

Научная статья

УДК 629.7.023

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-7-74-88

ВЛИЯНИЕ СПОСОБОВ ПОДГОТОВКИ ПОВЕРХНОСТИ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА 1163-АТ НА АДГЕЗИЮ ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ

Д.В. Кравченко¹, И.А. Козлов¹, А.А. Никифоров¹, Я.В. Толмачев¹

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

Аннотация. Приводится описание способов подготовки поверхности образцов из алюминиевого сплава 1163-АТ перед нанесением гальванических покрытий. Приведены сведения о влиянии выбранных способов подготовки поверхности образцов на адгезию электролитического никелевого покрытия к подложке. Показано, что применение подслоя способно обеспечить снижение шероховатости поверхности после нанесения электролитического никелевого покрытия толщиной 12 мкм.

Ключевые слова: сплавы алюминия, адгезия, цинкатная обработка, никелевая цементация, высокопористое анодирование, шероховатость

Для цитирования: Кравченко Д.В., Козлов И.А., Никифоров А.А., Толмачев Я.В. Влияние способов подготовки поверхности алюминиевого сплава 1163-АТ на адгезию гальванических покрытий // Труды ВИАМ. 2022. № 7 (113). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-7-74-88.

Scientific article

THE INFLUENCE OF 1163-AT ALUMINIUM ALLOY SURFACE PREPARATION ON THE ADHESION OF ELECTROPLATED COATINGS

D.V. Kravchenko¹, I.A. Kozlov¹, A.A. Nikiforov¹, Y.V. Tolmachev¹

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 article describes the most technologically advanced methods of preparation of the surface of aluminum alloy 1163-AT samples before the application of electrolytic coatings. Information about the influence of the selected methods of sample surface preparation on the adhesion strength of the electrolytic nickel coating to the substrate is provided. It is shown that the use of a sublayer can affect the smoothing of the microtopology and cause a decrease in surface roughness after the deposition of an electrolytic nickel coating 12 μm thick.

Keywords: aluminum alloys, adhesion, zincate treatment, immersion nickel plating, highly porous anodizing, roughness

For citation: Kravchenko D.V., Kozlov I.A., Nikiforov A.A., Tolmachev Y.V. The influence of 1163-AT aluminium alloy surface preparation on the adhesion of electroplated coatings. *Trudy VIAM*, 2022, no. 7 (113), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-7-74-88.

Введение

В разработке инновационных технологий создания авиационной техники все большее значение приобретает использование материалов с пониженными характеристиками плотности, что обеспечивает снижение весовых характеристик самолета

в целом [1, 2]. Наиболее прогрессивными и составляющими все бóльшую долю в конструкции планера летательных аппаратов являются полимерные композиционные материалы, применение которых направлено на повышение эффективности конструкторских решений [3, 4].

На производственных площадках авиастроительных предприятий детали, изготовленные из сплавов алюминия, подвергают анодно-оксидной обработке, обеспечивая тем самым коррозионную стойкость и высокую прочность сцепления лакокрасочных систем с подложкой [5–8].

Улучшение технических характеристик деталей, изготовленных из сплавов алюминия с применением технологии осаждения металлопокрытий, позволяет расширить функциональность узлов и агрегатов. Такая обработка способна обеспечить высокую поверхностную микротвердость, износостойкость и стойкость против коррозии деталей, узлов и механизмов [9].

Например, для обеспечения низкого коэффициента трения применяется хромирование [10], для обеспечения стойкости против контактной коррозии (в контакте с более электроположительными металлами) – кадмирование, для обеспечения паяемости и сохранения способности к пайке детали из сплавов алюминия подвергают оловянированию или нанесению сплавов олова [11].

Нанесение гальванических металлопокрытий на детали и узлы из сплавов алюминия осложнено несколькими факторами:

- во-первых, этому препятствует потенциал алюминия ($E = -1,662$ В);
- во-вторых, из-за окисления [12] поверхность алюминия покрывается естественной пленкой оксидов [13].

Изучение способов подготовки поверхности сплавов алюминия [14] позволило выбрать следующие из них:

- получение металлических покрытий контактным способом из Zn, Ni, Sn;
- формирование анодной пленки с высокой степенью пористости.

После получения подслоя далее следует осаждение электролитического никелевого покрытия.

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

Материалы и методы

Приготовление растворов проводили с использованием химикатов с квалификацией не менее «ч». Для формирования подслоя анодной пленки с высокой степенью пористости и последующего никелирования применяли источник тока Tektronix PWS2326 DC Power Supply 0–32V, 6A.

Для проведения исследований изготовлены образцы из сплава 1163-АТ (ОСТ 1.90246–77, закаленные и естественно состаренные) состава, % (по массе): до 0,15 Fe; до 0,1 Si; от 0,5 до 0,8 Mn; до 0,05 Ni; от 0,01 до 0,07 Ti; от 93,99 до 95,58 Al; от 4,1 до 4,5 Cu; от 1,3 до 1,6 Mg; до 0,1 Zn, размером 50×100 мм. Плакировку удаляли травлением в растворе, приведенном в ГОСТ 9.305–84 (карта 16, состав 1 при температуре 70 °С, в течение 15 мин).

Толщину никелевого покрытия определяли металлографическим методом.

Микропрофиль покрытия и изменение шероховатости поверхности образцов с покрытием определяли на оптическом 3D-профилометре Plu Neox при увеличении ×100.

Оценку адгезии осажденного никелевого покрытия к алюминиевым образцам с выбранным подслоем проводили приведенными далее методами.

Метод отрыва. Для обеспечения прочности склеивания упора диаметром 20 мм и образца с никелевым покрытием проводили зачистку наждачной бумагой Р100. Приклеивание осуществляли полимерным пленочным клеем ВК-51 на основе эпоксидных смол с отверждением при температуре 120 °С в течение 3 ч.

Определение адгезии по методу отрыва проводили адгезиметром Elcometer 506 с цифровым манометром (рис. 1).



Рис. 1. Внешний вид адгезиметра Elcometer 506

Метод изгиба по ГОСТ 9.302–88. Образец с покрытием зажимали в тисках и изгибали под углом 90 градусов в противоположные стороны до излома. В месте излома фиксировалось отслаивание покрытия.

Метод определения прочности покрытий при ударе. Прочность покрытий при ударе определяли на приборе «Константа У2М» по методике, приведенной в ГОСТ 4765–73.

Образец с покрытием помещали на наковальню прибора «Константа У2М» таким образом, чтобы покрытие находилось со стороны удара бойка. Масса груза составила 1000 г. Груз фиксировали на высоте 1 м стопорным винтом, убирали фиксатор и груз свободно падал на боек, совершая удар по испытываемому образцу. После удара визуально оценивали покрытие образца на наличие отслаивания, трещин и сколов.

Формула для расчета энергии удара: $E = 9,8mh$ (где m – масса, кг; h – высота, м).

Результаты и обсуждение

На первом этапе работ проведено нанесение электролитического никелевого покрытия по ГОСТ 9.305–84 на образцы из сплава 1163-АТ по следующей схеме:

- обезжиривание (карта 11, состав 5);
- травление (карта 16, состав 1);
- осветление (карта 18, состав 5);
- нанесение подслоя.

Цинкатную обработку проводили в растворе состава: оксид цинка (от 70 до 100 г/л), натр едкий (от 500 до 550 г/л), железо треххлористое (от 2 до 3 г/л), калий-натрий виннокислый (от 8 до 10 г/л), натрий азотнокислый (от 1 до 2 г/л) – при температуре раствора от 15 до 30 °С в течение от 0,3 до 0,7 мин с последующим удалением цинкового слоя в растворе азотной кислоты (от 300 до 400 г/л), от 15 до 30 с с последующим повторным нанесением цинкатного подслоя. Такая схема подготовки поверхности обеспечивает повышение адгезии цинкатного покрытия [15–30].

Никелевую цементацию проводили в растворе состава: никель двуххлористый (от 450 до 600 г/л), кислота фтористоводородная (от 9 до 10 г/л), кислота борная (от 28 до 40 г/л) – при температуре раствора от 15 до 30 °С в течение 1 мин [22, 31].

Станнатную обработку проводили в растворе состава: метастаннат натрия (от 20 до 80 г/л), калий пиррофосфорнокислый (от 30 до 120 г/л), аммоний щавелевокислый (от 10 до 20 г/л), натр едкий (от 1,5 до 7 г/л) – при pH = 12,8 и температуре раствора от 20 до 40 °С в течение 1 мин [32].

Формирование анодной пленки с высокой степенью пористости проводили в растворе состава: кислота ортофосфорная 85%-ная (от 250 до 275 г/л), кислота серная 96 %-ная (150 г/л), аммоний фтористый кислый (от 12 до 15 г/л) – при температуре раствора от 15 до 25 °С, плотности тока 3 А/дм², напряжении до 18 В в течение 5 мин [33–36].

Электролитическое нанесение никелевого покрытия проводили в электролите Уоттса (ГОСТ 9.305–84, состав 1) в течение 1 ч при pH электролита от 5,39 до 5,41, в условиях периодической фильтрации электролита фильтром синяя лента $d = 15,0$ см (ТУ 2642-001-68085491–2011).

Топография поверхности

На следующем этапе исследовали топографию поверхности (далее – микропрофиль) нескольких групп образцов из сплава 1163-АТ после:

- проведения обезжиривания, травления и осветления;
- осаждения подслоя;
- нанесения электролитического никелевого покрытия.

В результате проведенных исследований показано, что выбор подслоя перед нанесением электролитического никелевого покрытия оказывает влияние на внешний вид и микропрофиль поверхности (рис. 1).

Для сравнения микропрофиля образцов с подслоем и электролитическим никелевым покрытием исследовали образец из сплава 1163-АТ без покрытия после обезжиривания, травления и осветления (рис. 2).

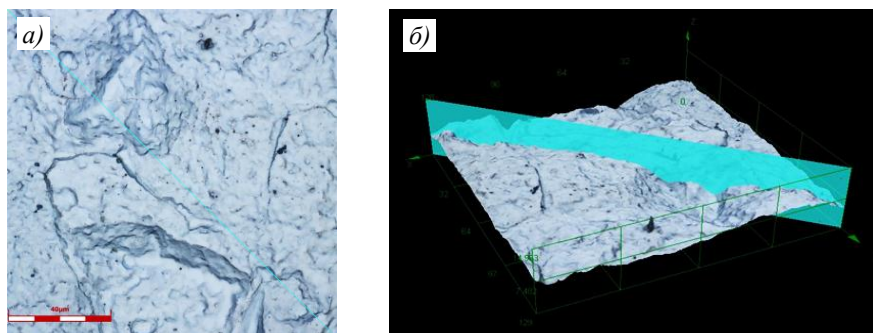


Рис. 2. Микропрофиль поверхности образца из сплава 1163-АТ после проведения подготовительных операций – травления и осветления

Нанесенное на сформированный цинкатный подслоя (рис. 3, а, б) электролитическое никелевое покрытие характеризуется наличием узлов и отдельных глобул (рис. 3, в, г).

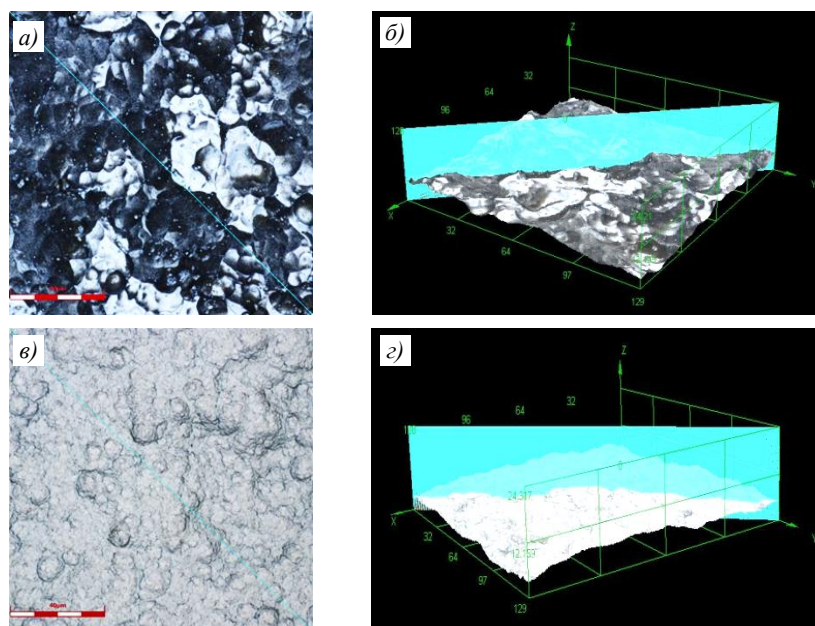


Рис. 3. Микропрофиль ($\times 100$) цинкатного подслоя (а, б) и электролитического никелевого покрытия толщиной 12 мкм, нанесенного на цинкатный подслоя (в, г)

Нанесенное на сформированный никелевый подслоя (рис. 4, а, б) электролитическое никелевое покрытие характеризуется грубой структурой профиля (рис. 4, в, г), поверхность более развита, чем при нанесении электролитического никелевого покрытия на цинкатный подслоя.

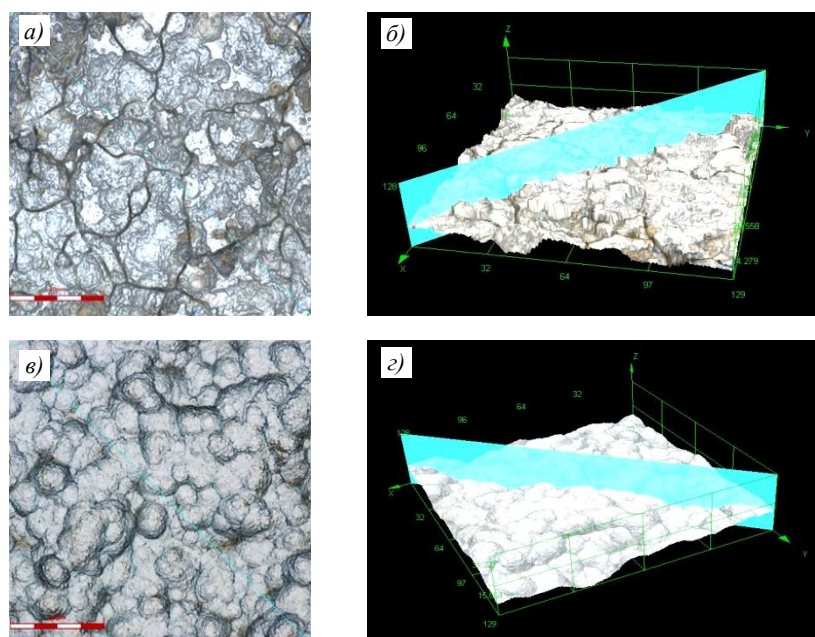


Рис. 4. Микропрофиль ($\times 100$) никелевого подслоя (а, б) и электролитического никелевого покрытия толщиной 12 мкм, нанесенного на никелевый подслоя (в, г)

Нанесенное на сформированный станнатный подслоу (рис. 5, а, б) электролитическое никелевое покрытие более равномерно (рис. 5, в, г), плотность и размер глобул меньше, чем при нанесении электролитического никелевого покрытия на цинкатный подслоу.

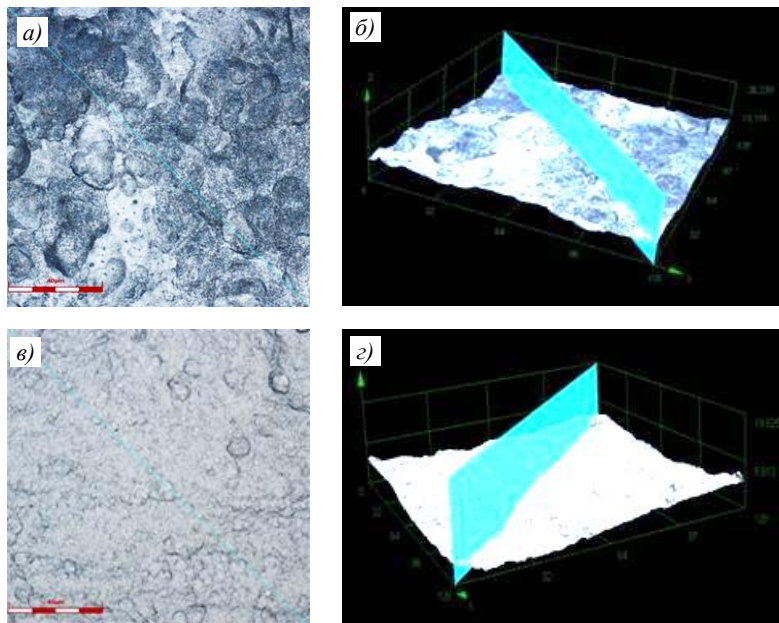


Рис. 5. Микропрофиль ($\times 100$) станнатного подслоу (а, б) и электролитического никелевого покрытия толщиной 12 мкм, нанесенного на станнатный подслоу (в, г)

Нанесенное на подслоу анодной пленки с высокой степенью пористости (рис. 6, а, б) электролитическое никелевое покрытие характеризуется наибольшей равномерностью (рис. 6, в, г), плотность и размер глобул меньше, чем при нанесении электролитического никелевого покрытия на цинкатный подслоу.

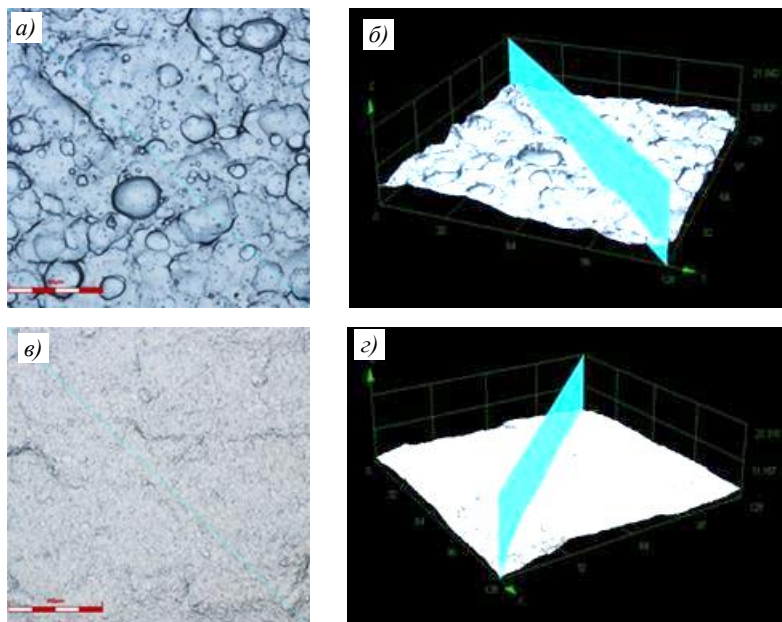


Рис. 6. Микропрофиль ($\times 100$) подслоу анодной пленки с высокой степенью пористости (а, б) и электролитического никелевого покрытия толщиной 12 мкм, нанесенного на подслоу анодной пленки с высокой степенью пористости (в, г)

Установлено, что электролитическое никелевое покрытие (рис. 3, в, г; рис. 4, в, г), осажденное на цинкатный и никелевый подслои (рис. 3, а, б; рис. 4, а, б), характеризуется более грубым микропрофилем поверхности по сравнению с подслоем (рис. 5, а, б; рис. 6, а, б), полученным станнатной обработкой и за счет формирования анодной пленки с высокой степенью пористости (рис. 5, в, г; рис. 6, в, г).

Шероховатость

Исследования микропрофиля образцов из сплава 1163-АТ показали, что выбор подслоя (при прочих равных условиях технологического процесса) оказывает влияние на внешний вид и микропрофиль нанесенного электролитического никелевого покрытия, что согласуется с результатами измерения шероховатости подслоя и подслоя с электролитическим никелевым покрытием, приведенными в табл. 1.

Таблица 1

Результаты измерения шероховатости поверхности после получения подслоя и нанесения никелевого покрытия толщиной 12 мкм на сформированный подслой

Покрытие	Шероховатость поверхности, мкм, после нанесения			
	подслоя		подслоя + покрытия	
	R_z	R_a	R_z	R_a
Цинкатный подслой + никелирование	3,135	0,5	1,538	0,377
Никелевая цементация + никелирование	7,693	1,419	4,514	0,921
Станнатный подслой + никелирование	2,858	0,471	1,733	0,279
Подслой анодной пленки с высокой степенью пористости + никелирование	2,683	0,435	1,339	0,229
Примечание. Шероховатость образца без покрытия после травления и осветления по приведенному режиму составляет $R_z = 2,675$ мкм, $R_a = 0,545$ мкм.				

Отмечено, что наименьшее развитие шероховатости выявлено на образце с подслоем, сформированным путем получения анодной пленки с высокой степенью пористости и у образца с подслоем, полученным станнатной обработкой.

Из данных табл. 1 видно, что в результате нанесения электролитического никелевого покрытия толщиной 12 мкм наблюдается эффект снижения шероховатости поверхности на образцах во всех рассматриваемых вариантах получения подслоя. Наибольшее снижение шероховатости отмечено на образце с подслоем, сформированным путем получения анодной пленки с высокой степенью пористости.

Адгезия

На следующем этапе исследовали одну из основных физико-механических характеристик любого покрытия – его адгезию с подложкой. Для изучения влияния способов подготовки поверхности сплава 1163-АТ на адгезию электролитического никелевого покрытия выбран ряд методов, позволяющих определить количественные и качественные показатели прочности сцепления системы «подслой–электролитическое никелевое покрытие» к подложке из сплава 1163-АТ (метод отрыва, метод изгиба, метод определения прочности покрытий при ударе).

Метод отрыва

Принцип метода отрыва основан на определении удельного усилия, необходимого для отрыва покрытия от подложки либо для когезионного разрушения покрытия.

После отрыва упора приклеенного к образцу на экране прибора фиксируется значение усилия отрыва в МПа. Полученные результаты, приведенные в табл. 2, дают количественное представление об адгезии электролитического никелевого покрытия к подложке из сплава 1163-АТ.

Таблица 2

Результаты испытаний на адгезию по методу отрыва

Подслой	Усилие отрыва, МПа	Отрыв покрытия
Цинкатная обработка	13,52	Частичный
Анодная пленка с высокой степенью пористости	19,54	Отсутствует
Никелевая цементация	4,71	Полный
Станнатная обработка	3,79	Полный

Показано, что подслои, сформированный за счет получения анодной пленки с высокой степенью пористости, способен обеспечить адгезию электролитического никелевого покрытия к подложке, превышающую адгезию клея к образцу без разрушения и отслаивания электролитического никелевого покрытия (рис. 7). На рис. 7, а обозначена зона исследования микропрофиля электролитического никелевого покрытия.

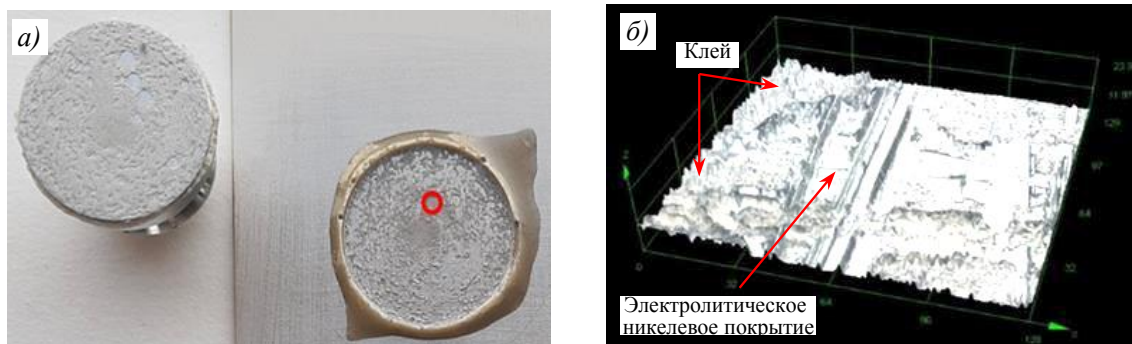


Рис. 7. Внешний вид никелированного образца с подслоем анодной пленки с высокой степенью пористости после испытания на отрыв рядом с контактной площадкой упора (а) и микропрофиль покрытия в зоне отрыва упора (б)

Цинкатный подслои способен обеспечить адгезию электролитического никелевого покрытия к подложке на уровне не более 13 МПа, превышение усилия отрыва приводит к частичному разрушению покрытия.

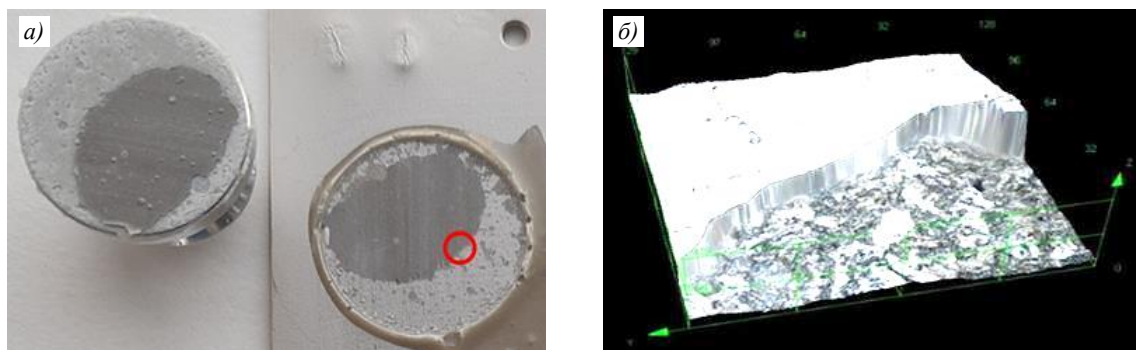


Рис. 8. Внешний вид никелированного образца с цинкатным подслоем после испытания на отрыв рядом с контактной площадкой упора (а) и микропрофиль покрытия на границе отрыва упора (б)

На рис. 8, *а* обозначена зона исследования микропрофиля на границе раздела «подложка из сплава 1163-АТ–цинкатный подслоя–электролитическое никелевое покрытие». Из данных рис. 8 видно, что отслаивание электролитического никелевого покрытия, по-видимому, произошло от цинкатного подслоя, поскольку морфология поверхности подложки тождественна морфологии поверхности цинкатного подслоя (рис. 3, *а, б*) до нанесения гальванического покрытия и визуально отличается от морфологии поверхности образца из сплава 1163-АТ (рис. 2, *а, б*), что может свидетельствовать о недостаточной адгезии в системе «подслой–покрытие».

Никелевый (рис. 9) и стannатный подслоя (рис. 10) не обеспечивают адгезию электролитического никелевого покрытия к подложке из сплава 1163-АТ, по-видимому, из-за химического состава сплава.

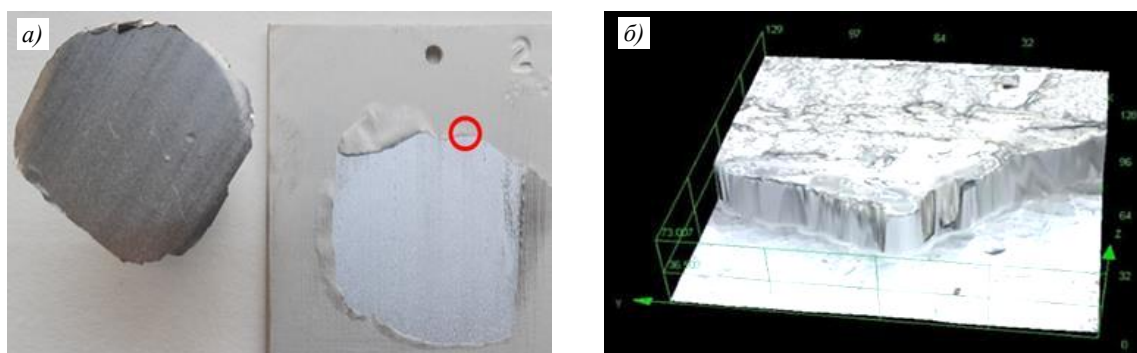


Рис. 9. Внешний вид никелированного образца с никелевым подслоем после испытания на отрыв рядом с контактной площадкой упора (*а*) и микропрофиль покрытия на границе отрыва упора (*б*)

На рис. 9, *а* обозначена зона исследования микропрофиля на границе раздела «подложка из сплава 1163-АТ–никелевый подслоя–электролитическое никелевое покрытие». Из данных рис. 9 видно, что отслаивание электролитического никелевого покрытия, по-видимому, произошло от никелевого подслоя, поскольку морфология поверхности подложки тождественна морфологии поверхности никелевого подслоя (рис. 4, *а, б*) до нанесения гальванического покрытия и визуально отличается от морфологии поверхности образца из сплава 1163-АТ (рис. 2), что может свидетельствовать о недостаточной адгезии в системе «подслой–покрытие».

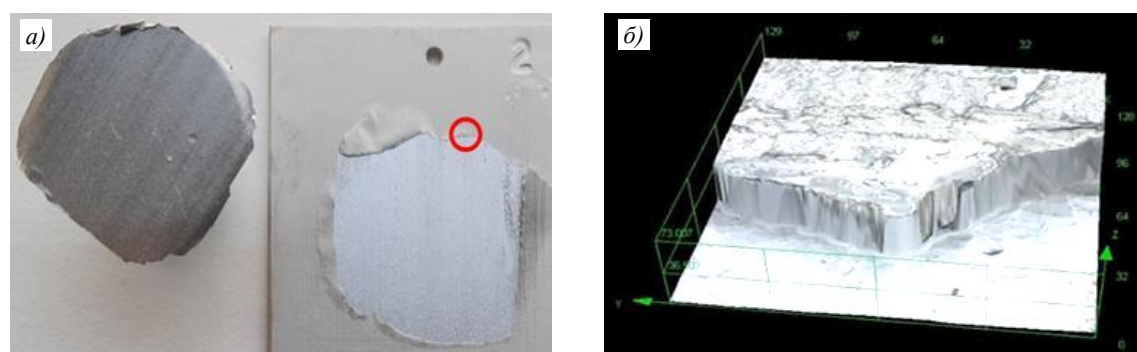


Рис. 10. Внешний вид никелированного образца со стannатным подслоем после испытания на отрыв рядом с контактной площадкой упора (*а*) и микропрофиль покрытия на границе отрыва упора (*б*)

На рис. 10, *a* обозначена зона исследования микропрофиля на границе раздела «подложка из сплава 1163-АТ–станнатный подслоу–электролитическое никелевое покрытие». Из данных рис. 10 видно, что отслаивание электролитического никелевого покрытия вместе со станнатным подслоем, по-видимому, произошло от подложки образца из сплава 1163-АТ, поскольку морфология подложки тождественна морфологии, представленной на рис. 2, что может свидетельствовать о недостаточной адгезии в системе «подслоу–подложка».

Метод изгиба

Наиболее простым и технологичным методом качественной оценки адгезии гальванических покрытий можно считать метод изгиба. В табл. 3 приведены результаты, полученные в ходе испытаний образцов с подслоем и электролитическим никелевым покрытием.

Таблица 3

Результаты испытаний на адгезию по методу изгиба

Подслоу	Отслаивание покрытия
Цинкатная обработка	Не выявлено
Анодная пленка с высокой степенью пористости	Не выявлено
Никелевая цементация	Выявлено
Станнатная обработка	Выявлено

Полученные данные согласуются со значениями адгезии по методу отрыва и дают оценочную характеристику прочности сцепления электролитического никелевого покрытия с подложкой.

Метод определения прочности покрытий при ударе

В табл. 4 приведены результаты, полученные в ходе испытаний образцов с электролитическим никелевым покрытием, нанесенным на рассмотренные ранее варианты подслоя, методом определения прочности покрытий при ударе.

Значение прочности покрытия при ударе определяется фактическим значением энергии удара груза по образцу с покрытием.

Таблица 4

Результаты испытаний прочности покрытий при ударе

Подслоу	Отслаивание покрытия
Цинкатная обработка	Не выявлено
Анодная пленка с высокой степенью пористости	Не выявлено
Никелевая цементация	Не выявлено
Станнатная обработка	Не выявлено
Примечание. Все покрытия, нанесенные на сплав 1163-АТ, выдержали энергию удара не менее 9,8 Дж.	

Показано, что все образцы из сплава 1163-АТ с электролитическим никелевым покрытием, нанесенным на рассмотренные ранее варианты подслоя (цинкатный, никелевый, станнатный, анодная пленка с высокой степенью пористости), выдержали испытание на прочность покрытия при ударе – по итогам испытаний растрескивания или отслаивания гальванического покрытия от подложки не выявлено (рис. 11), что свидетельствует о высокой устойчивости электролитического никелевого покрытия, нанесенного на образцы из сплава 1163-АТ, к динамическим нагрузкам.



Рис. 11. Внешний вид отпечатка бойка на никелированном образце после испытания на прочность покрытий при ударе

Заключения

Установлено, что подслоя, сформированный путем получения анодной пленки с высокой степенью пористости, способен обеспечить адгезию электролитического никелевого покрытия к подложке, превышающую адгезию клея к образцу, без разрушения и отслаивания гальванического покрытия.

Показано, что электролитическое никелевое покрытие, нанесенное на подслоя, полученный стантанной обработкой или никелевой цементацией, уступает по адгезионной прочности подслою, полученному цинкатной обработкой или путем формирования анодной пленки с высокой степенью пористости.

Показано, что при проведении испытаний на адгезию методом отрыва отслаивание электролитического никелевого покрытия, по-видимому, происходит не от подложки, а от цинкатного и никелевого подслоя.

Установлено, что выбор подслоя (при прочих равных условиях технологического процесса) влияет на внешний вид и микропрофиль нанесенного электролитического никелевого покрытия.

Установлено, что в результате нанесения электролитического никелевого покрытия на образцы из сплава 1163-АТ толщиной 12 мкм наблюдается эффект снижения шероховатости поверхности на образцах. Наибольшее снижение шероховатости отмечено на образце с подслоем, сформированным путем получения анодной пленки с высокой степенью пористости.

Определена устойчивость электролитического никелевого покрытия, нанесенного на образцы из сплава 1163-АТ, к динамическим нагрузкам во всех рассматриваемых вариантах получения подслоя.

Список источников

1. Антипов В.В., Григорьев М.В., Коновалов А.Н., Мешков А.А., Серебренникова Н.Ю. Изучение влияния режимов клепки на малоцикловую усталость клепаных соединений листов, изготовленных из алюминий-литиевых сплавов // *Авиационные материалы и технологии*. 2019. № 3 (56). С. 3–8. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-3-8.
2. Каблов Е.Н. Основные направления развития материалов для авиакосмической техники XXI века // *Перспективные материалы*. 2000. № 3. С. 27–36.
3. Каблов Е.Н. ВИАМ: материалы нового поколения для ПД-14 // *Крылья Родины*. 2019. № 7–8. С. 54–58.
4. Каблов Е.Н. Композиты: сегодня и завтра // *Металлы Евразии*. 2015. № 1. С. 36–39.
5. 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.

6. Павловская Т.Г., Волков И.А., Козлов И.А., Наприенко С.А. Экологически улучшенная технология обработки поверхности алюминиевых сплавов // Труды ВИАМ. 2016. № 7 (43). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 14.04.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-7-2-2.
7. 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. 2018. № 7 (67). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 14.04.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-7-10-24.
8. Дуюнова В.А., Козлов И.А., Оглодков М.С., Козлова А.А. Современные тенденции анодного оксидирования алюминий-литиевых и алюминиевых сплавов (обзор) // Труды ВИАМ. 2019. № 8 (80). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 17.04.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-8-79-89.
9. Хмелева К.М., Козлов И.А., Никитин Я.Ю., Никифоров А.А. Современные тенденции защитных гальванических покрытий, работающих при повышенных температурах (обзор) // Труды ВИАМ. 2020. № 12 (94). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 15.04.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-12-75-86.
10. Солодкова Л.Н., Кудрявцев В.Н. Электролитическое хромирование: учеб. пособие / под ред. В.Н. Кудрявцева. М.: Глобус, 2007. 191 с.
11. Гальванические покрытия в машиностроении: справочник / под ред. М.А. Шлугера. М.: Машиностроение, 1985. Т. 1, 2. 240 с.
12. Мамаев В.И., Кудрявцев В.Н. Никелирование: учеб. пособие / под ред. В.Н. Кудрявцева. М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2014. 192 с.
13. Court S.W., Barker B.D., Walsh F.C. Electrochemical Measurements of Electroless Nickel Coatings on Zincated Aluminium Substrates // Transactions of the Institute of Metal Finishing. 2000. Vol. 78. No. 4. P. 157–162. DOI: 10.1080/00202967.2000.11871330.
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: 17.04.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-6-82-99.
15. Court S., Kerr C., Ponce de León C. et al. Monitoring of zincate pre-treatment of aluminium prior to electroless nickel plating // Transactions of the Institute of Metal Finishing. 2017. Vol. 95. No. 2. P. 97–105. DOI: 10.1080/00202967.2016.1236573.
16. Pearson T., Wake S.J. Improvements in the Pretreatment of Aluminium as a Substrate for Electrodeposition // Transactions of the Institute of Metal Finishing. 1997. Vol. 75. No. 3. P. 93–97. DOI: 10.1080/00202967.1997.11871150.
17. Pearson T. Pretreatment of aluminium for electrodeposition // Transactions of the Institute of Metal Finishing. 2006. Vol. 84. No. 3. P. 121–123.
18. Electroplated aluminum parts and process for production: pat. US 6692630 B2; filed 09.08.01; publ. 17.02.04.
19. Верник С., Пиннер Р. Химическая и электролитическая обработка алюминия и его сплавов. Л.: Гос. союзное изд-во судостроит. пром-сти, 1960. 389 с.
20. Electroplated aluminium parts and process of production thereof: pat. CN 1498288 A; filed 17.08.01; publ. 19.05.2004.
21. Robertson S.G., Ritchie I.M. The role of iron (III) and tartrate in the zincate immersion process for plating aluminium // Journal of Applied Electrochemistry. 1997. Vol. 27 (7). P. 799–804.
22. Takács D., Sziráki L., Török T.I. et al. Effects of pre-treatments on the corrosion properties of electroless Ni–P layers deposited on AlMg2 alloy // Surface and Coatings Technology. 2007. Vol. 201. P. 4526–4535.
23. Delaunois F., Petitjean J.P., Lienard P., Jacob-Duliere M. Autocatalytic electroless nickel-boron plating on light alloys // Surface and Coatings Technology. 2000. Vol. 124. P. 201–209. DOI: 10.1016/S0257-8972(99)00621-0.

24. Thurlow K.P. Electroless nickel plating on aluminium connectors // Transactions of the Institute of Metal Finishing. 1989. Vol. 67. No. 1. P. 82–86. DOI: 10.1080/00202967.1989.11870847.
25. Sharma A.K. Gold plating on aluminium alloys for space applications // Transactions of the Institute of Metal Finishing. 1989. Vol. 67. No. 1. P. 87–88. DOI: 10.1080/00202967.1989.11870848.
26. Electroplating on aluminium and its alloys: pat. GB 1007252A; filed 12.09.61; publ. 13.10.65.
27. Wyszynski A.E. An Immersion Alloy Pretreatment for Electroplating on Aluminium // Transactions of the Institute of Metal Finishing. 1967. Vol. 45. No. 1. P. 147–154. DOI: 10.1080/00202967.1967.11870032.
28. Burgess J. Electroplating onto aluminium and its alloys // Transactions of the Institute of Metal Finishing. 2019. Vol. 97. No. 6. P. 285–288. DOI: 10.1080/00202967.2019.1675280.
29. Yin Z., Chen F. Effect of nickel immersion pretreatment on the corrosion performance of electroless deposited Ni–P alloys on aluminum // Surface and Coatings Technology. 2013. Vol. 228. P. 34–40. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2013.04.001.
30. Laughton R.W. Recent Developments for Electroless Nickel Plating onto Aluminium, their Basis and Implications // Transactions of the Institute of Metal Finishing. 1992. Vol. 70. No. 3. P. 120–122. DOI: 10.1080/00202967.1992.11870957.
31. Vijayanand M., Elansezhian R. Effect of Different Pretreatments and Heat Treatment on Wear Properties of Electroless Ni–B Coatings on 7075-T6 Aluminum Alloy // Procedia Engineering. 2014. Vol. 97. P. 1707–1717.
32. Попилов Л.Я. Советы заводскому технологу. Л.: Лениздат, 1975. 264 с.
33. Девяткина Т.И., Лучнева С.И., Васин Е.Н. и др. Подготовка поверхности алюминиевых сплавов для нанесения гальванических покрытий // Журнал прикладной химии. 2020. Т. 93. Вып. 9. С. 1323–1331. DOI: 10.31857/S0044461820090091.
34. Digby R.P., Paekham D.E. Pretreatment of aluminium: topography, surface chemistry and adhesive bond durability // International Journal Adhesion and Adhesives. 1995. Vol. 15. P. 61–71.
35. Spooner R.C., Seraphim D.P. Phosphoric Acid Anodizing of Aluminium and its Application to Electroplating // Transactions of the Institute of Metal Finishing. 1954. Vol. 31. No. 1. P. 29–51. DOI: 10.1080/00202967.1954.11869627.
36. Yazdi S.S., Ashrafizadeh F., Hakimizad A. Improving the grain structure and adhesion of Ni–P coating to 3004 aluminum substrate by nanostructured anodic film interlayer // Surface and Coatings Technology. 2013. Vol. 232. P. 561–566.

References

1. Antipov V.V., Grigoryev M.V., Konovalov A.N., Meshkov A.A., Serebrennikova N.Yu. Research of the influence of riveting on the low-cycle fatigue of riveted connection sheets of aluminum-lithium alloys. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 3 (56), pp. 3–8. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-3-8.
2. Kablov E.N. The main directions of development of materials for aerospace technology of the XXI century. *Perspektivnye materialy*, 2000, no. 3, pp. 27–36.
3. Kablov E.N. VIAM: new generation materials for PD-14. *Krylya Rodiny*, 2019, no. 7–8, pp. 54–58.
4. Composites: today and tomorrow. *Metally Yevrazii*, 2015, no. 1, pp. 36–39.
5. Kozlov I.A., Vinogradov S.S., Tarasova K.G., Kulyushina N.V., Manchenko V.A. Plasma electrolytic oxidation of magnesium alloys (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 1 (54), pp. 23–36. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-1-23-36.
6. Pavlovskaya T.G., Volkov I.A., Kozlov I.A., Naprienko S.A. Ecologically improved technology of aluminum alloys surface treatment. *Trudy VIAM*, 2016, no. 7, paper no. 02. Available at: <http://viam-works.ru> (accessed: April 14, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-7-2-2.
7. Antipov V.V., Petrova A.P., Kozlov I.A., Fomina M.A., Volkov I.A. Influence of technological heatings and ways of surface preparation under pasting on mechanical properties of aluminum foil from alloy AMg2N. *Trudy VIAM*, 2018, no. 7 (67), paper no. 02. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: April 14, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-7-10-24.
8. Duyunova V.A., Kozlov I.A., Oglodkov M.S., Kozlova A.A. Modern trends in the anodic oxidation of aluminum-lithium and aluminum alloys (review). *Trudy VIAM*, 2019, no. 8 (80), paper no. Art. 09. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: April 17, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-8-79-89.

9. Khmeleva K.M., Kozlov I.A., Nikitin Ya.Yu., Nikiforov A.A. Modern trends of protective galvanic coatings working at high temperatures (review). *Trudy VIAM*, 2020, no. 12 (94), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: April 15, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-12-75-86.
10. Solodkova L.N., Kudryavtsev V.N. *Electrolytic chromium plating*: textbook. Moscow: Globus, 2007, 191 p.
11. Galvanic coatings in mechanical engineering: reference. Ed. M.A. Schluger. Moscow: Mashinostroenie, 1985, vol. 1, 2. 240 p.
12. Mamaev V.I., Kudryavtsev V.N. *Nickel plating*: textbook. Moscow: Mendeleev University of Chemical Technology, 2014, 192 p.
13. Court S.W., Barker B.D., Walsh F.C. Electrochemical Measurements of Electroless Nickel Coatings on Zincated Aluminium Substrates. *Transactions of the Institute of Metal Finishing*, 2000, vol. 78, no. 4, pp. 157–162. DOI: 10.1080/00202967.2000.11871330.
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: August 17, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-6-82-99.
15. Court S., Kerr C., Ponce de León C. et al. Monitoring of zincate pre-treatment of aluminium prior to electroless nickel plating. *Transactions of the Institute of Metal Finishing*, 2017, vol. 95, no. 2, pp. 97–105. DOI: 10.1080/00202967.2016.1236573.
16. Pearson T., Wake S.J. Improvements in the Pretreatment of Aluminium as a Substrate for Electrodeposition. *Transactions of the Institute of Metal Finishing*, 1997, vol. 75, no. 3, pp. 93–97. DOI: 10.1080/00202967.1997.11871150.
17. Pearson T. Pretreatment of aluminium for electrodeposition. *Transactions of the Institute of Metal Finishing*, 2006, vol. 84, no. 3, pp. 121–123.
18. *Electroplated aluminum parts and process for production*: pat. US 6692630 B2; filed 09.08.01; publ. 17.02.04.
19. Wernick S., Pinner R. *Chemical and electrolytic treatment of aluminum and its alloys*. Leningrad: State Union Publishing House Shipbuilding Industry, 1960, 389 p.
20. *Electroplated aluminium parts and process of production thereof*: pat. CN 1498288 A; filed 17.08.01; publ. 19.05.04.
21. Robertson S.G., Ritchie I.M. The role of iron (III) and tartrate in the zincate immersion process for plating aluminium. *Journal of Applied Electrochemistry*, 1997, vol. 27 (7), pp. 799–804.
22. Takács D., Sziráki L., Török T.I. et al. Effects of pre-treatments on the corrosion properties of electroless Ni–P layers deposited on AlMg2 alloy. *Surface and Coatings Technology*, 2007, vol. 201, pp. 4526–4535.
23. Delaunois F., Petitjean J.P., Lienard P., Jacob-Duliere M. Autocatalytic electroless nickel-boron plating on light alloys. *Surface and Coatings Technology*, 2000, vol. 124, pp. 201–209. DOI: 10.1016/S0257-8972(99)00621-0.
24. Thurlow K.P. Electroless nickel plating on aluminium connectors. *Transactions of the Institute of Metal Finishing*, 1989, vol. 67, no. 1, pp. 82–86. DOI: 10.1080/00202967.1989.11870847.
25. Sharma A.K. Gold plating on aluminium alloys for space applications. *Transactions of the Institute of Metal Finishing*, 1989, vol. 67, no. 1, pp. 87–88. DOI: 10.1080/00202967.1989.11870848.
26. Electroplating on aluminium and its alloys: pat. GB 1007252A; filed 12.09.61; publ. 13.10.65.
27. Wyszynski A.E. An Immersion Alloy Pretreatment for Electroplating on Aluminium. *Transactions of the Institute of Metal Finishing*, 1967, vol. 45, no. 1, pp. 147–154. DOI: 10.1080/00202967.1967.11870032.
28. Burgess J. Electroplating onto aluminium and its alloys. *Transactions of the Institute of Metal Finishing*, 2019, vol. 97, no. 6, pp. 285–288. DOI: 10.1080/00202967.2019.1675280.
29. Yin Z., Chen F. Effect of nickel immersion pretreatment on the corrosion performance of electroless deposited Ni–P alloys on aluminum. *Surface and Coatings Technology*, 2013, vol. 228, pp. 34–40. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2013.04.001.

30. Laughton R.W. Recent Developments for Electroless Nickel Plating onto Aluminium, their Basis and Implications. *Transactions of the Institute of Metal Finishing*, 1992, vol. 70, no. 3, pp. 120–122. DOI: 10.1080/00202967.1992.11870957.
31. Vijayanand M., Elansezhian R. Effect of Different Pretreatments and Heat Treatment on Wear Properties of Electroless Ni–B Coatings on 7075-T6 Aluminum Alloy. *Procedia Engineering*, 2014, vol. 97, pp. 1707–1717.
32. Popilov L.Ya. *Advice to the factory technologist*. Leningrad: Lenizdat, 1975, 264 p.
33. Devyatkina T.I., Luchneva S.I., Vasin E.N. Surface preparation of aluminum alloys for electroplating. *Journal of Applied Chemistry*, 2020, vol. 93, is. 9, pp. 1323–1331. DOI: 10.31857/S0044461820090091.
34. Digby R.P., Paekham D.E. Pretreatment of aluminium: topography, surface chemistry and adhesive bond durability. *International Journal Adhesion and Adhesives*, 1995, vol. 15, pp. 61–71.
35. Spooner R.C., Seraphim D.P. Phosphoric Acid Anodizing of Aluminium and its Application to Electroplating. *Transactions of the Institute of Metal Finishing*, 1954, vol. 31, no. 1, pp. 29–51. DOI: 10.1080/00202967.1954.11869627.
36. Yazdi S.S., Ashrafizadeh F., Hakimizad A. Improving the grain structure and adhesion of Ni–P coating to 3004 aluminum substrate by nanostructured anodic film interlayer. *Surface and Coatings Technology*, 2013, vol. 232, pp. 561–566.

Информация об авторах

Кравченко Дмитрий Владимирович, ведущий инженер, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Козлов Илья Андреевич, начальник лаборатории, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Никифоров Андрей Александрович, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Толмачев Ян Вячеславович, техник, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Dmitrii V. Kravchenko, Lead Engineer, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Ilya A. Kozlov, Head of the Laboratory, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Andrei A. Nikiforov, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Yan V. Tolmachev, Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 18.05.2022; одобрена и принята к публикации после рецензирования 19.05.2022.

The article was submitted 18.05.2022; approved and accepted for publication after reviewing 19.05.2022.