

УДК 66.017

А.А. Козлова<sup>1</sup>, В.А. Кузнецова<sup>1</sup>, И.А. Козлов<sup>1</sup>, С.А. Наприенко<sup>1</sup>, А.А. Силаева<sup>2</sup>

### ВЛИЯНИЕ ДЛИТЕЛЬНЫХ НАГРЕВОВ НА СВОЙСТВА ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА СИСТЕМЫ Al-Si-Mg

DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-2-74-80

*Работа посвящена анализу эффективности защиты неметаллических неорганических покрытий и систем лакокрасочных покрытий (ЛКП), используемых для защиты изделий из алюминиевых сплавов, при повышенных температурах. Исследовано изменение структуры неметаллических неорганических покрытий и систем ЛКП с применением растровой электронной микроскопии и импедансной спектроскопии. Проведенные исследования влияния длительного термического воздействия на адгезию систем лакокрасочных покрытий к образцам из алюминиевого сплава позволили оценить качество взаимосвязи различных слоев системы защитных покрытий.*

**Ключевые слова:** коррозия, алюминиевые сплавы, конверсионные покрытия, анодное окисление, лакокрасочные покрытия, электрохимические испытания.

А.А. Козлова<sup>1</sup>, В.А. Кузнецова<sup>1</sup>, И.А. Козлов<sup>1</sup>, С.А. Наприенко<sup>1</sup>, А.А. Силаева<sup>2</sup>

### THE EFFECT OF PROLONGED HEATING ON THE PROPERTIES OF PROTECTIVE COATINGS FOR ALUMINUM ALLOY SYSTEM Al-Si-Mg

*The work is devoted to the analysis of protection efficiency of nonmetallic inorganic coatings and systems of the paint coatings used for the protection of products made from aluminum alloys, at high temperatures. Change of structure of nonmetallic inorganic coatings and paint coating systems using raster electron microscopy and impedance spectroscopy is analysed. The conducted researches of long thermal impact on adhesion of systems of paint coatings to the aluminum alloy samples allowed to evaluate quality of interrelation of different layers of system of protecting coatings.*

**Keywords:** corrosion, aluminum alloys, conversion coatings, anodic oxidation, paint coatings, electrochemical tests.

---

<sup>1</sup>Федеральное 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

<sup>2</sup>Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева [Dmitry Mendeleev University of Chemical Technology of Russia]; e-mail: rector@muctr.ru

---

#### Введение

Развитие систем защиты от коррозии является приоритетным направлением при создании авиационной техники, эксплуатирующейся в жестких климатических условиях тропиков или приморской атмосферы [1]. Отличительной особенностью материалов, используемых в конструкции планера современных самолетов, является их высокая надежность при работе в различных температурных диапазонах [2, 3].

Несмотря на существенный прогресс в области развития полимерных композиционных материалов, в настоящее время алюминиевые сплавы остаются основным конструкционным материалом для изделий авиационной техники [4].

Так, современные литейные алюминиевые сплавы системы Al-Si-Mg обеспечивают тре-

буемый уровень свойств при температурах вплоть до 200°C. Однако в силу особенностей химического и фазового состава детали из данных сплавов не обладают удовлетворительной коррозионной стойкостью [5, 6]. В связи с этим для деталей применяется система защитных покрытий из неметаллического неорганического покрытия, служащего подслоем, обеспечивающим адгезию, и системы лакокрасочных покрытий (ЛКП) [7, 8].

Как показывает практика, в процессе длительной эксплуатации не всегда удается обеспечить надежную защиту от коррозии деталей, испытывающих эксплуатационный нагрев >100°C [9]. Такие детали в значительно большей степени подвержены коррозии, что подтверждается данными осмотров материалов самолетов [10].

В настоящее время для литейных алюминиевых сплавов используется несколько типов неметаллических неорганических покрытий: химическое оксидирование, хромовокислотное и сернокислотное анодное оксидирование [11–13]. Химическое оксидирование наиболее простой процесс формирования неметаллической неорганической пленки. Так, получение оксидного слоя на поверхности металла осуществляется за счет окислительно-восстановительной реакции [14, 15]. Покрытие, полученное методом химического оксидирования, обладает относительно низкими защитными способностями и легко повреждается при механическом воздействии [16]. Защитные свойства покрытий, формируемых методом анодного оксидирования, превышают в 2 раза и более защитные свойства покрытий, полученных в процессе химического оксидирования [17]. Покрытие, полученное методом сернокислотного анодного оксидирования, отличается большей твердостью и хрупкостью [18]. Данный тип покрытия используется исключительно с наполнением пор в ингибиторе коррозии – например, в растворах соединений шестивалентного хрома (бихромат натрия, бихромат калия). Анодное оксидирование в хромовой кислоте образует более плотную и более активную пленку, но защитные свойства образующихся покрытий хуже, чем при сернокислотном анодировании, поскольку их толщина составляет до 5 мкм [19].

В настоящее время разработан целый ряд систем ЛКП на основе акриловых, полиуретановых, эпоксидных смол, которые используются при защите изделий авиационной техники. Выбор систем покрытий зависит от условий эксплуатации изделий. Под системой покрытий подразумевается оптимальное количество слоев грунтовочного покрытия и изолирующих слоев эмали, обеспечивающих необходимый уровень эксплуатационных характеристик покрытия, с учетом максимальной температуры эксплуатации и климатических условий [20].

Многолетний опыт эксплуатации различных металлических конструкций показал, что при правильном выборе пассивирующего грунтовочного покрытия и правильном построении системы покрытий обеспечивается надежная защита металлических конструкций [21].

В качестве защитных ЛКП для алюминиевых сплавов используют системы на основе эпоксидных, полиуретановых, а также кремнийорганических пленкообразующих. Наиболее широкое применение находят системы ЛКП на основе эпоксидных пленкообразующих. Они сочетают уровень свойств, обеспечивающих высокие адгезионные, физико-механические и защитные свойства [22].

Однако в условиях воздействия повышенных температур, которым подвержены изделия в процессе эксплуатации, необходимо применение более термостойких систем ЛКП, так как воздей-

ствие высоких температур приводит к закономерному снижению эксплуатационных характеристик покрытий [23].

В процессе эксплуатации авиационной техники происходят структурные превращения в защитных покрытиях. С целью установить влияние термического воздействия на защитные свойства покрытия проведена работа по исследованию структуры наиболее часто используемых покрытий для защиты от коррозии алюминиевых сплавов.

Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 17.1. «Экологически безопасные, плазменные электролитические покрытия для легких сплавов» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [24].

### Материалы и методы

Исследования проводили на образцах из литейного алюминиевого сплава системы Al–Si–Mg. На каждый вариант исследований использовали по 5 образцов и более.

Подготовку поверхности образцов перед нанесением неметаллических неорганических покрытий осуществляли путем полного погружения в водный раствор смеси азотной и плавиковой кислот на 15 мин при температуре 20–25°C.

Химическое оксидирование (Хим.Окс) образцов осуществляли в растворе на основе хромового ангидрида и калия кремнефтористого путем их полного погружения в раствор на 10 мин при температуре 25±2°C с последующей промывкой и сушкой.

Сернокислотное анодное оксидирование (Ан.Окс.нхр) образцов осуществляли в растворе 20%-ной серной кислоты в течение 30 мин при плотности тока не более 1 А/дм<sup>2</sup>. После анодного оксидирования покрытие наполняли в 5%-ном растворе бихромата калия.

Хромовокислотное анодное оксидирование (Ан.Окс.хр) осуществляли в растворе 30 г/л хромового ангидрида при температуре 40°C в течение 60 мин, поляризующее напряжение при этом не превышало 40 В.

В качестве ванн для нанесения покрытий использовали емкости из поливинилхлорида, оборудованные системой поддержания постоянной температуры раствора электролита.

При проведении испытаний особое внимание уделяли выбору систем ЛКП с учетом максимальной температуры эксплуатации.

Для проведения исследований выбраны следующие системы ЛКП на основе:

- эпоксидной грунтовки, модифицированной полисульфидным каучуком, и эпоксидно-полиамидной эмали – обладает высокими адгезионными, физико-механическими и защитными свойствами;
- кремнийорганических грунтовок и эмали – обладает высокой термостойкостью, а также высокими адгезионными и защитными свойствами;

– эпоксидной грунтовки, модифицированной полисульфидным каучуком, и фторполиуретановой эмали – обладает высокими адгезионными, физико-механическими и защитными свойствами, атмосферостойкостью и водостойкостью.

Имитацию эксплуатационного нагрева осуществляли в муфельной печи. Образцы с системой защитных покрытий выдерживали в течение 100 ч при температуре 200°C. Нагрев и охлаждение образцов осуществляли в закрытой печи для исключения влияния на материалы резкого перепада температур.

Исследование адгезии системы ЛКП осуществляли методом нанесения решетчатых надрезов на поверхности образцов в соответствии с ГОСТ 15140–78 (метод 2).

Исследование структуры покрытия проводили на поперечных шлифах образцов с покрытием методом растровой микроскопии на электронном микроскопе в режимах вторичных и обратноотраженных электронов. Следует отметить, что химическое оксидное покрытие является довольно тонким, поэтому изготовление качественного поперечного шлифа связано с определенными трудностями.

Электрохимические измерения проводили на универсальном потенциостате-гальваностате, оборудованном анализатором частотного отклика, в трехэлектродной ячейке при комнатной температуре в 3%-ном растворе NaCl. Поляризуемая площадь образца не превышала 5,48 см<sup>2</sup>. Ускоренные коррозионные испытания образцов из алюминиевого сплава с покрытиями проводили в соответствии с ГОСТ 9.401–91 в камере солевого тумана (КСТ) при постоянном распылении 5%-ного раствора хлористого натрия и температуре 35°C.

### Результаты и обсуждение

Неметаллическое неорганическое покрытие, формируемое на поверхности алюминиевого сплава, существенно влияет на защитную способность системы покрытий. В данной работе большое внимание уделено исследованию влияния термического воздействия на оксидные покрытия, особенно на их защитные свойства. С этой целью проведены ускоренные сравнительные испытания в КСТ образцов в исходном состоянии и после термического воздействия. Защитную способность неорганических покрытий на образцах оценивали по внешнему виду (рис. 1).

При осмотре поверхности образцов после 168 ч испытаний в КСТ у исходных образцов коррозионных поражений не наблюдается (рис. 1, а, в, д).

Термическое воздействие при температуре 200°C в течение 100 ч существенно снижает защитные свойства химического оксидирования и хромовокислотного анодного оксидирования. На образцах с покрытием Хим.Окс после термического воздействия на 100% поверхности наблюда-

ются продукты коррозии. На образцах с покрытием Ан.Окс.хр также наблюдается образование продуктов коррозии на поверхности (рис. 1, е), но их количество существенно меньше – не более 25% от всей площади. Образцы с сернокислотным анодным оксидированием в исходном состоянии (рис. 1, в) и после термического воздействия (рис. 1, з) после испытаний в КСТ не имели очагов коррозии.

При анализе результатов, полученных при исследовании структуры поверхности неорганических покрытий после термического воздействия, выявлены структурные изменения (рис. 2). На поверхности оксидной пленки Хим.Окс появились трещины по всей поверхности образца (рис. 2, б). На поверхности образца с покрытием Ан.Окс.хр в структуре оксидного слоя также образовались трещины, распространяющиеся по всей толщине оксидного слоя (рис. 2, е). Следует отметить, что у покрытия Ан.Окс.хр видимых изменений в структуре по сравнению с исходной не наблюдается (рис. 2, в, з).

Полученные результаты позволили сделать предположение, что изменения в структуре неметаллических покрытий могут быть связаны с химическими превращениями хроматных соединений, составляющих основу формируемых неметаллических неорганических покрытий Хим.Окс и Ан.Окс.хр. Структура покрытий преимущественно состоит из Al<sub>2</sub>(CrO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> и Cr(OH)<sub>3</sub> – предположительно, при воздействии высоких температур происходит разложение соединений. Гидроксид хрома разлагается на воду и оксид хрома:  $2\text{Cr}(\text{OH})_3 \rightarrow \text{Cr}_2\text{O}_3 + 3\text{H}_2\text{O}$ .

Хромат алюминия является более стабильным соединением, однако не следует исключать его разложение вплоть до отдельных оксидов. В связи с тем, что новые соединения имеют иную плотность и строение, структура покрытия претерпевает изменения, следствием чего является образование сквозных пор и трещин.

Что касается покрытия Ан.Окс.хр, то его химический состав состоит преимущественно из оксида алюминия. Данное химическое соединение является термически стабильным вплоть до температуры плавления алюминиевого сплава. Следует отметить, что после термического воздействия и экспозиции в КСТ образец имеет более бледный цвет (рис. 1, з) по сравнению с исходным (рис. 1, в).

По результатам исследований для дальнейших экспериментальных работ по изучению влияния длительного воздействия повышенной температуры на систему ЛКП в качестве подготовки поверхности использовали покрытие Ан.Окс.хр, поскольку оно является наиболее стабильным при воздействии высоких температур, а использование его в качестве подготовки поверхности не должно оказывать влияния на защитные свойства системы ЛКП.

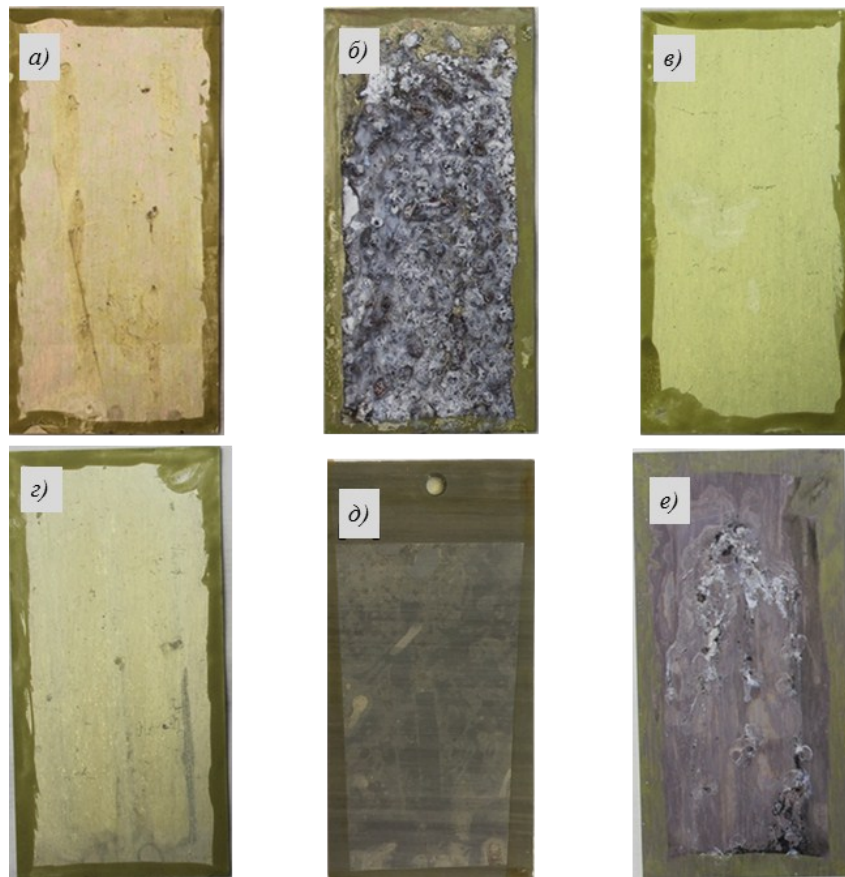


Рис. 1. Внешний вид после экспозиции в КСТ в течение 168 ч образцов из алюминиевого сплава системы Al-Si-Mg с подготовкой поверхности Хим.Окс (а, б), Ан.Окс.нхр (в, г) и Ан.Окс.хр (д, е) в исходном состоянии (а, в, д) и после термической обработки (б, г, е)

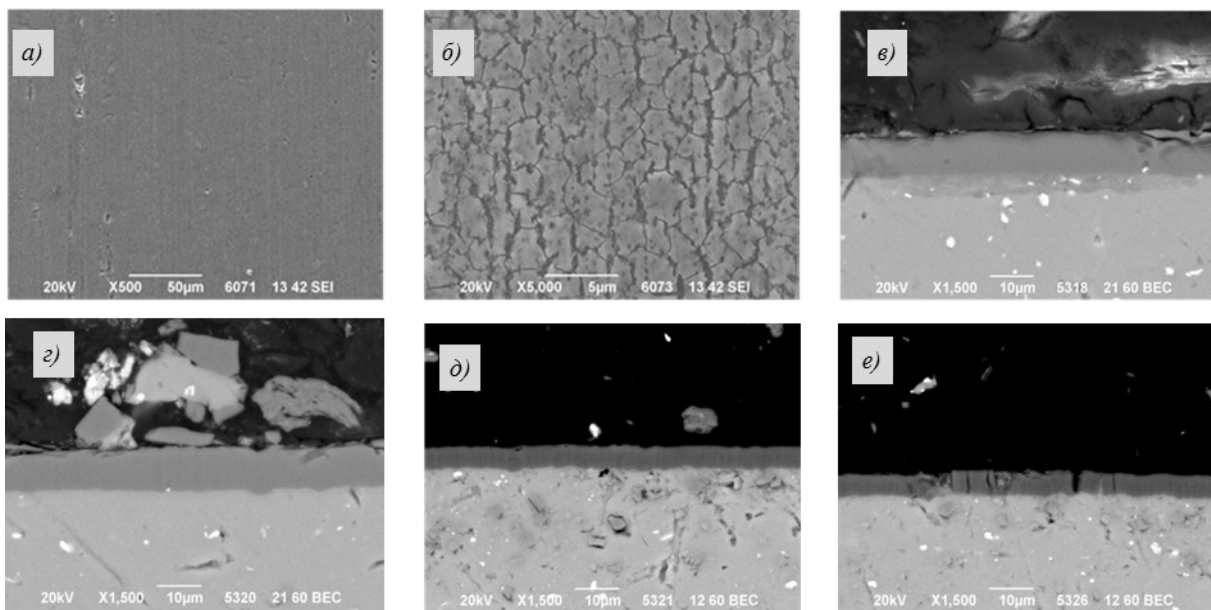


Рис. 2. Структура неметаллических неорганических покрытий на поверхности образца с Хим.Окс (а, б) и поперечных шлифов с подготовкой поверхности Ан.Окс.нхр (в, г) и Ан.Окс.хр (д, е) в исходном состоянии (а, в, д) и после термической обработки (б, г, е)

Влияние термического воздействия  
на электрохимические свойства системы защитных покрытий

Пленкообразующее, входящее в состав системы лакокрасочного покрытия	Значение модуля импеданса $ Z _{f=0,1 \text{ Гц}}$ , Ом/см <sup>2</sup>	
	в исходном состоянии	после термообработки
Кремнийорганическая грунтовка+ +кремнийорганическая эмаль	$3,07 \cdot 10^9$	$1,35 \cdot 10^{10}$
Эпоксидная грунтовка, модифицированная полисульфидным каучуком+ +эпоксидно-полиамидная эмаль	$2,20 \cdot 10^9$	$3,55 \cdot 10^5$
Эпоксидная грунтовка, модифицированная полисульфидным каучуком+ +фторполиуретановая эмаль	$1,74 \cdot 10^9$	$3,37 \cdot 10^7$

Проведены исследования адгезии систем ЛКП на основе эпоксидных, кремнийорганических, фторполиуретановых пленкообразующих в исходном состоянии и после термостарения при температуре 200°C в течение 100 ч. Из полученных результатов следует, что в исходном состоянии все исследуемые системы ЛКП имеют наивысшее значение адгезии 1 балл. Однако после термического старения у покрытия системы ЛКП на основе эпоксидного пленкообразующего адгезия снижается до балла 3. Остальные исследуемые системы ЛКП сохранили исходную адгезию 1 балл.

Оценку изменения защитных свойств системы ЛКП на образцах из алюминиевого сплава осуществляли электрохимическим методом (метод импедансной спектроскопии). Основным показателем защитных свойств при использовании данного метода являлся модуль импеданса при низких частотах  $|Z|_{f=0,1 \text{ Гц}}$ . Результаты экспериментов показали, что термическое воздействие оказывает влияние на защитные свойства ЛКП (см. таблицу).

Исследования, проведенные электрохимическим методом, позволили установить, что в исходном состоянии системы ЛКП имеют практически идентичные защитные свойства. После длительного термического старения образцов с покрытиями модуль импеданса в области низких частот существенно различается в зависимости от состава покрытий, входящих в систему ЛКП. Из результатов, приведенных в таблице, следует, что у систем ЛКП на основе эпоксидно-полиамидной и фторполиуретановой эмалей модуль импеданса в области низких частот существенно снижается на четыре и на два порядка соответственно. Это связано с термостойкостью пленкообразующих, входящих в состав эмалей, т. е. с их химической природой. По стойкости к термоокислительной деструкции эпоксидно-полиамидные и фторполиуретановые пленкообразующие уступают кремнийорганическим. При длительном термическом старении систем покрытий на основе эпоксидно-полиамидных и фторполиуретановых покрытий в присутствии кислорода воздуха начинают развиваться процессы термоокислительной деструкции, приводящие к разрыву химических связей, появлению отдельных радикалов, изменению химической и надмо-

лекулярной структуры. В результате происходит изменение цвета ЛКП, увеличение жесткости, снижение эластичности, возрастание внутренних напряжений, уменьшение толщины ЛКП и, как следствие, образование микро- и макротрещин, приводящих к снижению защитных свойств ЛКП.

Длительный нагрев системы ЛКП на основе кремнийорганического пленкообразующего при температуре 200°C не приводит к термоокислительной деструкции пленкообразующего, способствует перераспределению механических напряжений, возникающих в процессе формирования лакокрасочной пленки, релаксации сегментов макромолекул и получению более плотной структуры. При этом дополнительно происходят процессы структурообразования (сшивка) перераспределенных компонентов полимерного пленкообразующего. Образование более плотной структуры увеличивает защитную способность системы ЛКП на основе кремнийорганического пленкообразующего – значение модуля импеданса увеличивается на один порядок.

Для более детального представления о структурном изменении в системах ЛКП проведены исследования поперечных шлифов образцов с ЛКП (рис. 3).

Проведенный анализ покрытий в исходном состоянии и после термического воздействия при температуре 200°C в течение 100 ч подтвердил результаты, полученные при изучении влияния длительного нагрева на защитные свойства систем ЛКП электрохимическим методом (метод импедансной спектроскопии). Показано, что наиболее интенсивно протекает процесс термоокислительной деструкции в эпоксидно-полиамидной системе ЛКП (рис. 3, а, б).

Структура системы ЛКП на основе фторполиуретанового пленкообразующего при длительном нагреве также подвержена разрушению, но в значительно меньшей степени, чем предыдущая. Это связано с тем, что наличие атомов фтора в химической структуре фторполиуретанового пленкообразующего, способных экранировать углеродный скелет основной цепи, препятствует доступу кислорода и тормозит процесс термоокислительной деструкции (рис. 3, в, г).

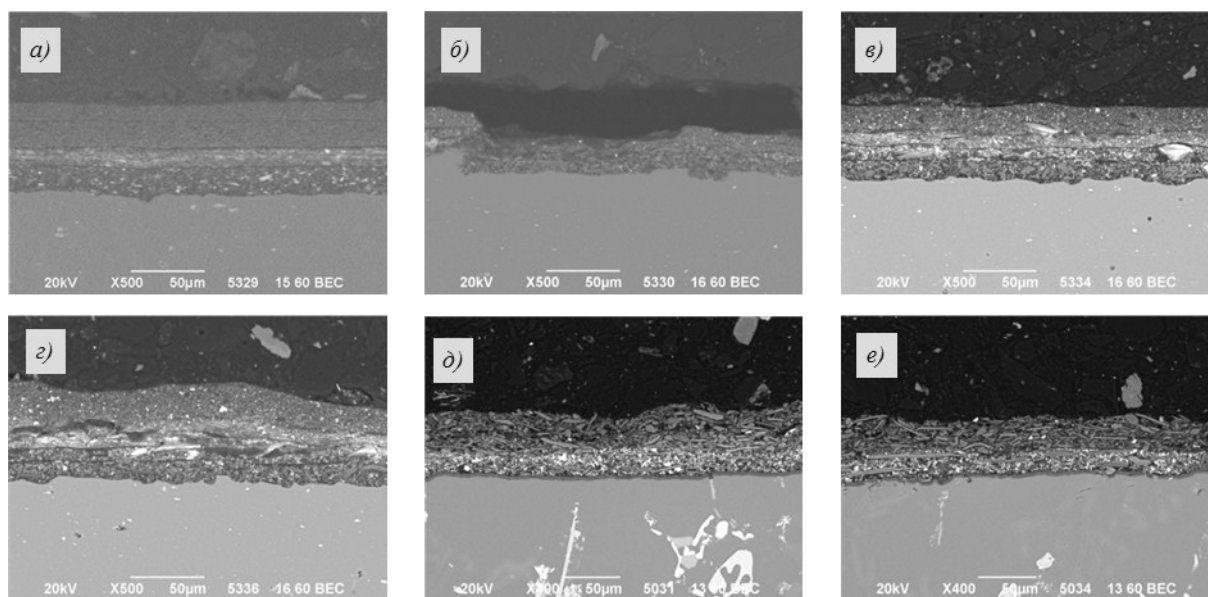


Рис. 3. Структура системы лакокрасочных покрытий на образцах из алюминиевого сплава системы Al-Si-Mg с подготовкой поверхности Ан.Окс.нхр на основе эпоксидного (а, б), фторполиуретанового (в, з) и кремнийорганического (д, е) пленкообразующих в исходном состоянии (а, в, д) и после термической обработки (б, з, е)

Структура системы ЛКП на основе кремнийорганического пленкообразующего как в исходном состоянии, так и после термического воздействия показала отсутствие изменений в покрытии (рис. 3 д, е).

#### Заключения

1. Для обеспечения высокого качества внешнего вида и защитных свойств неметаллических неорганических покрытий детали из литейного алюминиевого сплава системы Al-Si-Mg необходимо подвергать сернокислотному анодному оксидированию.

2. После термического воздействия на образцы с неметаллическими неорганическими покрытиями в течение 100 ч при 200°C наблюдается снижение защитных свойств у химического оксидного покрытия и у анодно-оксидного по-

крытия, нанесенного в растворе хромовой кислоты. Анодно-оксидное покрытие, сформированное в растворе серной кислоты, сохраняет свои защитные свойства.

3. После термического воздействия в течение 100 ч при 200°C ухудшается адгезия системы ЛКП на основе эпоксидно-полиамидного пленкообразующего. Адгезия систем ЛКП на основе кремнийорганического и фторполиуретанового пленкообразующих остается неизменной.

4. Термическое воздействие оказывает влияние на структуру систем ЛКП на основе эпоксидно-полиамидного и фторполиуретанового пленкообразующих и существенно снижает их защитные свойства. Система ЛКП на основе кремнийорганического пленкообразующего обеспечивает высокие защитные свойства после термического воздействия.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Каблов Е.Н., Солнцев С.С., Розененкова В.А., Миронова Н.А. Современные полифункциональные высокотемпературные покрытия для никелевых сплавов, уплотнительных металлических волокнистых материалов и бериллиевых сплавов // *Новости материаловедения*. Наука и техника: электрон. науч.-технич. журн. 2013. №1. Ст. 05. URL: <http://www.materialsnews.ru> (дата обращения: 08.02.2019).
3. Каблов Е.Н., Антипов В.В., Клочкова Ю.Ю. Алюминий-литиевые сплавы нового поколения и слоистые алюмокомпозиты на их основе // *Цветные металлы*. 2016. №8 (884). С. 86–91.
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. Качанов Е.Б., Щеголев Д.В., Черкасов В.В., Каримова С.А. Оценка соответствия материалов, используемых в конструкции двигателя, требованиям авиационных правил АПЗ3 в части воздействия условий окружающей среды // *Технология легких сплавов*. 2017. №2. С. 66–74.

6. Черкасов В.В., Щеголев Д.В., Каримова С.А. Сертификация авиационных металлических материалов планера с учетом влияния окружающих условий эксплуатации // *Технология легких сплавов*. 2017. №3. С. 81–87.
7. Краев И.Д., Попков О.В., Шульдешов Е.М., Сорокин А.Е., Юрков Г.Ю. Перспективы использования кремнийорганических полимеров при создании современных материалов и покрытий различных назначений // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн*. 2017. №12 (60). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 05.02.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-12-5-5.
8. Владимирский В.Н., Офицерова М.Г., Новикова Т.А., Каримова С.А., Павловская Т.Г. Технология ремонта ЛКП на внешней поверхности изделий АТ // *Авиационные материалы и технологии*. 2003. №2. С. 86–89.
9. Мовенко Д.А., Медведев П.Н., Смирнов А.А. Исследование изменения структуры теплозащитного покрытия после испытаний на жаростойкость // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн*. 2018. №11 (71). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 08.02.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-11-64-73.
10. Фомина М.А., Каримова С.А. Анализ коррозионного состояния материалов планера самолетов типа «Су» после длительных сроков эксплуатации // *Коррозия: материалы, защита*. 2014. №9. С. 20–24.
11. 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: 21.02.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-4-59-65.
12. 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: 08.02.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-7-2-2.
13. Critchlow G.W., Brewis D.M. Review of surface pretreatments for aluminium alloys // *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 1996. Vol. 16. Issue 4. P. 255–275.
14. Кузенков Ю.А., Олейник С.В., Каримова С.А., Павловская Т.Г. Бесхроматные конверсионные покрытия на алюминии сплаве 1370 // *Коррозия: материалы, защита*. 2011. №10. С. 42–47.
15. Каримова С.А., Тарараева Т.И., Павловская Т.Г., Золотарёва Л.А. Технология химического оксидирования алюминиевых сплавов с повышенными защитными свойствами // *Технология легких сплавов*. 2006. №4. С. 181–182.
16. Каримова С.А., Кутырев А.Е., Павловская Т.Г., Захаров К.Е. Низкотемпературное уплотнение анодно-оксидных покрытий на деталях из алюминиевых сплавов // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. №4 (33). С. 9–17. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-4-9-17.
17. Павловская Т.Г., Козлов И.А., Волков И.А., Захаров К.Е. Формирование твердых износостойких анодно-оксидных покрытий на деталях из литейных алюминиевых сплавов // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн*. 2015. №8. Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 14.02.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-8-4-4.
18. Каримова С.А., Павловская Т.Г., Петрова А.П. Подготовка поверхности алюминиевых сплавов с применением анодного оксидирования // *Клеи. Герметики. Технологии*. 2014. №1. С. 34–38.
19. Дуюнова В.А., Волкова Е.Ф., Уридия З.П., Трапезников А.В. Динамика развития магниевых и литейных алюминиевых сплавов // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. №S. С. 225–241. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-225-241.
20. Kozlova A.A., Kondrashov E.K., Deev I.S. Protective properties of paint and lacquer coatings based on a fluorine-containing film-forming material // *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*. 2016. Vol. 52. No. 7. P. 1181–1186.
21. Makhlof A.S.H. Handbook of Smart Coatings for Protection of Materials. Cambridge: Woodhead Publishing, 2014. 607 p.
22. Яковлев А.Д., Яковлев С.А. Лакокрасочные покрытия функционального назначения. СПб.: Химиздат, 2016. 272 с.
23. Михайлин Ю.А. Термоустойчивые полимеры и полимерные материалы. СПб.: Профессия, 2006. 624 с.
24. 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.