массе)					Примеси, % (по массе)	
Si	Zr	Cu	Mg	Ce	Fe	Ni
9,42	0,22	0,81	0,85	0,18	0,12	0,001

* Защищен патентом РФ № 2661525.

Оценку защитной способности покрытия проводили путем выставления образцов на экспозицию в камеру солевого тумана согласно ГОСТ 9.308–85 (метод 1) с непрерывным распылением 5%-ного раствора хлористого натрия.

Адгезию покрытий к ЛКП измеряли методом решетчатых надрезов на поверхности образцов в ЛКП согласно ГОСТ 15140–78.

Измерение шероховатости поверхности проводили методом конфокальной лазерной сканирующей микроскопии (CLSM) с применением оптического профилометра с автоматической базой путем построения трехмерного двойника поверхности образцов.

Для приготовления растворов химического оксидирования и подготовки поверхности использовали очищенную воду с электропроводностью не более 5 мкСм/см, а химические реактивы – со степенью чистоты не менее «Ч».

Предварительную подготовку поверхности проводили по ГОСТ 9.305–84.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Результаты и обсуждение

Одной из особенностей серийно освоенных металлопорошковых композиций алюминиевых сплавов для аддитивного производства является наличие в составе кремния, что усложняет процесс традиционной химической обработки. Аналогичные трудности при традиционном проведении процесса химического оксидирования возникают и при обработке литейных алюминиевых сплавов. Кремний образует с алюминием и другими легирующими компонентами труднорастворимые фазы различного состава, а также присутствует в сплавах алюминия в элементарном виде. При изготовлении деталей методом селективного лазерного сплавления и дальнейшей термической обработке может происходить его коагуляция и образование множественных сферических агломераций [7–14].

Из-за имеющихся трудностей с химической обработкой сплава ВАС1, заключающихся в образовании аморфного кремния на поверхности деталей и образцов, проведены исследования по выявлению влияния предварительной обработки на состояние поверхности образцов. Для этого выбраны стандартные (щелочные и кислотные) и экспериментальные растворы травления, а также осветление в растворе азотной кислоты. Оценку влияния проводили по изменению шероховатости поверхности (по 5 точкам на каждой стороне образца) и ее внешнему виду (табл. 2).

Таблица 2

Результаты исследования влияния режимов предварительной подготовки на внешний вид образцов из сплава ВАС1

Режим предварительной подготовки (ГОСТ 9.305–84)	Внешний вид поверхности	Скорость травления, г/(м ² ·мин)
Травление в NaOH (50 г/л) при температуре 60 °С в течение 2 мин, осветление в HNO ₃ (30 % (по массе)) при температуре 23 °С в течение 5 мин	Темно-коричневый шлам	18,9
Травление в NaOH (35 г/л) + Na ₂ CO ₃ (30 г/л) при температуре 50 °С в течение 2 мин, осветление в HNO ₃ (30 % (по массе)) при температуре 23 °С в течение 5 мин	Светло-серый шлам	1,36
Травление в NaOH (15 г/л) + Na ₂ CO ₃ (15 г/л) + NaNO ₃ (10 г/л) при температуре 50 °С в течение 2 мин, осветление в HNO ₃ (30 % (по массе)) при температуре 23 °С в течение 5 мин	Светло-серый шлам	0,56
Травление в HNO ₃ (280 г/л) + HF (10 г/л) при температуре 23 °С в течение 10 мин	Темно-серый шлам	1,55
Травление в NaOH (50 г/л) при температуре 60 °С в течение 2 мин, осветление в экспериментальном кислотном растворе при температуре 23 °С в течение 10 мин	Матовая светлая чистая поверхность	19,46
Осветление в экспериментальном кислотном растворе при температуре 23 °С в течение 10 мин	Матовая светлая чистая поверхность	0,17

Установлено, что практически на всех исследуемых вариантах подготовки поверхности после кислотной обработки остается шлам различного оттенка – от светло-серого до темно-коричневого. Предположительно это связано с наличием отдельных включений кремния на поверхности образцов и химическими особенностями при проведении процессов травления и осветления. В процессе лазерного сплавления (в отличие от традиционного литейного производства) происходит мгновенный нагрев и спекание металлопорошковой композиции (особенно фракций диапазона 10–63 мкм), что может приводить к образованию металлоподобных силицидов на поверхности образцов. Даже применение раствора азотной и фтористоводородной кислот не позволило должным образом обеспечить чистоту поверхности образцов перед проведением химического оксидирования.

Одновременно следует отметить высокую скорость травления исследуемых образцов алюминиевого сплава при применении традиционной технологии щелочного травления и снятия шлама в растворе азотной кислоты.

Анализ шероховатости поверхности по трехмерным топографическим моделям позволил выявить, что применение щелочного травления и последующее осветление в азотной кислоте позволяют снизить шероховатость поверхности в среднем на 6,38 % (рис. 1, а). Добавление кальцинированной соды в щелочной раствор травления снижает скорость травления более чем в 13 раз, при этом активнее сглаживая поверхность (рис. 1, б). Добавление в раствор едкого натра кальцинированной соды и нитрата натрия приводит к существенному снижению скорости травления. При этом вводимый нитрат натрия не обеспечивает равномерность травления (рис. 1, в), что наблюдается при обработке традиционных литейных и деформируемых алюминиевых сплавов [15, 16]. Применение смеси из азотной и фтористоводородной кислот, несмотря на низкую скорость травления, существенно увеличивает шероховатость поверхности (рис. 1, г) относительно исходного состояния – до 5 %, что может повлечь за собой неравномерность нанесения химического состава оксидирования и является неприемлемым.

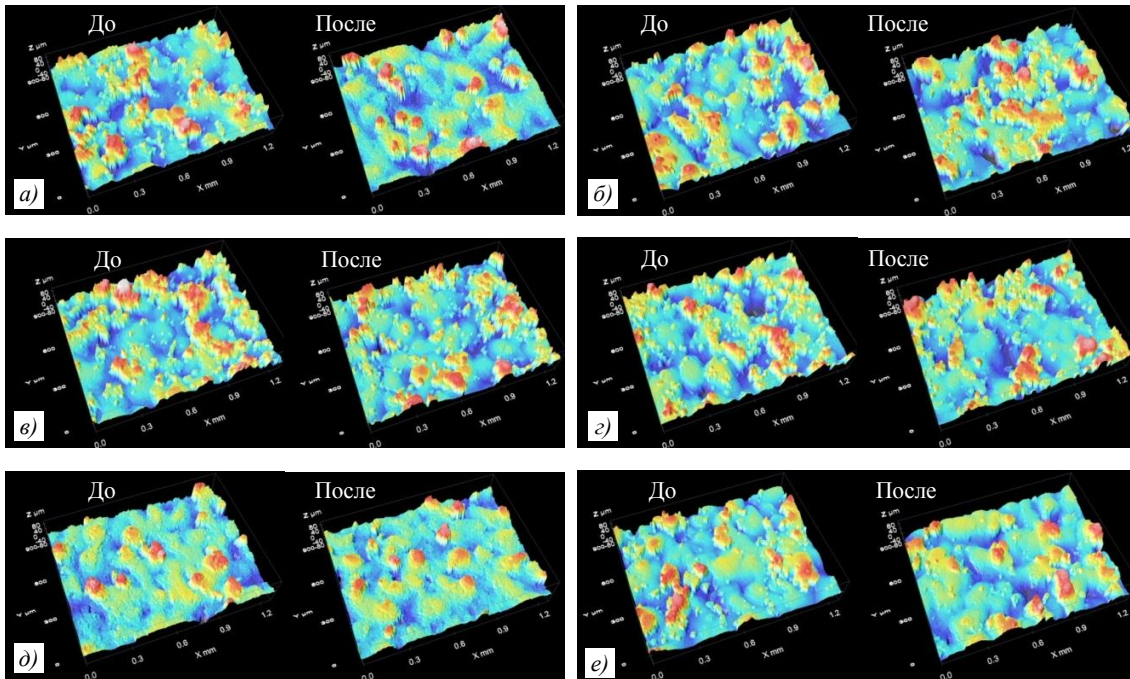


Рис. 1. 3D-модели поверхности образца до и после химической обработки в растворах едкого натра (а); едкого натра и кальцинированной соды (б); едкого натра, кальцинированной соды и нитрата натрия (в), а также в кислотном растворе травления (з), в растворе едкого натра с осветлением в экспериментальном растворе (д) и экспериментальном растворе осветления (е)

Таким образом, видно, что традиционно применяемые растворы не обладают должной эффективностью для обеспечения подготовки поверхности образцов из сплава ВАС1, полученных спеканием порошковой композиции. При исследовании топографии поверхности установлено, что исходные пики не сглаживаются и остаются нетронутыми, не происходит селективного вытравливания кремния с поверхности образцов.

Травление образцов из сплава ВАС1 в растворе едкого натра с последующим осветлением в экспериментальном кислотном растворе приводит к полному удалению шлама. При этом значения скорости травления и изменения шероховатости практически не изменяются по сравнению со стандартным режимом подготовки (рис. 1, д, е).

На основании полученных результатов можно предположить механизм возникновения осадка аморфного кремния на поверхности деталей, изготовленных методом селективного лазерного сплавления из металлопорошковой композиции алюминиевого сплава ВАС1. Ввиду того, что образование осадка происходит при любой химической и электрохимической обработке с активным растворением поверхностного слоя, основной причиной может служить следующее: общее содержание кремния в структуре сплава может достигать значений вплоть до 10 % (по массе), большая часть которого представлена в виде скоплений частичек кремния различной морфологии размером от 50 до 200 нм, а также труднорастворимых фаз составов $Al_{18}Fe_2Si_2$, $Al_{18}Fe_2Mg_7Si_{10}$ и Al_3Ce_2Si . В результате химического или электрохимического воздействия происходит выделение указанных частиц и фаз из поверхностного слоя и их последующее осаждение. Тогда эффективность экспериментального раствора осветления объясняется наличием в растворе ионов фтористоводородной и азотной кислот, которые осуществляют процесс селективного растворения кремния и содержащих его фаз. При этом высокая концентрация серной кислоты предотвращает травление алюминиевого сплава ввиду отсутствия свободного кислорода в растворе.

С целью опробования стандартных электролитов для установления возможности формирования химического оксидного покрытия на образцах из металлопорошковой

композиции сплава ВАС1 проведена обработка в различных растворах, содержащих в качестве пассивирующего и пленкообразующего агента ионы хрома (рис. 2). Предварительную подготовку образцов проводили в растворе NaOH (50 г/л) при температуре 60 °С в течение 2 мин с последующим осветлением в экспериментальном кислотном растворе при температуре 23 °С в течение 10 мин.

Установлено, что при обработке в стандартном электролите на основе хромового ангидрида (CrO_3) и фторсиликата натрия (Na_2SiF_6) формируется неравномерное покрытие, а при протирании поверхности покрытие частично стирается. При добавлении в стандартный электролит поверхностно-активных веществ типа синтанола ДС-10 или лаурилсульфата натрия цвет покрытия остается бледно-желтым и оно продолжает стираться. Добавление в стандартный электролит калия железосинеродистого ($\text{K}_3(\text{Fe}[\text{CN}]_6)$) позволяет получить равномерное покрытие темно-желтого цвета, но при этом оно стирается и непригодно для использования. Предположительно, основным фактором, влияющим на стираемость покрытия после формирования на сплаве ВАС1, является добавление в электролит фторсиликата натрия (Na_2SiF_6).



Рис. 2. Внешний вид покрытий, формируемых в различных составах электролитов химического оксидирования на сплаве ВАС1

В электролите, содержащем хромовый ангидрид (CrO_3) и фторсиликат калия (K_2SiF_6), формируется едва заметное бледно-желтое покрытие, но не стирается при протирании. Добавление в данный электролит нитрата натрия (NaNO_3) позволяет получить равномерное покрытие светло-желтого цвета, не стирающееся при протирании. Замена фторсиликата натрия на натрий фтористый (NaF) и калий фтористый кислый (KHF_2) в качестве активаторов поверхности приводит к активному травлению сплава ВАС1 в электролитах, а покрытие не формируется.

Установлено также, что электролиты, содержащие добавки синтанола ДС-10 и лаурилсульфата натрия, нестабильны и изменяют цвет за 120 ч хранения. Предположительно, это связано с переходом соединений хрома из шестивалентного в трехвалентное состояние за счет протекания химических реакций с примененными поверхностно-активными веществами.

Проведены исследования по оценке влияния составов электролитов химического оксидирования на функциональные свойства сформированных покрытий. Покрытия выставляли на ускоренные коррозионные испытания в камеру солевого тумана согласно ГОСТ 9.308–85 (метод 1) (табл. 3).

**Коррозионные свойства покрытий
в зависимости от состава электролита химического оксидирования**

Состав электролита	Время до появления первых очагов коррозии, ч
$\text{CrO}_3 + \text{Na}_2\text{SiF}_6$	96
$\text{CrO}_3 + \text{Na}_2\text{SiF}_6 +$ синтанол ДС-10	96
$\text{CrO}_3 + \text{Na}_2\text{SiF}_6 + \text{K}_3(\text{Fe}[\text{CN}]_6)$	120
$\text{CrO}_3 + \text{Na}_2\text{SiF}_6 +$ лаурилсульфат натрия	96
$\text{CrO}_3 + \text{K}_2\text{SiF}_6$	144
$\text{CrO}_3 + \text{K}_2\text{SiF}_6 + \text{NaNO}_3$	192

По результатам лабораторных испытаний установлено, что высокие защитные свойства получены на образцах после обработки в электролите, содержащем хромовый ангидрид, фторсиликат калия и нитрат натрия. Все остальные электролиты не позволяют сформировать качественные покрытия с высокими защитными свойствами. Благоприятное влияния NaNO_3 , предположительно, связано с образованием комплексных солей на поверхности алюминиевых образцов, что снижает интенсивность химических реакций в процессе оксидирования и препятствует уносу оксидной пленки с поверхности образца.

Ввиду имеющихся данных по неэффективности применения стандартных технологий анодного оксидирования к деталям, изготовленным методом селективного лазерного сплавления из металлопорошковой композиции алюминиевого сплава ВАС1, целесообразно провести исследования по адаптации уже имеющихся процессов, а при невозможности такого применения разработать новую технологию, учитывающую особенности состава сплава ВАС1. Перспективно, по-видимому, использование органических кислот (щавелевая, салициловая, винная) из-за возможного комплексообразования с кремнием при проведении процесса анодного оксидирования. Данные исследования планируется провести в дальнейшем.

Заключения

Проведенные исследования традиционных технологий подготовки поверхности алюминиевых сплавов перед химическим оксидированием показали необходимость разработки нового раствора для обеспечения равномерного травления образцов, полученных методом селективного лазерного сплавления металлопорошковой композиции из кремнийсодержащего сплава ВАС1.

Отмечена также возможность при подготовке поверхности перед химическим оксидированием снижать шероховатость поверхности образцов после селективного лазерного сплавления.

Опробованные технологические режимы и составы электролитов химического оксидирования образцов позволили установить необходимость их адаптации для обеспечения формирования защитного покрытия, обладающего высокими защитными свойствами.

Экспериментально показано, что для металлических материалов, полученных с применением метода селективного лазерного сплавления, необходима разработка новых или адаптация традиционных технологий химической обработки поверхности.

Список источников

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. № 1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Каблов Е.Н., Старцев О.В. Фундаментальные и прикладные исследования коррозии и старения материалов в климатических условиях (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2015. № 4 (37). С. 38–52. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-4-38-52.
3. Каблов Е.Н. Инновационное развитие – важнейший приоритет государства // Металлы Евразии. 2010. № 2. С. 6–11.

4. Каблов Е.Н. Из чего сделать будущее? Материалы нового поколения, технологии их создания и переработки – основа инноваций // Крылья Родины. 2016. № 5. С. 8–18.
5. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Медведев И.М. Обзор зарубежного опыта исследований коррозии и средств защиты от коррозии // Авиационные материалы и технологии. 2015. № 2 (35). С. 76–87. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-2-76-87.
6. Aboulkhair N.T., Everitt N.M., Ashcroft I., Tuck C. Reducing porosity in AlSi10Mg parts processed by selective laser melting // Additive Manufacturing. 2014. Vol. 1–4. P. 77–86.
7. Prashanth K.G., Scudino S., Klauss H.J. Microstructure and mechanical properties of Al–12Si produced by selective laser melting: Effect of heat treatment // Materials Science & Engineering: A. 2014. Vol. 590. P. 153–160.
8. Weingarten C., Buchbinder D. Formation and reduction of hydrogen porosity during selective laser melting of AlSi10Mg // Journal of Materials Processing Technology. 2015. Vol. 221. P. 112–120.
9. 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.
10. Каблов Е.Н., Щетанов Б.В., Гращенко Д.В., Шавнев А.А., Няфкин А.Н. Металломатричные композиционные материалы на основе Al–SiC // Авиационные материалы и технологии. 2012. № 5. С. 373–380.
11. Каблов Е.Н., Антипов В.В., Чесноков Д.В., Кутырев А.Е. Исследование применения комбинированного анодного растворения алюминиевого сплава системы Al–Mg–Si–Cu с целью прогнозирования потери механических свойств при атмосферной коррозии // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 2 (59). С. 63–73. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-63-73.
12. Сбитнева С.В., Лукина Е.А., Бенариб И. Некоторые особенности структуры алюминиевых сплавов, полученных методом селективного лазерного сплавления (обзор) // Труды ВИАМ. 2023. № 1 (119). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 22.08.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-1-69-83.
13. Щетинина Н.Д., Кузнецова П.Е., Дынин Н.В., Селиванов А.А. Сплавы на основе алюминия с добавками скандия и циркония в аддитивном производстве (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 3 (64). Ст. 03. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 24.08.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-3-19-34.
14. Кравченко Д.В., Козлов И.А., Никифоров А.А. Способы подготовки поверхности алюминиевых сплавов для нанесения гальванических покрытий (обзор) // Труды ВИАМ. 2021. № 6 (100). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 04.09.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-6-82-99.
15. Желонкина С.И. Обзор современных способов подготовки поверхности алюминиевых сплавов под нанесение металлопокрытий (часть 1) // Упрочняющие технологии и покрытия. 2021. Т. 17. № 5 (197). С. 227–231.
16. Антипов В.В. Перспективы развития алюминиевых, магниевых и титановых сплавов для изделий авиационно-космической техники // Авиационные материалы и технологии. 2017. № 5. С. 186–194. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-186-194.

References

1. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Kablov E.N., Startsev O.V. The basic and applied research in the field of corrosion and ageing of materials in natural environments (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 4 (37), pp. 38–52. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-4-38-52.
3. Kablov E.N. *Innovative development is the most important priority of the state*. *Metally Evrazii*, 2010, no. 2, pp. 6–11.
4. Kablov E.N. What will the future be made of? New generation materials, technologies for their creation and processing – the basis of innovation. *Krylya Rodiny*, 2016, no. 5, pp. 8–18.
5. Kablov E.N., Startsev O.V., Medvedev I.M. Review of international experience on corrosion and corrosion protection. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 2 (35), pp. 76–87. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-2-76-87.

6. Aboulkhair N.T., Everitt N.M., Ashcroft I., Tuck C. Reducing porosity in AlSi10Mg parts processed by selective laser melting. *Additive Manufacturing*, 2014, vol. 1–4, pp. 77–86.
7. Prashanth K.G., Scudino S., Klauss H.J. Microstructure and mechanical properties of Al–12Si produced by selective laser melting: Effect of heat treatment. *Materials Science & Engineering: A*, 2014, vol. 590, pp. 153–160.
8. Weingarten C., Buchbinder D. Formation and reduction of hydrogen porosity during selective laser melting of AlSi10Mg. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, vol. 221, pp. 112–120.
9. Kablov E.N., Lukina E.A., Sbitneva S.V., Khokhlatova L.B., Zaitsev D.V. Formation of metastable phases during the decomposition of a solid solution during the artificial aging of Al alloys. *Tekhnologiya legkikh splavov*, 2016, no. 3, pp. 7–17.
10. Kablov E.N., Shchetanov B.V., Grashhenkov D.V., Shavnev A.A., Nyafkin A.N. Metalmatrix composite materials on the basis of Al–SiC. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2012, no. 5, pp. 373–380.
11. Kablov E.N., Antipov V.V., Chesnokov D.V., Kutyrev A.E. Application of Al–Mg–Si–Cu system aluminum alloy combined anodic dissolution for prognosis of tensile strength loss during natural exposure testing. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 2 (59), pp. 63–73. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-63-73.
12. Sbitneva S.V., Lukina E.A., Benarieb I. Some structural features of aluminum alloys obtained by selective laser melting (review). *Trudy VIAM*, 2023, no. 1 (119), paper no. 06. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 22, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-1-69-83.
13. Shchetinina N.D., Kuznetsova P.E., Dynin N.V., Selivanov A.A. Aluminum alloys with additions of Sc and Zr IN additive manufacturing (review) *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 3 (64), paper no. 03. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: August 24, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-3-19-34.
14. Kravchenko D.V., Kozlov I.A., Nikiforov A.A. Methods for preparing the surface of aluminum alloys for electroplating (review). *Trudy VIAM*, 2021, no. 6 (100), paper no. 09. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: September 04, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-6-82-99.
15. Zhelonkina S.I. Review of modern methods of preparing the surface of aluminum alloys for the application of metal coatings (part 1). *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya*, 2021, vol. 17, no. 5 (197), pp. 227–231.
16. Antipov V.V. Prospects for development of aluminium, magnesium and titanium alloys for aerospace engineering. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. 5, pp. 186–194. DOI: 10.18577/2107-9140-2017-0-S-186-194.

Информация об авторах

Козлов Илья Андреевич, заместитель начальника Научно-исследовательского отделения, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Волков Илья Александрович, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Фомина Марина Александровна, начальник лаборатории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Захаров Кирилл Евгеньевич, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Цыа А. Kozlov, Deputy Head of Scientific-Research Bureau, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Цыа А. Volkov, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Marina A. Fomina, Head of Laboratory, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Kirill E. Zakharov, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 24.10.2023; одобрена и принята к публикации после рецензирования 27.10.2023.
The article was submitted 24.10.2023; approved and accepted for publication after reviewing 27.10.2023.