

УДК 629.73 – 03.03 (045)

А.П. УМАНСКИЙ, Е.П. ПУГАЧЕВСКАЯ, А.Н. ХИМКО

Национальный авиационный университет, Киев, Украина

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ НАНЕСЕНИЯ НОВЫХ ИЗНОСОСТОЙКИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ УПРОЧНЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Изучена кинетика массопереноса электродов из разработанного композиционного материала на основе диборида титана-хрома с никель-хромовой связкой на подложку из титанового сплава BT-22 с целью выбора оптимального режима нанесения покрытий. Исследованы физико-механические свойства и триботехнические характеристики электроискровых покрытий на основе диборида титана-хрома. Проведена сравнительная характеристика исследуемых покрытий с ранее известным твердым сплавом ВК6. Показана перспективность использования разработанных композитов в качестве материалов для нанесения износостойких покрытий для работы в экстремальных условиях эксплуатации.

Ключевые слова: композиционный материал, кинетика массопереноса, электроискровые покрытия, фреттинг-коррозия, микротвердость, износостойкость.

Введение

В современном мире все большее внимание уделяется проблеме продления ресурса техники, в частности, увеличение срока службы, повышение надежности и долговечности машин. Одним из актуальных вопросов является увеличение ресурса деталей авиационной техники при уменьшении их стоимости. С этой целью используются различного рода защитные и восстанавливающие покрытия. Они позволяют продлить ресурс деталей авиационной техники, а также, за счет использования недорогих компонентов, повысить ее рентабельность.

К перспективным методам повышения износостойкости относится электроискровое легирование (ЭИЛ), которое применяется для упрочнения деталей машин и рабочих кромок режущего инструмента. Данный метод имеет ряд преимуществ по сравнению с плазменным и детонационным методами, которые используются для упрочнения деталей авиационной техники, изготовленных из титановых сплавов. К таким преимуществам относится существенная экономия материала для нанесения износостойких покрытий, а также простота и удобство получения покрытий, что свидетельствует о высокой технологичности использования данного метода. Недостаточность данных по износостойкости электроискровых покрытий, отсутствие общих областей их оптимального технико-экономического применения является одной из причин, не позволяющих широко внедрять этот прогрессивный метод поверхностного упрочнения в авиационной промышленности. Таким образом, требуется разработка комплек-

са методик по созданию новых композиционных электроискровых покрытий для упрочнения деталей авиационной техники.

Обзор публикаций и выделение нерешенных задач

В работе [1] приводятся результаты исследования на износ покрытий из материалов ВК6М и Т5К10, образованных электроискровым легированием. В работе [2] изучены триботехнические и физико-механические особенности электроискровых покрытий системы TiN-Ni в зависимости от фазового и структурного состава материала электрода. В статье [3] приведены экспериментальные данные по износостойкости электроискровых покрытий алюминиевого сплава Ал-25 медным электродом.

В работе [4] исследован процесс электроискрового легирования композиционным материалом на основе AlN-ZrB₂ с добавкой ZrSi₂ титанового сплава BT6 и сталей. В статье [5] изучен массоперенос, состав, структура, а также трибологические и коррозионные свойства покрытий, полученных при электроискровом легировании титанового сплава BT6 и сталей 45, 40X электродными материалами систем Ti – Al и TiN – AlN с разными соотношениями компонентов. В работе [6] исследовано формирование электроискровых покрытий на основе композиционного материала TiB₂ – AlN.

В выше приведенных публикациях не достаточно внимание уделяется разработке новых композиционных материалов, которые бы удовлетворяли не только высоким физико-механическим и эксплуата-

ционными свойствам, а также были экономически целесообразны в использовании в условиях жестких рыночных отношений. Недостаточно изучено упрочнение авиационных титановых сплавов, в частности применение электроискрового легирования для упрочнения титановых сплавов, которые используются для изготовления лопаток ГТД, подверженных повышенному износу в условиях фреттинг-коррозии.

Постановка задачи данного исследования

Основываясь на выше сказанном, ставились следующие задачи:

- изучение кинетики массопереноса электрода из композиционного материала на основе диборида титана хрома на подложку из титанового сплава ВТ-22 с целью выбора оптимального режима и времени нанесения покрытий;
- определение физико-механических свойств полученных покрытий;
- изучение триботехнических характеристик электроискровых покрытий в условиях фреттинг-коррозии.

Изложение основного материала

Износостойкость деталей машин, которые упрочняются электроискровым легированием, значительно зависит от режимов упрочнения и материала упрочняющего электрода.

Для нанесения электроискровых покрытий использовался разработанный композиционный материал (КМ) на основе диборида титана-хрома с никель-хромовой связкой. На основании исследования контактного взаимодействия диборида титана-хрома со сплавами никеля с добавками хрома в концентрационном диапазоне 5 – 30 мас. % был выбран оптимальный состав металлической связки КМ: Ni – 15%Cr. Разработанный материал обладает высокими физико-механическими и триботехническими свойствами. Таким образом, данный материал был предложен в качестве электродов для нанесения износостойких покрытий.

Для нанесения покрытий были выбраны три состава композиционного материала: ТБХН30 (TiCrB₂ – 30%(Ni – Cr)), ТБХН40 (TiCrB₂ – 40%(Ni – Cr)), ТБХН50 (TiCrB₂ – 50%(Ni – Cr)). Варьирование металлической связки в композиционном материале покрытия позволит оценить влияние состава материала на технологичность процесса нанесения и свойства полученных покрытий: Электроды получали методом прессования и спекания композиционных материалов при температуре 1500 – 1550°C в печи СШВ в вакууме с выдержкой 1 час.

Исследования проводились на образцах титанового сплава ВТ-22, которые подвергались электроискровому легированию на установке «Алиер-52».

Эта установка позволяет наносить покрытия на 7 режимах. Для оптимизации исследования кинетики массопереноса были выбраны два граничных и один средний режим, то есть 1, 4 и 7. Для определения характера массопереноса покрытия наносили на образцы площадью 1 см² в течении 1 минуты. Эксперимент повторялся в среднем 6 – 8 раз, чтобы оценить на каком интервале времени происходит максимальный массоперенос и с какого момента происходит обратный процесс, то есть разрушение покрытия. Эти параметры оценивались путем взвешивания электрода и катода после каждого интервала времени. По полученным данным были построены кинетические зависимости изменения массы катода $\Sigma\Delta_k$ и анода $\Sigma\Delta_a$, рассчитаны коэффициенты массопереноса ($K_n = \Sigma\Delta_k / \Sigma\Delta_a \cdot 100\%$).

В результате исследований были получены следующие закономерности.

При нанесении покрытия электродом из ТБХН30 на 1 режиме процесс массопереноса условно можно разделить на три стадии

На первой стадии (1-3 интервал времени) происходит приработка поверхности и образования легирующего слоя, прирост по массе и по толщине при этом незначителен (рис. 1). Легирующий слой представляет собой комбинацию компонентов подложки и материала покрытия. Далее наблюдается вторая стадия (3-5 интервал времени), когда происходит интенсивный массоперенос с образованием на поверхности легирующего слоя покрытия. В этом случае электрод взаимодействует уже не с подложкой, а с образовавшимся легирующим слоем. Этот процесс продолжается до наступления третьей стадии (5-8 интервал времени), когда прироста катода фактически не наблюдается.

Покрытие, нанесенное на 4 режиме электродом ТБХН30 характеризуется плохой сплошностью (рис. 2), а с третьего интервала времени происходит его разрушение.

Нанесение покрытия электродом ТБХН30 на 7 режиме характеризуется сильным растрескиванием электрода. Это может быть обусловлено тем, что электрод содержит всего 30% металлической связки, а 7 режим отличается высокими энергетическими параметрами (I, U). Электропроводность материала напрямую связана с этими параметрами: чем больше связки, тем выше электропроводность.

Микрорентгеноспектральный анализ зоны взаимодействия покрытия, нанесенного электродом ТБХН30 на 7 режиме, и подложки показал, что в процессе взаимодействия происходит сегрегация материала покрытия (рис. 3).

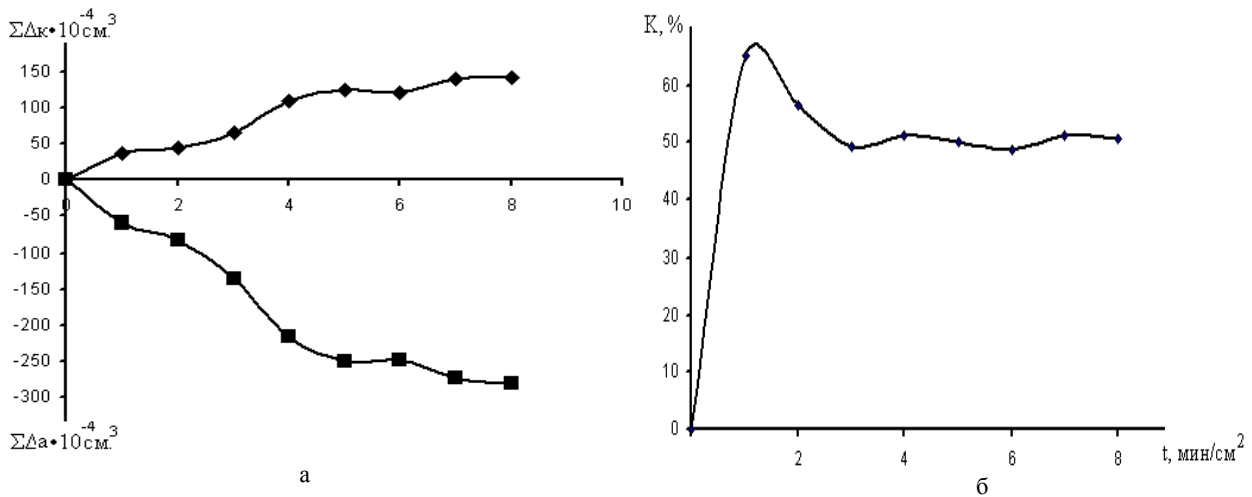


Рис. 1. Кинетика массопереноса при ЭИЛ титанового сплава ВТ-22 композиционным материалом ТБХН30 (1 режим): а – прирост катода и эрозия анода; б – коэффициент массопереноса

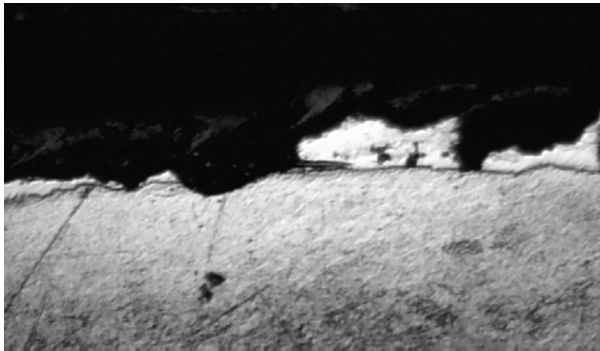


Рис. 2. Вид покрытия ТБХН30, нанесенного на 4 режиме, в разрезе на приборе Micron-gamma

То есть, на начальном этапе взаимодействия на поверхности подложки закрепляются частицы металлической фазы, адгезионно более прочно связанные с титановым сплавом, из которого изготовлена подложка. Тугоплавкая фаза при этом располагается на поверхности полученного покрытия, что обеспечивает более высокую твердость покрытия и таким образом более высокую износостойкость. Однако данное покрытие не сможет работать в условиях постоянных нагрузок и фреттинг-коррозии, так как данное распределение фаз приведет к охрупчиванию материала.

При рассмотрении покрытий из КМ ТБХН40, нанесенных на тех же трех режимах, можно отметить хорошую кинетику массопереноса, стабильность процесса и отношение прироста катода и эрозии анода. При чем покрытия, полученные на всех трех режимах, характеризуются общей тенденцией (рис. 4).

Наибольший прирост катода и эрозия анода наблюдается у покрытия ТБХН40 (7 режим), а коэффициент массопереноса – у покрытия ТБХН40 (4 режим). Другими словами, максимальный прирост покрытия обеспечивается на 7 режиме, а экономичность использования материала – на четвертом.

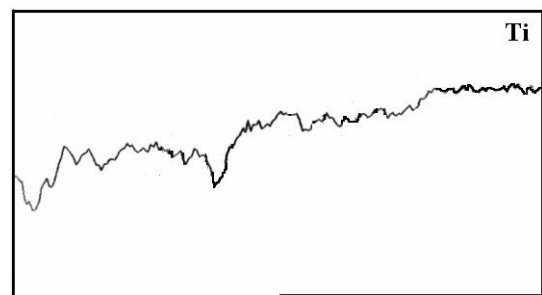
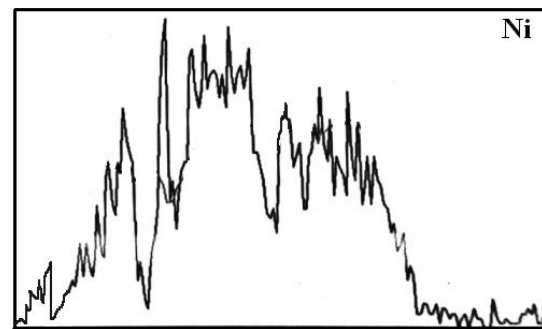
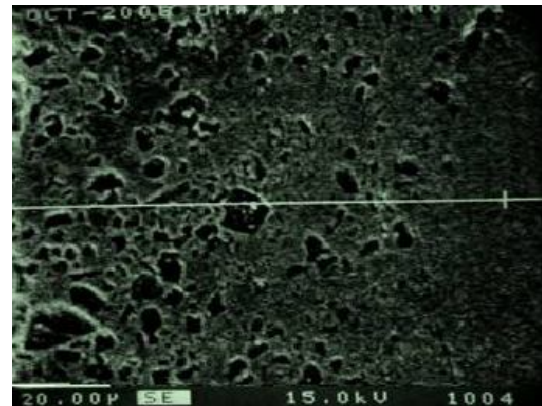


Рис. 3. Микроструктура зоны взаимодействия покрытия на основе ТБХН30 и подложки и распределение в ней элементов: а – никель; б – титан

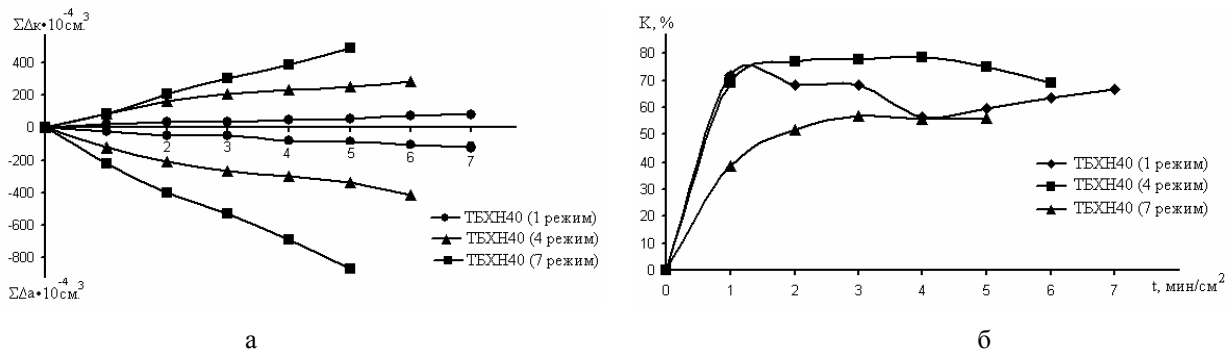


Рис. 4. Кинетика массопереноса при ЭИЛ титанового сплава ВТ-22 электродом ТБХН40: а – прирост катода и эрозия анода; б – коэффициент массопереноса

Металлографический анализ показал, что покрытие ТБХН40 представляет собой матричную структуру, состоящую из сплава Ni – Cr, в котором равномерно распределены зерна тугоплавкой составляющей TiCrB_2 . Темная фаза представляет собой диборид титана хрома, а светлая – это металлическая связка Ni – Cr (рис. 5). В ходе исследования не были обнаружены конгломераты тугоплавкой фазы, что свидетельствует об отсутствии сегрегаций. Покрытие характеризуется высокой сплошностью и низкой пористостью.

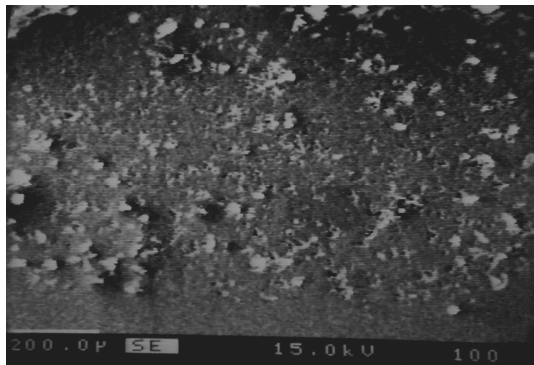


Рис. 5. Микроструктура покрытия ТБХН40

Характерной особенностью процесса ЭИЛ является тот факт, что с увеличением толщины покрытия снижается его адгезия. Это может быть обусловлено сегрегацией материала электрода. Электрод состоит из композиционного материала, в состав которого входит тугоплавкая твердая фаза (TiCrB_2) и металлическая пластичная связка (Ni – Cr). В процессе искрового разряда температура электрода и катода значительно повышается, металлическая связка плавится значительно быстрее тугоплавкой и поэтому быстрее оседает на катоде. Недостаточное количество связки может стать причиной низкой адгезии. В этом случае будет приоритетным использовать материал электрода с более высоким содержанием металлической связки. В нашем случае это КМ ТБХН50 (50% (Ni – Cr)).

При рассмотрении покрытий на основе КМ ТБХН50 (рис.6), нанесенных на выбранных режимах, соблюдается такая же тенденция, как и у покрытий на основе ТБХН40. То есть, максимальный прирост катода происходит на 7 режиме нанесения, а максимальная экономичность процесса достигается на 4 режиме.

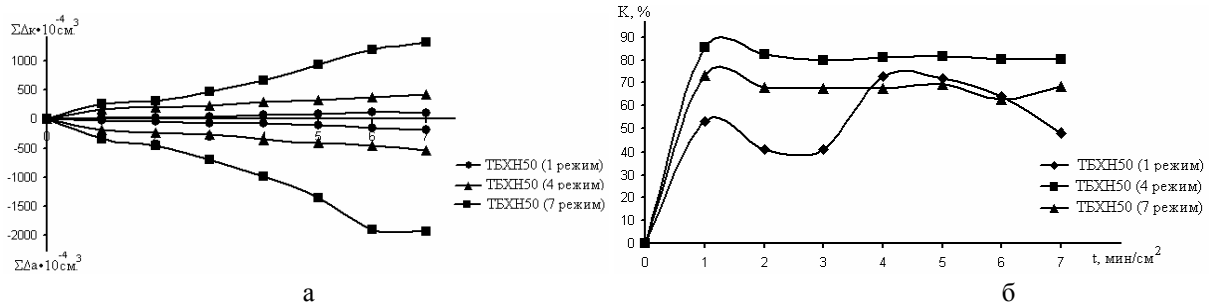


Рис. 6. Кинетика массопереноса при ЭИЛ титанового сплава ВТ-22 электродом ТБХН50: а – прирост катода и эрозия анода; б – коэффициент массопереноса

На электронном микроскопе Camebax SX-50 был проведен качественный анализ покрытий. Анализ показал наличие следующих элементов в покрытиях: Cr, Ti, Ni, небольшое количество В (рис. 7).

Таким образом, покрытия сохранили первоначальный состав материала, который использовался для их нанесения, а именно, композиционный материал $\text{TiCrB}_2 - \text{Ni} - \text{Cr}$.

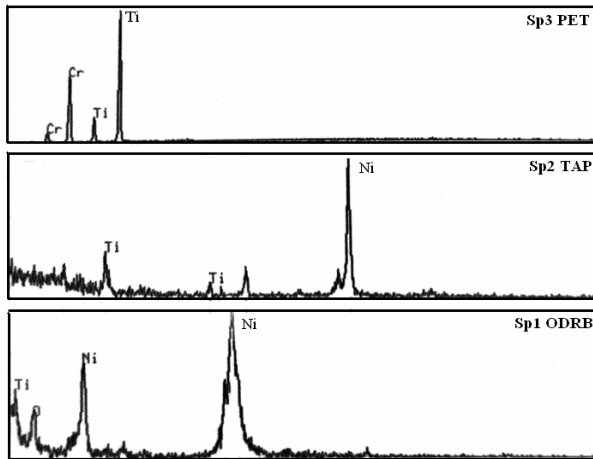


Рис. 7. Качественный анализ покрытий ТБХН

Покрытие на основе материала ТБХН50 представляет собой гетерофазную структуру: темно-серая фаза округлой формы – зерна $TiCrB_2$, светло-серая фаза, окружающая зерна $TiCrB_2$ – сплав $Ni - Cr$. Данные заключения можно сделать исходя из микроструктуры покрытия и распределения в ней элементов (рис. 8).

Таким образом, можно сделать вывод, что оптимальным режимом нанесения покрытий является 4 режим, так как при этом соблюдается достаточно высокий прирост материала, а значит и толщина покрытий, а эрозия электрода сопоставима с приростом катода, а это значит, что обеспечивается высокая экономичность процесса.

Покрытия целесообразно наносить в течении 3 минут, так как в этом интервале времени наблюдается максимальный прирост катода.

Покрытия, нанесенные на 4 режиме электродами на основе КМ ТБХН40 и ТБХН50, имеют близкие по значению коэффициенты массопереноса (рис. 9).

Также они характеризуются одинаковой тенденцией прироста катода и эрозии анода. Это говорит о том, что с точки зрения кинетики массопереноса оба состава композиционного материала могут быть использованы для нанесения покрытий.

Толщина полученных покрытий варьируется в среднем от 60 до 100 мкм (табл. 1).

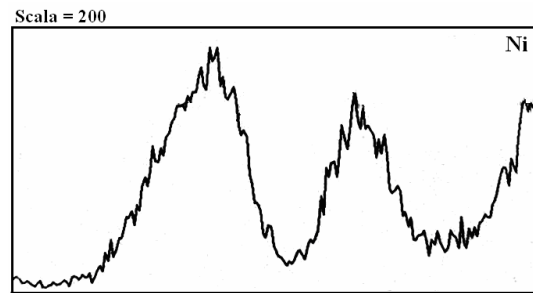
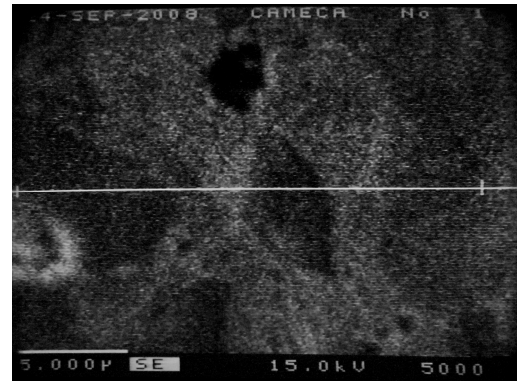
Таблица 1

Толщина полученных покрытий

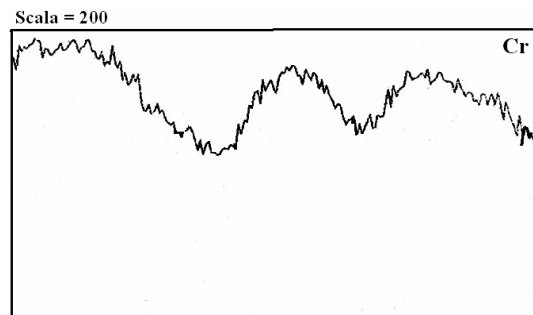
	ТБХН30	ТБХН40	ТБХН50
1 режим	75 мкм	73 мкм	59 мкм
4 режим	68 мкм	112 мкм	108 мкм
7 режим	73 мкм	75 мкм	76 мкм

Как видно из таблицы, на 4 режиме нанесения обеспечивается максимальная толщина покрытий.

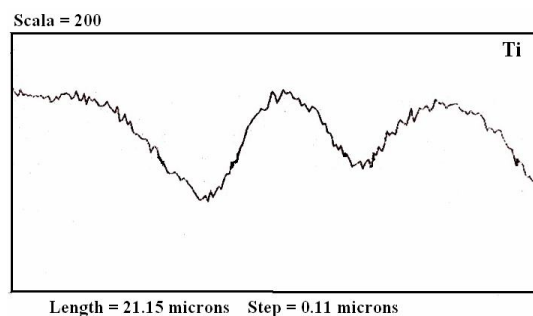
Однако, кроме технологичности процесса необходимо учесть физико-механические и трибологические свойства получаемых покрытий.



а



б



в

Рис. 8. Микроструктура покрытия на основе материала ТБХН50 и распределение в ней элементов:

а – никель; б – хром; в – титан

На приборе Micron-gamma была изучена микротвердость покрытий, нанесенных на 4 режиме. Как видно из гистограммы, микротвердость покрытий зависит от состава композиционного материала, который использовался для их нанесения (рис. 10).

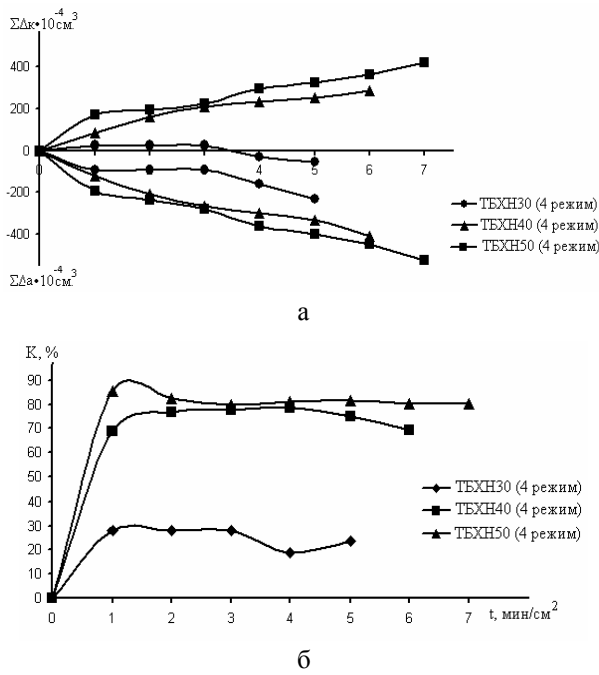


Рис. 9. Кинетика массопереноса при ЭИЛ титанового сплава VT-22 композиционными материалами: а – прирост катода и эрозия анода; б – коэффициент массопереноса

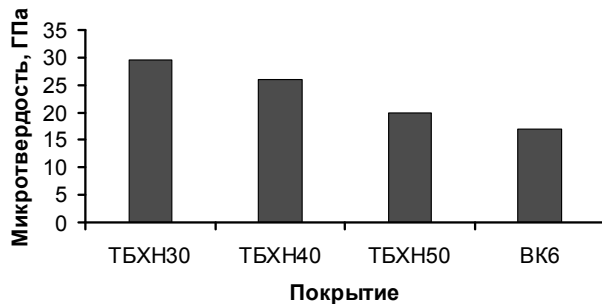


Рис. 10. Микротвердость покрытий из разработанного композиционного материала и стандартного твердого сплава VK6.

Микротвердость покрытия на основе TBXN30 порядка 30 ГПа, в то время как покрытие на основе TBXN50 обладает микротвердостью 21 ГПа. Это обусловлено тем, что в составе материала TBXN30 для нанесения покрытий наибольшее содержание тугоплавкой составляющей, которая обладает высокой микротвердостью.

Микротвердость покрытия из стандартного сплава VK6 ниже микротвердости покрытий на основе диборида титана хрома. Это объясняется тем, что в процессе нанесения покрытия из вольфрамового сплава VK6 электрод подвергался сильному окислению, что в свою очередь вызывало растрескивание и разрушение электрода. Таким образом, покрытия характеризуются низкой сплошностью и, как следствие, низкой микротвердостью.

В условия фреттинг-коррозии были проведены испытания покрытий на износостойкость.

Контрольным во всех испытаниях являлась сталь 95X18. Были получены следующие результаты (рис. 11).

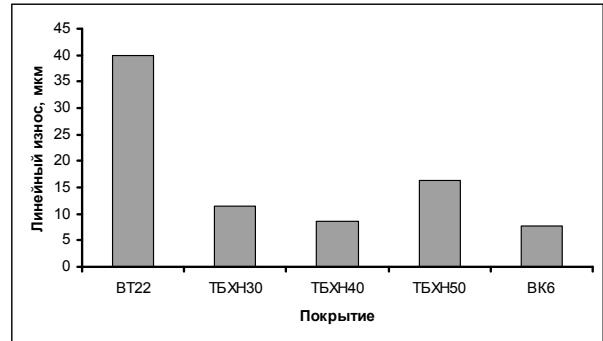


Рис. 11. Износостойкость титанового сплава VT-22 и электроискровых покрытий

Наименьший линейный износ у покрытия TBXN40. Это может быть обусловлено тем, что данный состав материала покрытия является «золотой серединой»: содержание металлической связки в КМ достаточно, чтобы обеспечить хорошую адгезию покрытия и подложки, а также достаточную пластичность.

В тоже время, данное содержание металлической связки не снижает существенно микротвердость материала, что обеспечивает ему высокую износостойкость.

Разработанный композиционный материал покрытий не уступает по свойствам стандартному твердому сплаву VK6.

В целом, износостойкость разработанных покрытий выше износостойкости титанового сплава VT-22 в 3-7 раз, что говорит о перспективности применения данных покрытий для упрочнения деталей авиационной техники, изготовленных из титановых сплавов.

Заключение

Электроискровые покрытия на основе разработанного композиционного материала являются перспективными и не уступают по свойствам известному твердому сплаву.

Оптимальным режимом нанесения покрытий является 4 режим, время нанесения 3 мин.

Покрытия на основе композиционного материала TBXN40 являются оптимальными по свойствам и технологичности нанесения покрытия.

Разработанные электроискровые покрытия являются перспективными и способны продлить ресурс деталей авиационной техники в 3 – 7 раз.

Литература

1. Исследование износостойких несплошных покрытий, образованных электроискровым легированием / Ю.И. Мулин, А.Д. Верхотуров, Л.А. Климова, В.Д. Власенко // Трение и износ. – 2004. – Т. 25, № 6. – С. 650-654.

2. Паустовский А.В. Оценка триботехнических характеристик электроискровых покрытий, полученных на стали электродными материалами системы TiN-Ni / А.В. Паустовский, В.И. Новикова // Порошковая металлургия. – 2005. – № 5/6. – С.43-45.

3. Моделювання зносостійкості електроіскрових покриттів при відсутності мащення / В.В. Варухно, А.Г. Довгаль, Л.В. Бурдюженко, Є.М. Лісовий // Вісник НАУ. – 2004. – № 2. – С. 63-67.

4. Тепленко М.А. Структура и износостойкость покрытий на титановом сплаве и сталях, полученных при электроискровом легировании материалов AlN-ZrB₂ / М.А. Тепленко, И.А. Подчерняева // Порошковая металлургия. – 2002. – № 3/4. – С. 48-58.

5. Триботологические свойства тонкодисперсных покрытий при электроискровом легировании материалами системы Ti – Al – N / И.А. Подчерняева, А.Д. Панасюк, М.А. Тепленко и др. // Порошковая металлургия. – 2002. – № 11/12. – С. 49-60.

6. Формирование, структура и свойства покрытий на основе TiB₂-AlN, полученных электроискровым и лазерным методами / И.А. Подчерняева, А.Д. Панасюк, В.П. Каташинский, М.А. Тепленко // Порошковая металлургия. – 2000. – №11/12. – С. 39-46.

Поступила в редакцию 15.05.2009

Рецензент: д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой О.А. Тамаргазин, Национальный авиационный университет, Киев, Украина.

РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ НАНЕСЕННЯ НОВИХ ЗНОСОСТІЙКИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ ПОКРИТТІВ ДЛЯ ЗМІЦНЕННЯ ДЕТАЛЕЙ АВІАЦІЙНИХ ДВИГУНІВ

О.П. Уманський, Є.П. Пугачевська, А.М. Хімко

Вивчена кінетика масопереносу електродів з розробленого композиційного матеріалу на основі диборида титану-хромю з нікель-хромовою зв'язкою на підложку з титанового сплаву BT-22 з метою вибору оптимального режиму нанесення покриттів. Досліджені фізико-механічні властивості та триботехнічні характеристики електроіскрових покриттів на основі диборида титану-хромю. Проведена порівняльна характеристика покриттів, що досліджуються, з раніше відомим твердим сплавом ВК6. Показана перспективність використання розроблених композитів в якості матеріалу для нанесення зносостійких покриттів для роботи в екстремальних умовах експлуатації.

Ключові слова: композиційний матеріал, кінетика масопереносу, електроіскрові покриття, фретінг-корозія, мікротвердість, зносостійкість.

DEVELOPMENT OF PLATING TECHNOLOGY OF NEW WEAR-RESISTANT COMPOSITE COATINGS FOR STRENGTHENING DETAILS OF AVIATION ENGINES

A.P. Umansky, E.P. Pugachevskaya, A.N. Khimko

The kinetics of mass transfer of electrodes from developed composite material on the base of titanium chromium diboride with Ni-Cr bond on substrate from titanium alloy BT-22 has studied. The purpose of studying is choice of optimal mode of plating coatings. The physical and chemical properties and tribotechnical characteristics of electric-spark coatings on the base of titanium chromium diboride have researched. The comparison characteristic of researched coatings with earlier known cemented carbide BK6 is conducted. The perspective of using developed composites as material for plating wear-resistant coatings for operation in extreme conditions of exploitation is shown.

Key words: composite material, kinetics of mass transfer, electric-spark coatings, fretting corrosion, microhardness, wear-resistance.

Уманський Александр Павлович – д-р техн. наук, старший научний співробітник, ведучий научний співробітник Інститута проблем матеріалознавства ім. І.Н. Францевича (НАНУ), професор кафедри технологій аеропортів Національного авіаційного університету, Київ, Україна.

Пугачевская Евгения Петровна – аспірант, асистент кафедри технологій аеропортів Національного авіаційного університету, Київ, Україна, e-mail: JaneD2003@ukr.net.

Хімко Андрей Николаевич – канд. техн. наук, доцент кафедри технологій відновлення авіаційної техніки Національного авіаційного університету, Київ, Україна.