

ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩЕЕ КОРРОЗИОННО-СТОЙКОЕ ПОКРЫТИЕ НА ОСНОВЕ НИКЕЛЯ ДЛЯ КОНТАКТОВ СИСТЕМЫ АКУСТИЧЕСКИХ ПОДВОДНЫХ МАЯКОВ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ

© 2018

- Л. А. Кривина** старший научный сотрудник;
Институт проблем машиностроения РАН – филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук», г. Нижний Новгород; npktribonika@yandex.ru
- И. Н. Царёва** кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник;
Институт проблем машиностроения РАН – филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук», г. Нижний Новгород; npktribonika@yandex.ru
- Ю. П. Тарасенко** кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией;
Институт проблем машиностроения РАН – филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук», г. Нижний Новгород; npktribonika@yandex.ru
- Я. А. Фель** кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник;
Институт проблем машиностроения РАН – филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук», г. Нижний Новгород; npktribonika@yandex.ru
- Ю. К. Леванов** главный инженер;
Научно-промышленный центр «Трибоника», г. Нижний Новгород; tribonikaplant@yandex.ru

Целью работы являлась разработка технологических методов повышения работоспособности и надёжности электрического контакта, изготовленного из титанового сплава ВТЗ-1, который входит в конструкцию подводных акустических маяков (ПАМ), эксплуатируемых на воздушных судах различных авиакомпаний. Решение задачи увеличения ресурса ПАМ (до 90 дней) напрямую связано с повышением стабильности электрохимических характеристик контакта. Для обеспечения стабильного поведения электрического потенциала (не более 0,5 В) на контакте предложен метод газодинамического напыления защитного покрытия на основе никеля повышенной толщины. Опробованы однослойные и двухслойные покрытия, полученные из разных марок порошковых смесей. Изучены закономерности процесса электрохимического пробоя и пассивации исследуемых защитных покрытий в ходе сравнительных кратковременных (в течение 10 дней) испытаний. По результатам испытаний выбрано однослойное газодинамическое покрытие состава (Ni + Al₂O₃), сформированное из порошковой смеси марки N3-00-02. Исследованы микроструктура, фазовый состав, микротвёрдость, пористость и адгезионная прочность защитного покрытия на основе Ni. Проведены электрохимические испытания электрического контакта с исследуемым покрытием в среде морской воды в зависимости от временного фактора. Повышенная толщина покрытия в сочетании с низкой открытой пористостью и высокой адгезионной прочностью обуславливает стабильное поведение электрического потенциала при нанесении его на рабочую поверхность контактов из титанового сплава ВТЗ-1 и обеспечивает их надёжную электрохимическую защиту в среде морской воды в течение 90 дней.

Воздушное судно; подводный акустический маяк; стабильный электрический потенциал; электрический контакт из сплава ВТЗ-1; метод газодинамического напыления; порошковая смесь; защитное покрытие на основе никеля повышенной толщины.

Цитирование: Кривина Л.А., Царёва И.Н., Тарасенко Ю.П., Фель Я.А., Леванов Ю.К. Электропроводящее коррозионно-стойкое покрытие на основе никеля для контактов системы акустических подводных маяков воздушных судов // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2018. Т. 17, № 3. С. 158-166. DOI: 10.18287/2541-7533-2018-17-3-158-166

Введение

Электрический контакт, изготовленный из сплава ВТЗ-1 (ПИЛТ), входит в конструкцию подводных акустических маяков (ПАМ), эксплуатирующихся во всех климатических зонах на воздушных судах различных авиакомпаний как отечественных, так и зарубежных. Возросшие требования к продолжительности работы ПАМ (до 90 дней), определяют повышение стабильности физико-химических характеристик контакта.

Целью работы являлось повышение работоспособности и надёжности при эксплуатации контакта ПИЛТ за счёт модификации его рабочей поверхности методом газодинамического напыления, который основан на распылении порошковых смесей сжатым воздухом и используется для пескоструйной обработки и нанесения защитных покрытий на поверхность металлических деталей [1-3]. Напыление покрытий осуществлялось на установке «Димет-403», в которой на выходе сверхзвукового сопла формируется высокоскоростная струя смеси горячего воздуха с порошком. Чистые металлические и керамические поверхности деталей обычно не требуют специальной подготовки. Однако при нанесении покрытий на стали и титановые сплавы с целью очистки поверхности, удаления оксидной плёнки и увеличения адгезионной прочности покрытия с подложкой (за счёт создания шероховатости) желательно проводить предварительную пескоструйную обработку. Газодинамический метод позволяет осуществлять предварительную абразивную подготовку поверхности изделий с помощью установки «Димет-403». Достоинством данного метода напыления является возможность использования порошковых смесей с добавками частиц корунда, позволяющая совмещать в одном технологическом цикле процесс нанесения с абразивной подготовкой поверхности.

Объекты и методика исследований

Объектами исследований являлись контакт ПИЛТ с полукруглым выступом из сплава ВТЗ-1 (рис. 1), а также контакты с модифицированной рабочей поверхностью. На установке «Димет-403» методом газодинамического напыления наносили однослойные и двухслойные защитные покрытия из следующих порошковых смесей: марка N3-00-02 (никель – 57%, оксид алюминия Al_2O_3 – 43%); марка С-01-01 (медь – 57%, оксид алюминия Al_2O_3 – 43%); марка Р-01-01 (свинец – 57%, оксид алюминия Al_2O_3 – 43%).

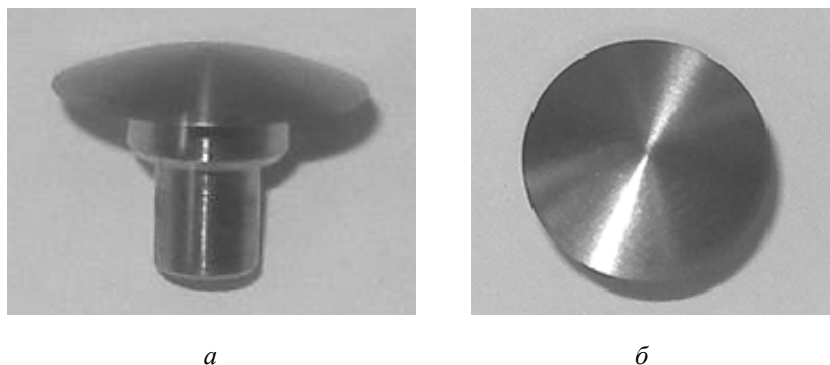


Рис. 1. Внешний вид контакта ПИЛТ из сплава ВТЗ-1 в исходном состоянии: вид сбоку (а), рабочая поверхность (б)

Поставлена задача изучения закономерностей процесса электрохимического пробоа и пассивации исследуемых защитных покрытий в ходе электрических испытаний. Согласно техническим требованиям на данную деталь падение напряжения в цепи, образованной образцом площадью 1 см^2 , проводящей средой на основе морской воды,

корпусом из титанового сплава ВТ3-1 при протекании тока величиной 50 мкА должно быть не более 0,5 В (рис. 2).

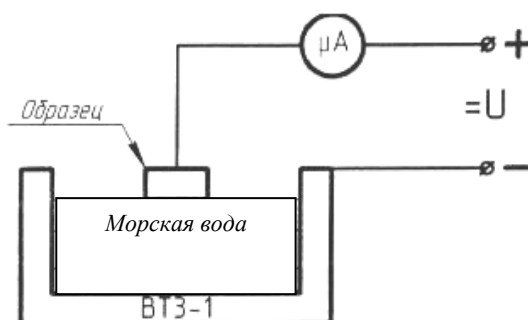


Рис. 2. Схема электрической цепи

Для проведения экспериментальных электрохимических испытаний была сконструирована лабораторная установка. Падение напряжения на контакте в проводящей среде проводили в зависимости от временного фактора. В течение одного рабочего дня значение падения напряжения фиксировали с промежутком 2-3 часа и определяли среднее значение.

Фазовый состав покрытий исследовали методом рентгеноструктурного анализа на дифрактометре «Дрон-3М» с применением $\text{Cu-K}\alpha$ -излучения в геометрии по Бреггу-Брентано.

Металлографические исследования проводили на растровом электронном микроскопе «VEGA//TESCAN».

Микротвёрдость измеряли на микротвердомере ПМТ-3 по ГОСТ 9450-76.

Пористость покрытия определяли методом гидростатического взвешивания на аналитических весах VIBRA по ГОСТ 18898-89.

Адгезионную прочность покрытий оценивали на поперечных шлифах методом микроиндентирования на приборе ПМТ-3 при нагрузке на индентор 2 Н.

Результаты исследований

На рабочую выпуклую часть контакта наносили следующие варианты однослойных и многослойных защитных покрытий:

- газодинамическое покрытие на основе никеля (Ni);
- газодинамическое покрытие на основе никеля и меди (50%Ni + 50%Cu);
- двухслойное газодинамическое покрытие (50%Ni + 50%Cu) + Ni;
- двухслойное газодинамическое покрытие (50%Ni + 50%Cu) + Pb.

На рис. 3 приведены кривые падения напряжения контактов с вышеуказанными покрытиями, а также для сравнения кривая для нового контакта из сплава ВТ3-1 в среде на основе морской воды в зависимости от временного фактора.

В ходе электрохимических испытаний в течение 10 дней кривые падения напряжения на контактах с анализируемыми покрытиями находятся ниже нормированного уровня ($U = 0,5 \text{ В}$) (рис. 3). После испытаний на рабочей поверхности контактов со всеми покрытиями, содержащими медь, были обнаружены толстые блестящие отложения голубовато-зеленоватого цвета, что является результатом электрохимической реакции с выделением медного купороса.

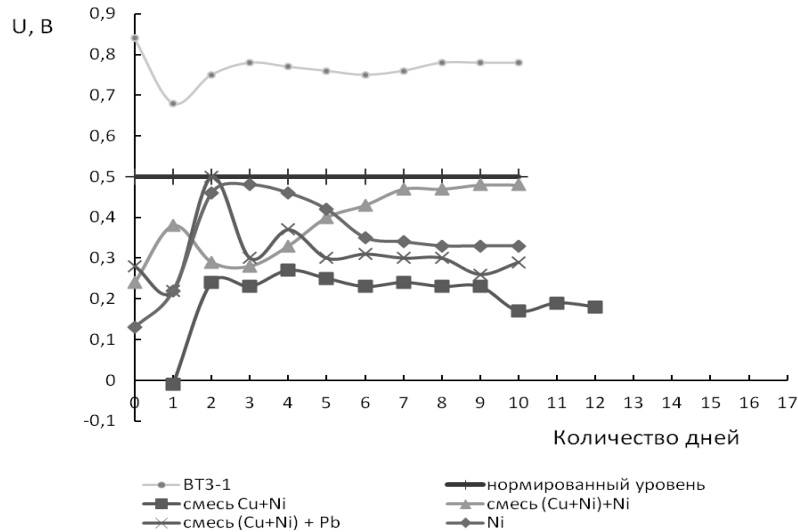


Рис. 3. Падение напряжения на контактах с различными газодинамическими покрытиями в зависимости от временного фактора

По основным критериям отбора (значение падения напряжения и внешний вид в ходе электрохимических испытаний) для дальнейшего более детального исследования было выбрано однослойное газодинамическое порошковое покрытие на основе никеля.

Порошковая смесь марки N3-00-02 состояла из никеля (57%) и оксида алюминия Al_2O_3 (43%). Частицы корунда, содержащиеся в порошковой смеси, предназначены для бомбардировки поверхности детали с целью её очистки и формирования выраженного рельефа для улучшения сцепления покрытия с основным материалом. Дериватограмма порошковой смеси марки N3-00-02, использованной при нанесении защитного покрытия, приведена на рис. 4. На дифференциальной сканирующей кривой при $800^{\circ}C$ имеется плавно возрастающий максимум, обусловленный протеканием процессов окисления с образованием оксида NiO при нагреве в воздушной среде.

Методом рентгеноструктурного анализа установлен двухфазный состав формируемого покрытия: Ni и $\alpha-Al_2O_3$ (корунд) (табл. 1). Основной фазой в покрытии является никель. Так как при газодинамическом напылении температура нагрева не превышает $800^{\circ}C$, то окисления никеля не происходит.

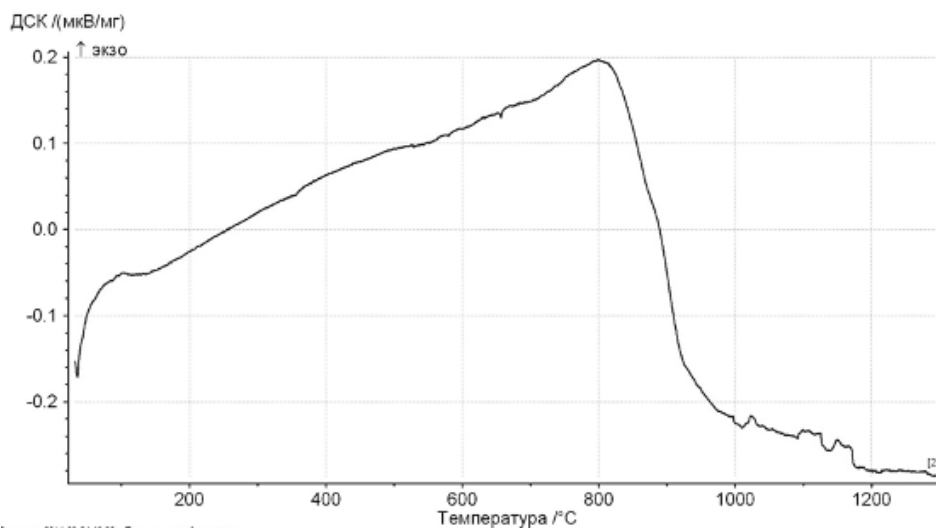


Рис. 4. Дериватографическая сканирующая кривая порошковой смеси N3-00-02

Таблица 1. Данные рентгеноструктурного анализа порошковой смеси N3-00-02 и формируемого из неё методом газодинамического напыления покрытия на основе никеля

Материал	2θ , град	d , нм	I , отн.ед.	(hkl)	фаза
Порошковая смесь N3-00-02	35,40	0,2536	0,10	(114)	α -Al ₂ O ₃
	43,50	0,2083	0,13	(110)	α -Al ₂ O ₃
	44,70	0,2029	1	(111)	Ni
	52,00	0,1760	0,45	(002)	Ni
	52,70	0,1776	0,05	(024)	α -Al ₂ O ₃
	57,70	0,1599	0,12	(122)	α -Al ₂ O ₃
	68,45	0,1372	0,05	(214)	α -Al ₂ O ₃
	76,60	0,1243	0,22	(022)	Ni
	92,90	0,1063	0,17	(113)	Ni
Покрытие на основе никеля	99,60	0,1009	0,07	(222)	Ni
	35,50	0,2536	0,10	(114)	α -Al ₂ O ₃
	43,55	0,2083	0,13	(110)	α -Al ₂ O ₃
	44,70	0,2029	1	(111)	Ni
	52,00	0,1760	0,45	(002)	Ni
	52,70	0,1776	0,05	(024)	α -Al ₂ O ₃
	57,70	0,1599	0,12	(122)	α -Al ₂ O ₃
	68,55	0,1372	0,05	(214)	α -Al ₂ O ₃
	76,60	0,1243	0,22	(022)	Ni
92,90	0,1063	0,17	(113)	Ni	
99,60	0,1009	0,07	(222)	Ni	

На рис. 5 приведена фотография внешнего вида контакта ПИЛТ с нанесённым на рабочую поверхность покрытием на основе никеля.

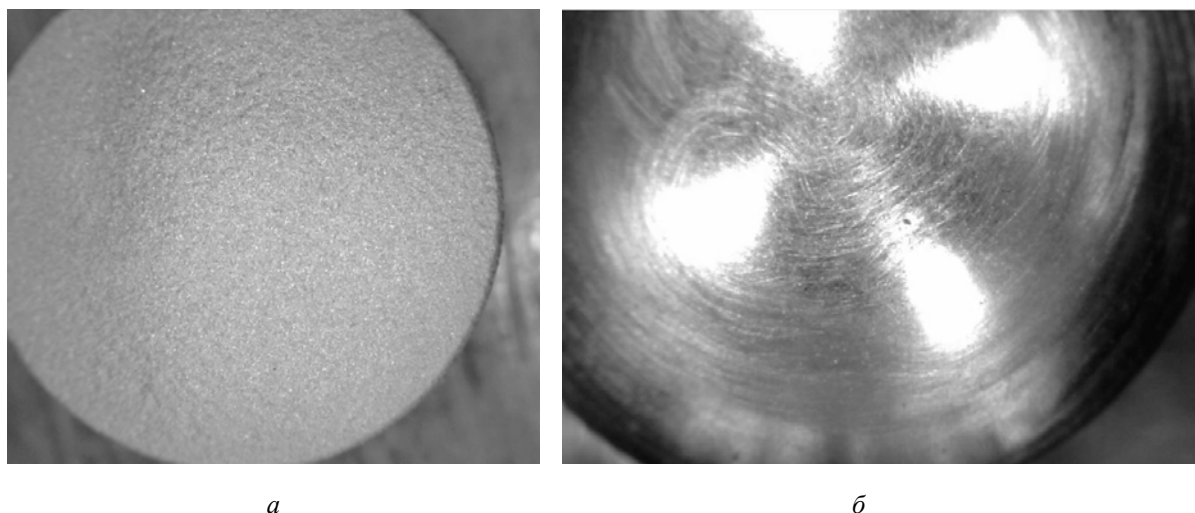


Рис. 5. Внешний вид контакта ПИЛТ из сплава ВТЗ-1 с газодинамическим покрытием на основе Ni после напыления (а) и после последующей механической обработки (б)

На рис. 6 приведены фотографии поперечных сечений контакта с покрытием, нанесённым на рабочую поверхность (а), и самого покрытия Ni (б).

Электронно-микроскопические исследования показали, что при напылении порошковой смеси на поверхность образца из титанового сплава ВТЗ-1 формируется покрытие на основе никеля с включениями корунда тёмного цвета (рис. 6, б). При газодинамическом напылении большая часть твёрдых частиц корунда, обладающих высокой кинетической энергией, испытывает упругое соударение с поверхностью, но некоторая

доля частиц всё же попадает на подложку. Поэтому включения Al_2O_3 присутствуют не только в покрытии, но и на границе раздела «покрытие-основа» и в приповерхностном слое обрабатываемого материала (рис. 6, б; 7, а). Исследование распределения элементного состава показало в местах включений синхронный всплеск рефлексов алюминия и кислорода (рис. 7, б).

В исходном состоянии покрытие никеля имеет 5-й класс шероховатости рабочей поверхности, после механической доводки поверхности – 7-й класс шероховатости. Толщина газодинамического покрытия Ni ~ 400 мкм (рис. 6, б). Среднее значение микротвёрдости никелевой матрицы покрытия составляет $H_{200} = 2$ ГПа.

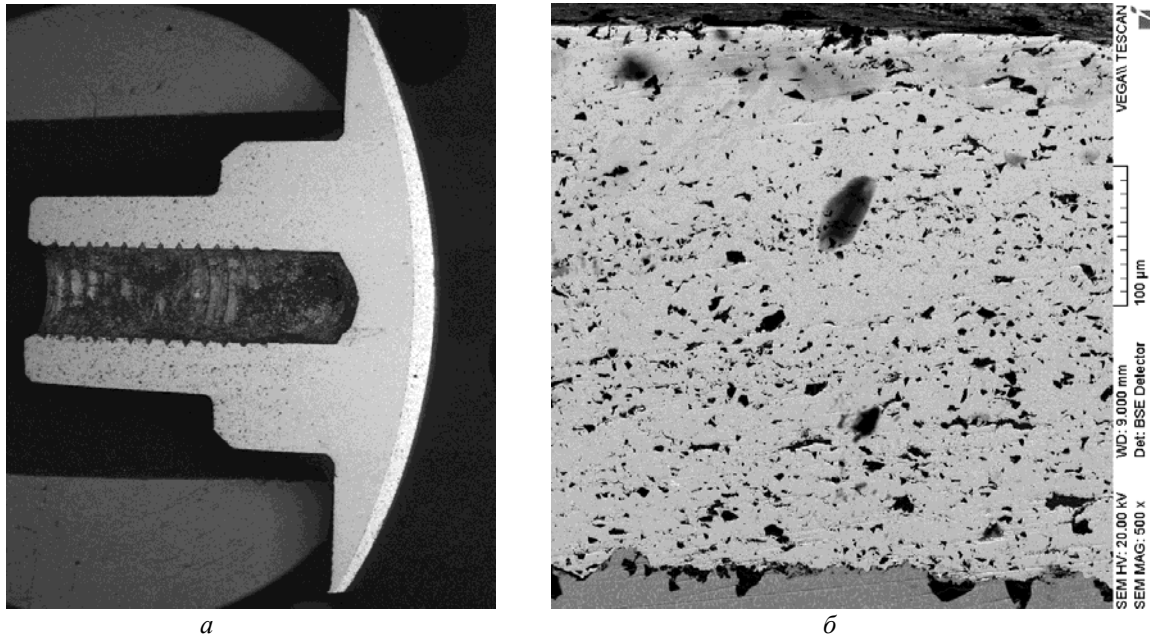


Рис. 6. Электрический контакт в поперечном разрезе с газодинамическим покрытием Ni на рабочей поверхности (x20) (а); поперечное сечение защитного покрытия (x20000) (б)

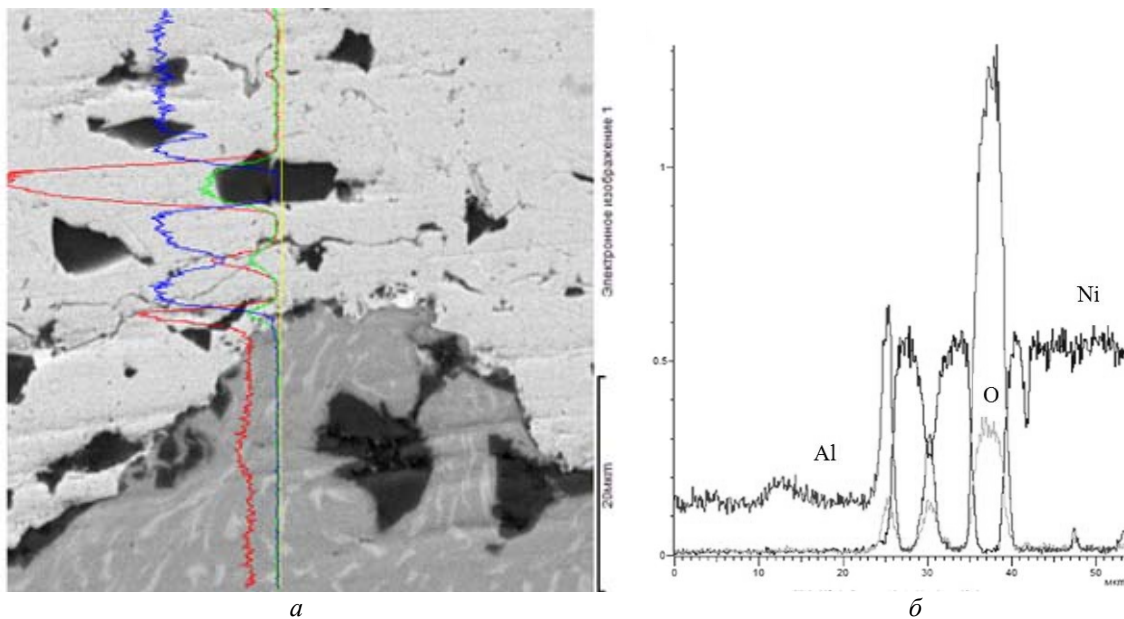


Рис. 7. Микроструктура (а) и распределение элементного состава (б) в поперечном сечении защитного покрытия на основе никеля

Измерения пористости показали, что общая пористость никелевого покрытия составляет 17,7%, в том числе закрытая пористость – 13,12%, открытая – 4,58%. Следует отметить, что доля открытой пористости в общей пористости невелика, что является важным с точки зрения обеспечения защитных свойств, так как открытые поры способствуют проникновению агрессивной среды во внутренние слои покрытия.

Испытания адгезионной прочности защитного покрытия никеля методом микроиндентирования показали удовлетворительную адгезию с подложкой. На границе раздела «покрытие-основа» нет отслоений и микротрещин (рис. 8).

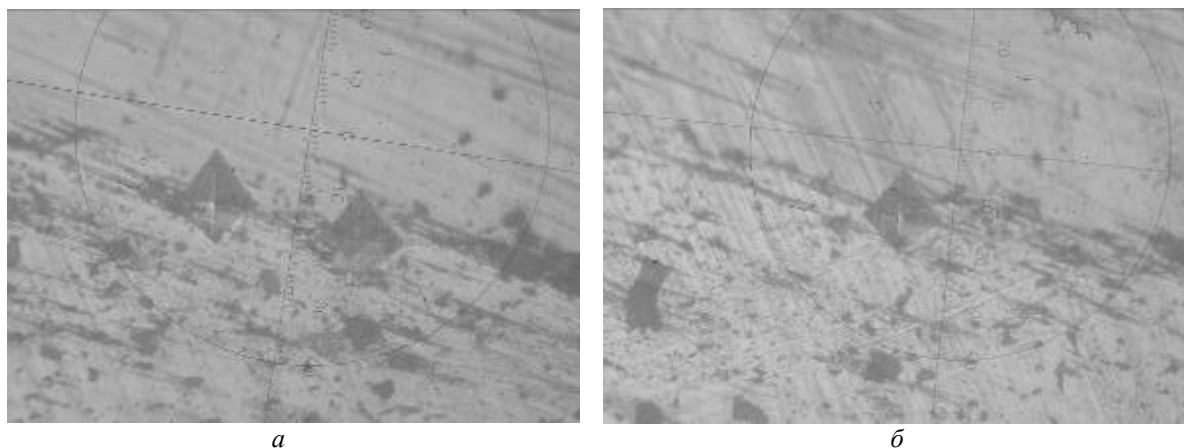


Рис. 8. Картины микроиндентирования в разных зонах (а, б) на границе раздела «покрытие-основа» (X400)

На рис. 9 приведены зависимости падения напряжения на контактах за 90 дней испытаний. После двадцати дней испытаний кривые падения напряжения выходят на постоянный уровень: $U \sim 0,75$ – для исходного контакта (в 1,5 раза выше нормированного уровня падения напряжения) и $U \sim 0,3$ – для контакта с покрытием на основе Ni (в 1,7 раза ниже нормированного уровня падения напряжения).

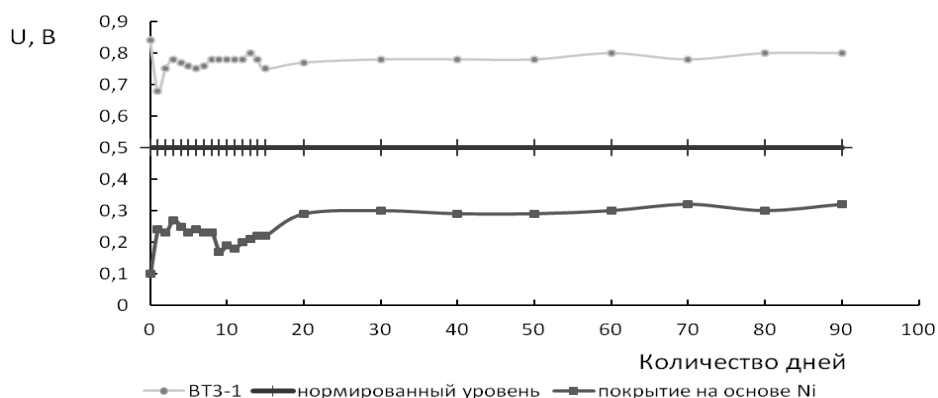


Рис. 9. Падение напряжения на контактах с покрытием на основе Ni в зависимости от временного фактора

Из анализа полученных результатов исследований установлено, что защитное газодинамическое покрытие на основе никеля, которое формирует слой на поверхности электрических контактов из титанового сплава VT3-1, обеспечивает стабильный электрический потенциал (не выше 0,5 В) на протяжении 90 суток и высокую коррозионную стойкость в среде морской воды.

Заключение

Методом газодинамического напыления разработано защитное покрытие на основе никеля с двухфазным составом (никель + корунд). Повышенная толщина покрытия (~400 мкм) в сочетании с низкой открытой пористостью ~4,6 % и высокой адгезионной прочностью обуславливает стабильное поведение электрического потенциала (не более 0,5 В) при нанесении его на рабочую поверхность электрических контактов из сплава ВТЗ-1 и обеспечивает их надёжную электрохимическую защиту в среде морской воды более 90 дней.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИПФ РАН на проведение фундаментальных научных исследований на 2013-2020 гг. по теме №0035-2014-0401 (№ госрегистрации 01201458049).

Библиографический список

1. Тарасенко Ю.П., Царёва И.Н., Кривина Л.А., Леванов Ю.К. Применение метода струйного порошкового напыления для решения проблем машиностроения // Прикладная механика и технологии машиностроения. 2014. № 1 (23). С. 101-113.
2. Тарасенко Ю.П., Царёва И.Н., Леванов Ю.К., Кривина Л.А., Бердник О.Б., Ильичёв В.А. О возможности получения защитного покрытия интерметаллидного состава методом газодинамического порошкового напыления // Вопросы материаловедения. 2015. № 3 (83). С. 91-99.
3. Архипов В.Е., Лондарский А.Ф., Москвитин Г.В., Пугачёв М.С. Газодинамическое напыление. Структура и свойства покрытий. М.: Красанд, 2017. 239 с.

CONDUCTING CORROSION RESISTANT NICKEL COATING FOR CONTACTS OF THE SYSTEM OF AIRCRAFT UNDERWATER LOCATOR BEACONS

© 2018

- | | |
|-------------------------|--|
| L. A. Krivina | Senior Research Associate;
Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences,
Nizhny Novgorod, Russian Federation;
npktribonika@yandex.ru |
| I. N. Tsareva | Candidate of Science (Phys. & Math.), Senior Research Associate;
Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences,
Nizhny Novgorod, Russian Federation;
npktribonika@yandex.ru |
| Yu. P. Tarasenko | Candidate of Science (Phys. & Math.), Head of Laboratory;
Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences,
Nizhny Novgorod, Russian Federation;
npktribonika@yandex.ru |
| Ya. A. Fel' | Candidate of Science (Phys. & Math.), Senior Research Associate;
Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences,
Nizhny Novgorod, Russian Federation;
npktribonika@yandex.ru |
| Yu. K. Levanov | Chief Engineer;
Research and Industrial Center Tribonika, Nizhny Novgorod, Russian Federation;
tribonikaplant@yandex.ru |

The paper deals with the development of manufacturing methods of improving the functionality and reliability of the electric contact made of titanic VT3-1 alloy. This alloy is used in the development of electrical contacts for acoustic beacons used on airplanes of various airline companies. Solving the problem of increasing the life of acoustic beacons (up to 90 days) is directly related to an increase in the stability of the electrochemical characteristics of the contact. To ensure the stable behavior of the electric potential (not more than 0.5 V) at the contact, a method of gas-dynamic spraying of a protective coating based on nickel of increased thickness is proposed. Single-layer and two-layer coatings obtained from different grades of powder mixtures were tested. The regularities of the process of electrochemical breakdown and passivation of protective coatings during comparative short-term tests were studied. Based on the test results, a single-layer gas-dynamic coating of the composition (Ni + Al₂O₃) formed from the powder mixture of grade N3-00-02 was chosen. The microstructure, phase composition, microhardness, porosity and adhesive strength of Ni-based protective coating were investigated. Electrochemical tests of electrical contact with the investigated coating in the sea water environment depending on the time factor were carried out. Increased thickness of the coatings combined with low open porosity and high adhesive strength provided stable behavior of the electric potential in the process of applying it to the working surface of the titanium alloy contacts VT3-1. This ensures reliable electrochemical protection of contacts in the sea water environment for 90 days.

Aircraft; underwater acoustic beacon; electric potential; VT3-1 alloy electric contact; method of gas-dynamic spraying; powder mix; protective coating on the basis of high- thickness nickel.

Citation: Krivina L.A., Tsareva I.N., Tarasenko Yu.P., Fel' Ya.A., Levanov Yu.K. Conducting corrosion resistant nickel coating for contacts of the system of aircraft underwater locator beacons. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2018. V. 17, no. 3. P. 158-166. DOI: 10.18287/2541-7533-2018-17-3-158-166

References

1. Tarasenko Yu.P., Tsareva I.N., Krivina L.A., Levanov Yu.K. Application of the method of jet powder spraying for the solution of problems of mechanical engineering. *Prikladnaya Mekhanika i Tekhnologii Mashinostroeniya*. 2014. No. 1 (23). P. 101-113. (In Russ.)
2. Tarasenko Yu.P., Tsareva I.N., Levanov Yu.K., Krivina L.A., Berdnik O.B., Ilyichev V.A. On obtaining intermetallide coatings by gas dynamic powder spraying. *Voprosy Materialovedeniya*. 2015. No. 3 (83). P. 91-99. (In Russ.)
3. Arkhipov V.E., Londarskiy A.F., Moskvitin G.V., Pugachev M.S. *Gazodinamicheskoe napylenie. Struktura i svoystva pokrytiy* [Gas dynamic spraying: Structure and properties of coatings]. Moscow: Krasand Publ., 2017. 239 p.