

УДК 621.793.164

ОСАЖДЕНИЕ АЛЮМИНИЕВОГО ПОКРЫТИЯ НА ИЗДЕЛИЯ ИЗ ВЫСОКОПРОЧНОЙ СТАЛИ МЕТОДОМ ХИМИЧЕСКОГО ОСАЖДЕНИЯ ИЗ ПАРОВОЙ ФАЗЫ АЛЮМООРГАНИЧЕСКОГО СОЕДИНЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ КАТАЛИТИЧЕСКОЙ ДОБАВКИ

© 2014 А. В. Пугин, И. И. Гафуров

Ульяновский научно-технологический центр
Всероссийского института авиационных материалов (УНТЦ ВИАМ)

Представлены результаты работы по нанесению из паровой фазы металлоорганического соединения алюминиевого покрытия на высокопрочную стальную подложку с применением каталитической добавки. Процесс проводился в герметичной камере с последующим улавливанием продуктов распада в азотной ловушке. Для снижения температуры осаждения плёнки алюминия из ТИБА методом МОСVD были выбраны 3 каталитические добавки: титан сек-бутоксид, тетрахлорид титана и три-п-пропиламин. Все эти вещества обладают заметной летучестью и термически устойчивы относительно температуры разложения ТИБА. В результате исследований был выбран титан сек-бутоксид, который снижает температуру разложения на 50 °С и наиболее близок к ТИБА по летучести и температуре разложения. Скорость осаждения пиролитического алюминиевого покрытия с каталитической добавкой увеличилась в 1,5 раза. Приводятся результаты применения каталитической добавки титан сек-бутоксид. Исследования показали, что процесс алюминирования высокопрочной стали возможен при использовании каталитической добавки титан сек-бутоксид. Процесс получения качественного алюминиевого покрытия из ТИБА не влияет на замедленное хрупкое разрушение (ЗХР) и статическое растяжение. Коррозионные испытания показали, что образцы с пиролитическим алюминиевым покрытием по защитным свойствам превышают цинковые покрытия. Потенциостатические исследования установили, что пиролитические алюминиевые покрытия по отношению к стали являются анодными. Прочность сцепления покрытий с основой соответствует требованиям ГОСТ, отслаивания и вздутия покрытий отсутствуют. Металлографическим анализом установлен размер кристаллитов («зёрен») пиролитических покрытий. Методом растровой электронной микроскопии проведено исследование поверхности покрытия.

Высокопрочная сталь, металлоорганическое соединение, сек-бутоксид титана, пиролитическое алюминиевое покрытие.

Введение

Для изделий космической и авиационной техники широко применяются разработанные в ВИАМ высокопрочные и коррозионностойкие стали, такие как 30ХГСН2А, ВКС-170, ВКС-210, 07Х16Н6, ВНС-2, ВНС-16, ВНС-5, ВНС-25 и др. 30ХГСН2А обладает повышенной прочностью, применяется практически во всех отечественных самолётах [1–4]. Учитывая её недостаточную коррозионную стойкость, необходимо применять защиту путём нанесения лакокрасочных, гальванических, пиролитических и других покрытий [5–7]. Наиболее целесообразными для защиты от коррозии высокопрочных сталей считаются покрытия, являющиеся анодными по отношению к ним: алюми-

ниевые [8], кадмиевые, цинковые [9–10]. Цинковые и кадмиевые покрытия в основном наносят гальваническим методом, а алюминиевые – и гальваническим, и пиролитическим.

Электролиты для гальванического алюминирования делятся на три группы: эфирногидридные, алкилбензолные, металлоорганические [11]. Недостатками алкилбензолного электролита являются сложность приготовления, чувствительность к влаге воздуха, высокие рабочие температуры, высокая стоимость компонентов, а также ухудшение механических свойств сталей из-за процесса наводороживания. В современной промышленности производство стали с алюминиевым покрытием осуществляется в основном следующими способами: совместной про-

каткой алюминия и стали или плакированием, сваркой взрывом, напылением, газотермическим алюминированием и погружением в расплав алюминия [12].

В рассматриваемом случае использован метод химического осаждения из паровой фазы металлоорганических соединений (МОС). Этот метод основан на химической реакции термораспада паровой фазы МОС, протекающей на поверхности изделия с формированием покрытия. Возможность получения алюминиевых покрытий при термическом разложении из триизобутилалюминия (ТИБА) предложил немецкий химик Карл Циглер. Применение пиролитического алюминиевого покрытия (ПАП) для защиты деталей из высокопрочной стали от коррозии исключает наводороживание стали, тем самым позволяет не проводить операцию обезводороживания деталей с пиролитическим алюминиевым покрытием. Метод получения алюминиевых плёнок из паровой фазы является экологически чистым и безопасным за счёт герметизации камеры установки и улавливания органических продуктов распада МОС [13–15]. Применение алюминирования методом МОСVD (metalorganic chemical vapor deposition) позволяет снизить класс экологической опасности по сравнению с процессами цинкования, кадмирования, хроматирования.

Методическая часть

При нанесении алюминиевого покрытия на детали из стали 30ХГСА использовалось алюмоорганическое соединение (АОС) ТИБА. Технологические режимы осаждения ПАП не подходят для высокопрочной стали 30ХГСН2А, так как температура разложения ТИБА превышает температуру отпуска высокопрочной стали на 50 °С. Для снижения температуры осаждения плёнки алюминия из ТИБА методом МОСVD были выбраны три каталитические добавки: титан сек-бутоксид, тетрахлорид титана и три-*n*-пропиламин. Все эти вещества обладают заметной летучестью и термически устой-

чивы относительно температуры разложения ТИБА. Был исследован процесс осаждения пиролитических плёнок алюминия из ТИБА в пяти вариантах:

а) в чистом виде;

б) в присутствии катализаторов:

- титан сек-бутоксид;

- тетрахлорид титана;

- три-*n*-пропиламина;

- смеси три-*n*-пропиламина-ТИБА и катализатора титан сек-бутоксид.

В каждом случае проводился поиск минимальной температуры осаждения плёнок алюминия. Результаты исследований показали, что каталитические добавки титан сек-бутоксид, тетрахлорид титана и три-*n*-пропиламин обеспечивают снижение температуры разложения ТИБА на 50 °С, но при использовании тетрахлорида титана могут возникнуть проблемы с коррозией металлических поверхностей аппаратуры, а комплекс ТИБА с три-*n*-пропиламином требует большого расхода реагента. Поэтому предпочтение следует отдать титан сек-бутоксиду, который наиболее близок к ТИБА по летучести и температуре разложения. В промышленном масштабе каталитические добавки не производятся. Поэтому для этого ННГУ была изготовлена экспериментальная партия образца кислородосодержащего титанорганического соединения титан сек-бутоксид.

Синтез титана сек-бутоксид состоит из трёх основных стадий:

- этерификации тетрахлорида титана сек-бутиловым спиртом;

- нейтрализации хлористого водорода аммиаком;

- отгонки избытка секбутилового спирта и фильтрования готового продукта.

Процесс осаждения ПАП из ТИБА в присутствии каталитических добавок проводился на установке в соответствии с общими требованиями к установкам осаждения плёнок МОС методом МОСVD. На рис. 1 приведена схема установки для осаждения ПАП из ТИБА в присутствии катализаторов.

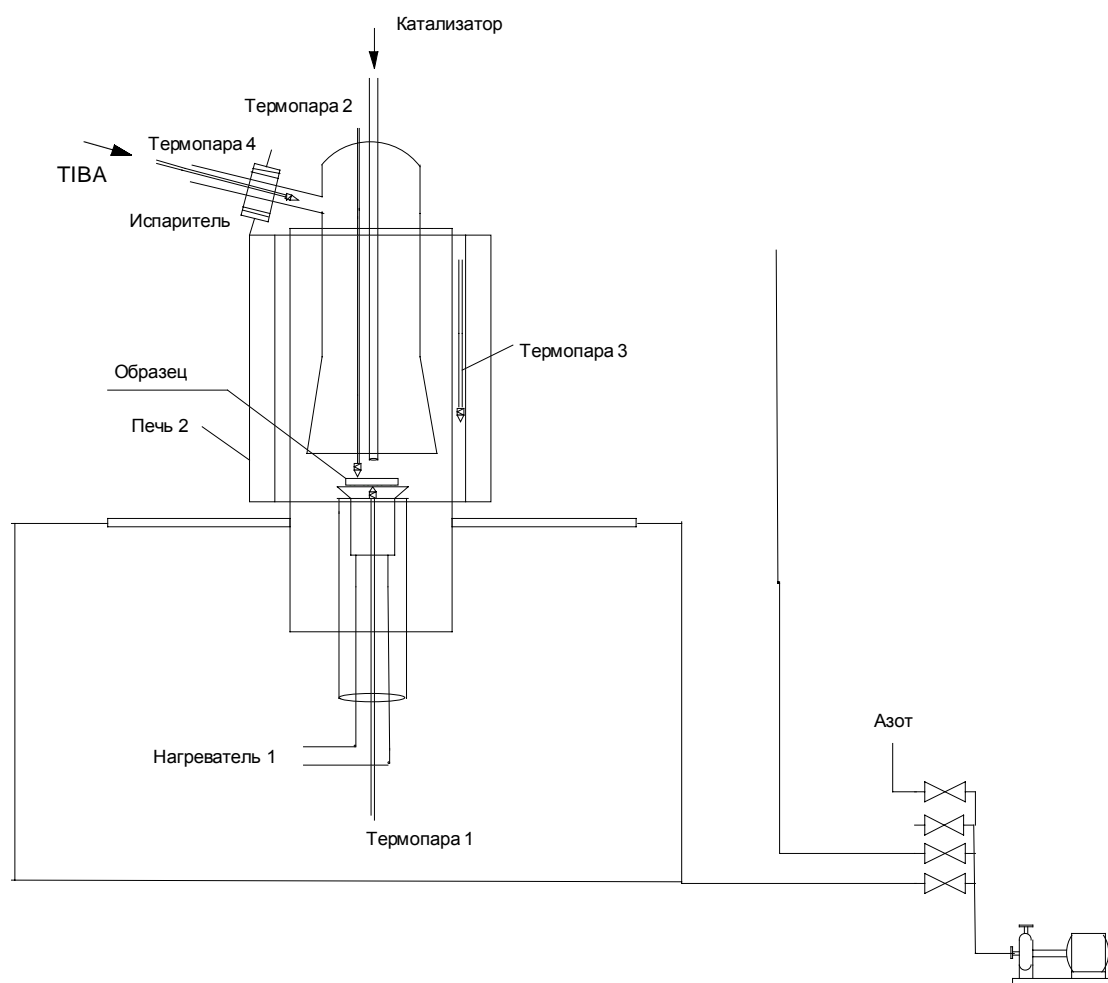


Рис. 1. Схема лабораторной установки пиролиза ТИБА совместно с каталитической добавкой

Установка для нанесения ПАП состоит из реакционной камеры; дозатора ТИБА и его испарителя; термостатированного испарителя катализатора диффузионного типа и трубопровода подачи катализатора; ТЭНа; азотной ловушки; вакуумного насоса. В азотной ловушке остаются все ненужные продукты распада. Установка снабжена вакуумным насосом, который производит постоянную откачку из камеры.

Процесс осаждения пиролитического алюминия из ТИБА с каталитической добавкой титан сек-бутоксид осуществляется следующим образом. ТИБА и сек-бутоксид титана в жидкой фазе из ампул через дозаторы подаются в испарители.

Из испарителя пары ТИБА и каталитической добавки поступают к поверхности подложки одновременно. Пары титан сек-бутоксид подаются к поверхности подложки по отдельному трубопроводу из термостатированного испарителя.

Для получения качественных ПАП требуется не выходить за температурный режим, соблюдать соотношение катализатора и ТИБА, а также их смешивание вблизи подложки.

Технологические режимы получения качественных плёнок алюминия из ТИБА могут заметно отличаться в зависимости от типа установок, поскольку формирование газодинамического потока вблизи подложки зависит от кон-

струкции реактора, температуры испарения МОС и каталитической добавки, скорости откачки вакуумной системы.

Результаты

Исследования показали, что процесс алюминирования высокопрочной стали типа 30ХГСН2А возможен при использовании каталитической добавки титан секбутоксида. Процесс получения качественного алюминиевого покрытия из ТИБА не

влияет на замедленное хрупкое разрушение (ЗХР) и статическое растяжение.

Влияние технологического процесса нанесения пиролитических алюминиевых покрытий на наводороживание стали определяли по изменению относительного сужения поперечного сечения (ψ , %) покрытых и непокрытых образцов.

Результаты испытаний на статическое растяжение (кратковременную прочность) приведены в табл. 1.

Таблица 1. Испытания на статическое растяжение (кратковременную прочность)

Вид покрытия	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Предел прочности σ_B , МПа	Относительное удлинение δ_5 , %	Относительное сужение ψ , %
Образцы без покрытия	1440	1730	13,5	54,5
Образцы с покрытием ПАП с каталитической добавкой	1420	1700	13,5	53,5

Результаты испытаний показали, что процесс осаждения пиролитических алюминиевых покрытий не изменяет механические (прочностные) характеристики высокопрочной стали. Следовательно, технологические параметры, а именно температура разложения ТИБА во время процесса нанесения ПАП, не изменяют механические свойства высокопрочной стали 30ХГСН2А. Результаты свидетельствуют о том, что технологический процесс осаждения пиролитических алюминиевых покрытий не наводороживает высокопрочную сталь 30ХГСН2А, так как относительное сужение поперечного сечения незначительно изменяется от исходного значения. Испытания на замедленное хрупкое разрушение образцов с пиролитическими алюминиевыми покрытиями ПАП в сравнении с контрольными образцами без покрытия показали, что образцы с покрытиями и без покрытий в течение 13 суток не разрушаются. Это свидетельствует о том, что процесс нанесения покрытия не влияет на охрупчиваемость стали 30ХГСН2А.

ПАП с каталитической добавкой имеет светло-серый цвет.

Прочность сцепления покрытий с основой соответствует требованиям ГОСТ 9.301, отслаивания и вздутия покрытий отсутствуют.

Ускоренные коррозионные испытания [16] в камере солевого тумана образцов из стали 30ХГСН2А с пиролитическими алюминиевыми покрытиями проводили по ГОСТ 9.308. Длительные испытания [17–19] были проведены в естественных климатических условиях г. Москвы (промышленная атмосфера, Московский центр климатических исследований – МЦКИ) и в тёплом влажном климате г. Геленджика (приморская атмосфера, Геленджикский центр климатических исследований – ГЦКИ). Экспозицию образцов проводили в течение 27 месяцев на стендах, ориентированных на юг, угол наклона плоскости образцов к земле составлял 45° , регистрацию внешних измерений поверхности образцов осуществляли согласно требованиям ГОСТ 9.909.

В качестве критериев оценки коррозионной стойкости образцов использовались:

- время до появления первых очагов коррозии стали;
- площадь поверхности образцов, поражённой коррозией;
- глубина и характер коррозионных поражений.

Испытания показали, что образцы с ПАП по защитным свойствам превышают цинковые покрытия.

Потенциостатические исследования установили, что пиролитические алюминиевые покрытия по отношению к стали 30ХГСН2А являются анодными. Измеренные токи коррозии пары «покрытие – подложка» показали, что сближение стационарных потенциалов пиролитического алюминиевого покрытия и стали 30ХГСН2А приводит к снижению токов коррозии.

Металлографическим анализом установлен размер кристаллитов («зёрен») пиролитических покрытий, кото-

рый составил $0,65 \pm 0,02$ мкм. Для всех образцов характерна равноосная форма зёрен.

Методом растровой электронной микроскопии проведено исследование поверхности покрытия. На рис. 2, 3 показана структура поверхности пиролитического алюминиевого покрытия при увеличении 1000 и 2500 соответственно.

Проведены исследования влияния технологического процесса осаждения алюминиевого пиролитического покрытия на прочностные характеристики образцов из стали 30ХГСН2А при статическом растяжении с ПАП в сравнении с образцами без покрытий. Испытания на статическое растяжение (кратковременную прочность) показали, что нагрев образца во время процесса нанесения ПАП не изменяет механические свойства стали 30ХГСН2А.

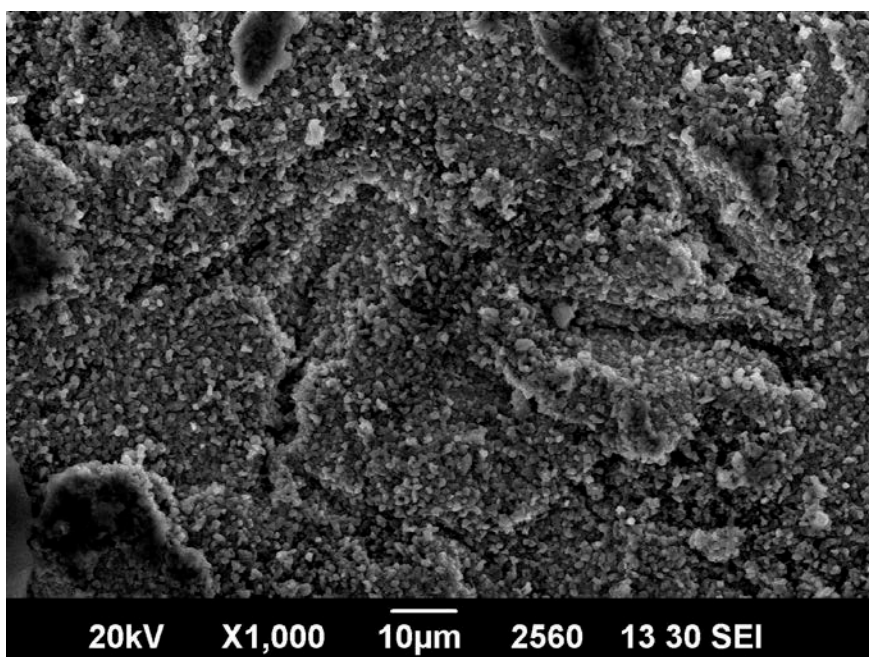


Рис. 2. Структура поверхности пиролитического алюминиевого покрытия при увеличении 1000

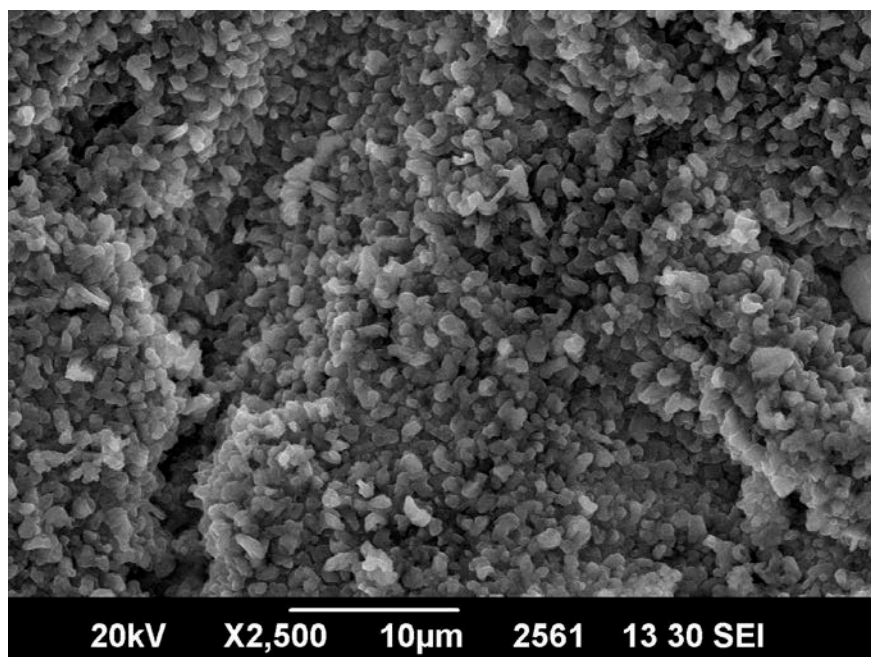


Рис. 3. Структура поверхности пиролитического алюминиевого покрытия при увеличении 2500

Заключение

Из трёх каталитических добавок выбран титан сек-бутоксид, который позволяет снизить температуру разложения ТИБА на 50 °С.

Скорость осаждения пиролитического алюминиевого покрытия с каталитической добавкой увеличилась в 1,5 раза.

Исследования показали возможность нанесения ПАП на сложно профилированные детали.

Пиролитическое алюминиевое покрытие может быть использовано для защиты от коррозии деталей из высокопрочных сталей в гражданской авиации и других отраслях машиностроения.

Библиографический список

1. История авиационного материаловедения. ВИАМ – 80 лет: годы и люди / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ. 2012. С. 133–142.
2. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // Авиационные материалы и технологии. 2012. № 5. С. 7–17.
3. Покровская Н.Г., Беляков Л.Н., Каблов Е.Н., Шалькевич А.Б., Петраков А.Ф., Жегина И.П., Остроухова Н.И. Высокопрочная конструкционная сталь: патент РФ 2155820; опубл. 27.05.1999.
4. Семенов В.Н., Каблов Е.Н., Качанов Е.Б., Петраков А.Ф., Козловская В.И., Бирман С.И., Батурина А.В., Шалькевич А.Б., Сысоева И.Б., Пестов Ю.А., Кукин Е.А., Харламов В.Г., Деркач Г.Г., Мовчан Ю.В., Каторгин Б.И., Чванов В.К., Головченко С.С., Сигаев В.А., Евмененко Ф.Ф. Высокопрочная коррозионно-стойкая сталь: патент РФ 2175684; опубл. 20.11.1998.
5. Каблов Е.Н. Коррозия или жизнь // Наука и жизнь. 2012. № 11. С. 16–21.
6. Солнцев С.С., Розененкова В.А., Миронова Н.А., Гаврилов С.В. Керамические покрытия для защиты высокопрочной стали при термической обработке // Авиационные материалы и технологии. 2011. № 4. С. 3–8.
7. Семенычев В.В., Салахова Р.К., Тюриков Е.В., Ильин В.А. Защитные и

функциональные гальванические покрытия, получаемые с применением наноразмерных частиц // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. № 5. С. 335–342.

8. Панарин А.В., Ильин В.А. Алюминиевые покрытия и способы их получения // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. №1. С. 20–24.

9. Проскуркин Е.В., Сухомлин Д.А. Анализ цинковых покрытий на основе их структурных и электрохимических свойств // *Коррозия: материалы, защита*. 2013. № 10. С. 30–38.

10. Проскуркин Е.В., Сухомлин Д.А. Мифы и реальность коррозионной стойкости цинковых покрытий, в частности, диффузионных цинковых покрытий // *Коррозия: материалы, защита*. 2010. № 5. С. 34–38.

11. Шавкунов С.П. Коррозионно-электрохимическое поведение алюминиевых гальванопокрытий, полученных из электролитов на основе ксилола // *Коррозия: материалы, защита*. 2011. № 5. С. 39–41.

12. Ковтунов А.И. Жидкофазное алюминирование стали // *Технология металлов*. 2011. № 2. С. 33–38.

13. Панарин А.В. Пиролитические карбидохромовые покрытия. Технология получения и свойства // *Авиационные материалы и технологии*. 2011. № 4. С. 14–18.

14. Сатаев Е.Е., Пугин А.В. Особенности технологии нанесения пиролитического алюминиевого покрытия с дополни-

тельной оксидацией // *Известия Самарского научного центра РАН*. 2012. Т. 14, № 4(3). С. 798–801.

15. Ильин В.А., Семенычев В.В., Панарин А.В., Тюриков Е.В., Сатаев Е.Е. Способ нанесения коррозионно-стойкого покрытия оксида алюминия на металлическое изделие: патент РФ 2430993; опубл. 10.10.2011; бюл. № 28.

16. Жиликов В.П., Каримова С.А., Лешко С.С., Чесноков Д.В. Исследование динамики коррозии алюминиевых сплавов при испытании в камере солевого тумана (КСТ) // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. № 4. С. 18–22.

17. Салахова Р.К. Коррозионная стойкость стали 30ХГСА с «трехвалентным» хромовым покрытием в естественных и искусственных средах // *Коррозия: материалы, защита*. 2012. № 1. С. 44–48.

18. Каримова С.А., Жиликов В.П., Михайлов А.А., Чесноков Д.В., Игонин Т.Н., Карпов В.А. Натурно-ускоренные испытания алюминиевых сплавов в условиях воздействия морской атмосферы // *Коррозия: материалы, защита*. 2012. № 10. С. 1–3.

19. Панченко Ю.М., Стрекалов П.В., Чесноков Д.В., Жирнов А.Д., Жиликов В.П., Каримова С.А., Тарараева Т.И. Зависимость коррозионной стойкости сплава Д16 от засоленности и метеопараметров приморской атмосферы // *Авиационные материалы и технологии*. 2010. № 3. С. 8–14.

Информация об авторах

Пугин Андрей Владимирович, инженер-технолог, Ульяновский научно-технологический центр Всероссийского института авиационных материалов. E-mail: untcviam@viam.ru. Область научных интересов: химическое осаждение покрытий из паровой фазы металлоорганических соединений.

Гафуров Ильдар Иршатович, инженер-технолог, Ульяновский научно-технологический центр Всероссийского института авиационных материалов. E-mail: untcviam@viam.ru. Область научных интересов: химическое осаждение покрытий из паровой фазы металлоорганических соединений.

**DEPOSITION OF ALUMINUM COATING ON ITEMS MADE
OF HIGH-STRENGTH STEEL BY CHEMICAL VAPOR DEPOSITION
OF AN ORGANOMETALLIC COMPOUND WITH THE USE
OF A CATALYTICAL ADDITIVE**

© 2014 A. V. Pugin, I. I. Gafurov

Ulyanovsk Science and Technology Centre of the All-Russian Institute
of Aviation Materials (USTC AIAM), Ulyanovsk, Russian Federation

The paper presents the results of work involving chemical vapor plating of an organometallic compound of aluminum coatings on a high-strength steel backplate using a catalytical additive. The process of coating deposition is carried out in a sealed chamber with subsequent capture of decomposition products in a nitrogen trap, which provides environmental safety of the process. The paper describes the choice of a catalytical additive among the following liquids: titanium sec-butoxide, titanium tetrachloride, three-n-propylamine used to reduce the deposition temperature. It was found that the deposition of pyrolysis-induced aluminum coatings using catalytical additives does not change the mechanical properties of high-strength steel. Corrosion tests have shown that the protective properties of samples with pyrolysis-induced aluminum coatings are superior to those of zinc coatings.

High-strength steel, organometallic compound, sec-butoxide titanium, pyrolytic aluminum coating.

References

1. History of aviation materials. VIAM - 80 years: years and people / Edited by E.N. Kablov. Moscow: VIAM. 2012. P. 133-142.
2. Kablov E.N. Strategic Areas of Developing Materials and Their Processing Technologies for the Period up to 2030 // Aviation materials and technology. 2012. No. S. P. 7-17. (In Russ.)
3. Pokrovskaja N.G., Beljakov L.N., Kablov E.N., Shalkevich A.B., Petrakov A.F., Zhegina I.P., Ostroukhova N.I. Vysokoprochnaya konstruktsionnaya stal' [High-strength structural steel]. Patent RF, No. 2155820, 1999 (Publ. 27.05.1999).
4. Semenov V.N., Kablov E.N., Kachanov E.B., Petrakov A.F., Kozlovskaja V.I., Bearman S.I., Buchanan A.V., Shalkevich A.B., Sysoev I.B., Pestov Y.A., Kykin E.A., Kharlamov V.G., Derkach G.G., Movchan Y.V., Katorgin B.I., Chvanov V.K., Golovchenko S.S., Sigayev V.A., Evmenenko F.F. Vysokoprochnaya korrozionno-stoykaya stal' [High-strength corrosion-resistant steel]. Patent RF, no. 2175684, 1998 (Publ. 20.11.1998).
5. Kablov E.N. Corrosion or life // Nauka i zhizn'. 2012. No.11. P. 16-21. (In Russ.)
6. Solntcev S.S., Rozenenkova V.A., Mironova N., Gavrilov S.V. Ceramic coatings for the protection of high-strength steels during the heat treatment // Aviation materials and technology. 2011. No. 4. P. 3-8. (In Russ.)
7. Semenychev V.V., Salakhova R.K., Tyurikov E.V., Ilyin V.A. Protective and Functional Galvanic Coatings, Produced with the use of Nanosize Particles // Aviation materials and technology. 2012. No. S. P. 335-342. (In Russ.)
8. Panarin A.V., Ilyin V.A. Aluminium coatings and methods for their preparation // Aviation materials and technology. 2014. No. 1. P. 20-24. (In Russ.)
9. Proskurkin E.V., Suhomlin D.A. Analysis of zinc coatings on the basis of their structural and electrochemical properties // Korroziya: Materialy, Zashchita. 2013. No.10. P. 30-38. (In Russ.)
10. Proskurkin E.V., Suhomlin D.A. Myths and reality of corrosion resistance of zinc coatings, in particular, diffusion zinc coatings // Korroziya: Materialy, Zashchita. 2010. No.5. P. 34-38. (In Russ.)
11. Shavkunov S.P. Corrosion - electrochemical behavior of aluminum electro-

plating obtained from electrolytes based on xylene // *Korroziya: Materialy, Zashchita*. 2011. No.5. P. 39-41. (In Russ.)

12. Kovtunov A.I. Liquid-phase steel aluminizing // *Tekhnologiya metallov*. 2011. No. 2. P. 33-38. (In Russ.)

13. Panarin A.V. Pyrolytic chromium carbide coatings. Production technology and properties // *Aviation materials and technology*. 2011. No. 4. P. 14-18. (In Russ.)

14. Sataev E.E., Pugin A. Features of technology application pyrolytic aluminum cover with additional oxidation // *Izvestiya samarskogo nauchnogo tsentra RAN*. 2012. V. 14, no. 4(3). P. 798-801. (In Russ.)

15. Ilin V.A., Semenychev V.V., Panarin A.V., Tjurikov E.V., Sataev E.E. Sposob naneseniya korrozionno-stoykogo pokrytiya oksida alyuminiya na metallicheskie izdelie [Method of applying a corrosion-resistant aluminum oxide coating of on a metal item]. Patent RF, No. 2430993, 2010 (Publ. 10.10.2011, bull. no. 28).

16. Zhilikov V.P., Karimov S.A., Lesco S.S., Chesnokov D.V. Study of alu-

minium alloy corrosion dynamics in the salt-spray chamber (SSC) // *Aviation materials and technology*. 2012. No. 4. P. 18-22. (In Russ.)

17. Salakhova R.K. Corrosion resistance of 30KhGSA steel with a “trivalent” chromium coating in natural and artificial environments // *Korroziya: Materialy, Zashchita*. 2012. No. 1. P. 44-48. (In Russ.)

18. Karimov S.A., Zhilikov V.P., Mikhailov A.A., Chesnokov D.V., Igonin T.N., Karpov V.A. Full-scale tests of aluminum alloys under the impact of marine atmosphere // *Korroziya: Materialy, Zashchita*. 2012. No. 10. P. 1-3. (In Russ.)

19. Panchenko Y.M, Strelalov P.V., Chesnokov D.V., Zhirnov A.D., Zhilikov V.P., Karimova S.A., Tararaeva T.I. Relationship between D16 alloy corrosion resistance and seaside atmosphere salt spraying and meteoroparameters // *Aviation materials and technology*. 2010. No. 3. P. 8-14. (In Russ.)

About the authors

Pugin Andrey Vladimirovich, production engineer, Ulyanovsk Science and Technology Center of the All-Russian Institute of Aviation Materials, Ulyanovsk, Russian Federation. E-mail: untcviam@viam.ru. Area of Research: organometallic chemical vapor deposition.

Gafurov Ildar Irshatovich, production engineer, Ulyanovsk Science and Technology Center of the All-Russian Institute of Aviation Materials, Ulyanovsk, Russian Federation. E-mail: untcviam@viam.ru. Area of Research: organometallic chemical vapor deposition.