

УДК 629.73 – 03.03 (045)

Е. П. ПУГАЧЕВСКАЯ

Национальный авиационный университет, Украина

ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОИСКРОВЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ТУГОПЛАВКИХ БОРИДОВ

Приведены результаты испытаний в условиях фреттинг-коррозии разработанных электроискровых покрытий системы $TiCrB_2-Ni-Cr$. Проведен сравнительный анализ интенсивности изнашивания разработанных покрытий и покрытий из сплава ВК6. Показано влияние амплитуды относительного перемещения и нагрузки на интенсивность изнашивания покрытий за счет уменьшения амплитуды относительного перемещения и реализации окислительного механизма изнашивания. Изучена роль механизма изнашивания покрытий. Показано, что окислительный механизм изнашивания покрытий обеспечивает повышение их износостойкости в сравнении с адгезионным, реализуемым на титановом сплаве ВТ-22. Интенсивность изнашивания покрытий системы $TiCrB_2-Ni-Cr$ сопоставима с интенсивностью изнашивания сплава ВК6 и в 2-5 раз ниже интенсивности изнашивания титанового сплава ВТ-22.

Ключевые слова: фреттинг-коррозия, электроискровые покрытия, диборид титана-хрома, интенсивность изнашивания, окислительный механизм изнашивания.

Введение

Анализ отказов и неисправностей современных машин и механизмов подтверждает, что поверхностная прочность материалов при трении является важным фактором, определяющим их надежность и долговечность. С целью повышения поверхностной прочности деталей трущихся пар в настоящее время разработано значительное количество методов, позволяющих изменять как строение поверхностных слоев, так и создавать слои с наперед заданными свойствами. Эти методы направлены на ограничение возможности пластической деформации при трении путем торможения процессов генерации и взаимодействия дислокаций, что способствует снижению трибоактивации поверхностного слоя.

К одному из перспективных методов нанесения покрытий относится электроискровое легирование (ЭИЛ), которое применяется как для упрочнения деталей машин, так и для восстановления и упрочнения бандажных полок лопаток газотурбинных двигателей. Данный метод имеет ряд преимуществ по сравнению с газотермическими 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 электро-

искровых покрытий, отсутствие общих областей их технико-экономического применения является одной из причин, не позволяющих широко внедрять этот прогрессивный метод поверхностного упрочнения в авиационной промышленности. Таким образом, требуется проведение комплекса исследований по созданию новых композиционных электроискровых покрытий для упрочнения деталей авиационной техники.

Одним из перспективных направлений развития машиностроения является применение новых материалов, обладающих высокими физико-механическими и триботехническими характеристиками. К числу наиболее перспективных материалов относятся тугоплавкие металлоподобные и неметаллические соединения типа карбидов, боридов, нитридов и т.д. [1-3]. Однако их непосредственное использование для изготовления деталей машин и механизмов часто ограничивается значительной хрупкостью и невысокими прочностными свойствами в условиях динамических нагрузок, технологическими трудностями их получения, а также относительно высокой стоимостью. Поэтому целесообразно использовать тугоплавкие соединения, применяя их в виде основы композиционных материалов. В качестве пластичной составляющей таких композитов традиционно используют металлические сплавы. Композиционный материал можно использовать для изготовления деталей машин, но целесообразнее применять его в качестве накладок для трущихся и нагруженных деталей или в

форме покрытий.

В институте проблем материаловедения им. И. М. Францевича разработан новый композиционный материал на основе диборида титана-хрома [4]. Компоненты этого материала выбраны на основе проведенных исследований по контактному взаимодействию в системе $\text{TiCrB}_2\text{-Ni-Cr}$ [5]. При содержании 15% Cr в сплаве никеля не происходит активного химического взаимодействия между компонентами системы и хром, как поверхностно активный элемент, способствует растеканию никеля по поверхности диборида титана-хрома, что приводит к образованию нулевых контактных углов. Данный материал представляет собой матрицу Ni-Cr, в которой равномерно распределены зерна диборида титана-хрома с размером зерна порядка 3-5 мкм. За счет такой структуры материал обладает высокими механическими и триботехническими свойствами, который прошел апробацию в качестве электродов для нанесения ЭИЛ-покрытий. Отработана технология нанесения новых износостойких электроискровых покрытий [6], которые могут применяться для упрочнения и восстановления деталей авиационной техники, в частности, для упрочнения бандажных полок рабочих лопаток двигателя Д-36. На основании проведенных исследований выбран оптимальный режим нанесения покрытий и состав материала, которые обеспечивают максимальный коэффициент массопереноса и толщину покрытий.

Электроискровые покрытия на основе диборида титана-хрома обладают высокими физико-механическими и триботехническими свойствами, поэтому их применение не может быть ограничено только рабочими лопатками ГТД. Чтобы оценить эксплуатационные характеристики полученных ЭИЛ-покрытий необходимо провести триботехнические испытания в условиях фреттинг-коррозии.

Целью данной работы было исследование влияния двух основных параметров – амплитуды и нагрузки – на интенсивность изнашивания в условиях фреттинг-коррозии разработанных электроискровых покрытий на основе диборида титана-хрома.

1. Экспериментальная часть

В работе исследовались ЭИЛ-покрытия на основе ТБХН40 ($\text{TiCrB}_2\text{-40\%(Ni-Cr)}$), нанесенные на 4 режиме ($t = 170$ мкс, $I_a = 200$ А). В качестве подложки для нанесения покрытий использовался титановый сплав ВТ-22, так как он широко используется для производства деталей ГТД и работает в узлах, подверженных фреттинг-коррозии и требующих упрочнения. Испытания проводились в следующих

условиях: нагрузка $P = 10 - 30$ МПа, $A = 50 - 200$ мкм, $N = 5 \cdot 10^5$ циклов.

Для оценки интенсивности изнашивания разработанных покрытий проводился сравнительный анализ покрытий на основе ТБХН40, титанового сплава ВТ-22 и покрытий из твердого сплава ВК6, который выбран в качестве эталона, так как он относится к тому же классу материалов, что и разработанный, а также он широко применяется для упрочнения узлов авиационной техники. На 410 ГА заводе отработана технология восстановления бандажных полок лопаток газотурбинного двигателя Д36 путем нанесения электроискровых покрытий сплавами ВК. Использование сплава ВТ-22 в испытаниях обусловлено необходимостью оценки влияния покрытий на износостойкость титановых сплавов.

2. Анализ полученных результатов

Проводились триботехнические испытания в условиях фреттинг-коррозии (рис. 1) при постоянной амплитуде ($A = 50$ мкм) и переменной нагрузке ($P = 10 - 30$ МПа).

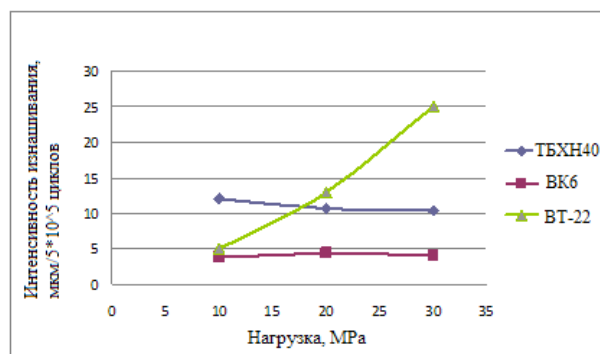
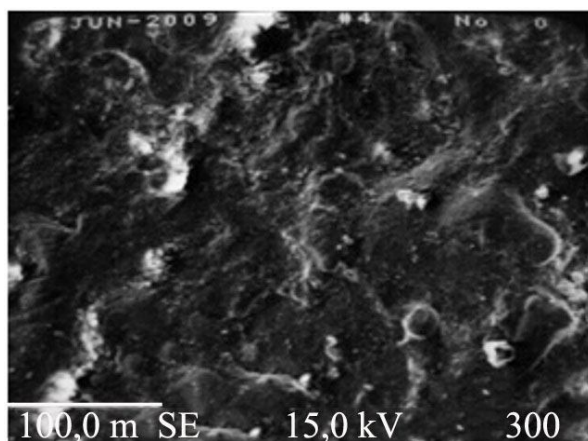


Рис. 1. Изменение линейного износа ЭИЛ-покрытий от удельной нагрузки при амплитуде относительного перемещения 50 мкм

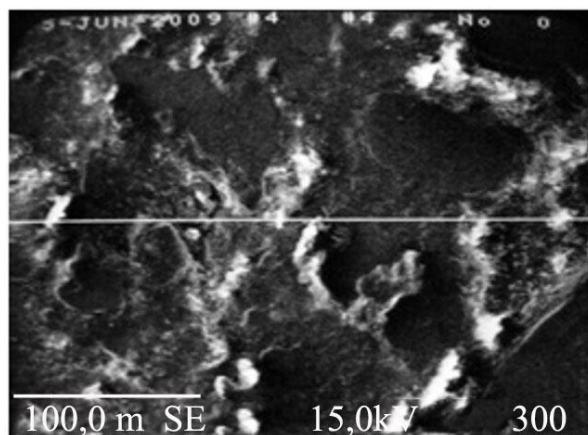
Интенсивность изнашивания титанового сплава ВТ-22 увеличивается с увеличением прикладываемой к образцу нагрузки: при $P = 10$ МПа интенсивность изнашивания составила $5 \text{ мкм}/5 \cdot 10^5$ циклов, а при нагрузке в 30 МПа интенсивность изнашивания увеличилась до $25 \text{ мкм}/5 \cdot 10^5$ циклов. Это обусловлено тем, что при увеличении нагрузки в процессе трения титанового сплава ВТ-22 интенсифицируются процессы схватывания материала, что приводит к более существенному износу материала.

Покрытия на основе ТБХН40 характеризуются более плавным переходом с изменением нагрузки интенсивности изнашивания в сравнении с титановым сплавом ВТ-22. С увеличением нагрузки ин-

тенсивность изнашивания разработанных покрытий уменьшается. При увеличении нагрузки уменьшается влияние амплитуды перемещений на процесс изнашивания, что является одним из ключевых параметров при фреттинг-коррозии. Кроме того, процесс изнашивания разработанных покрытий характеризуется окислительным механизмом изнашивания, а процесс изнашивания титановых сплавов – адгезионным [7]. Оксидная пленка в покрытии формируется еще на стадии его нанесения. Об этом свидетельствуют данные микрорентгеноспектрального анализа (рис. 2).



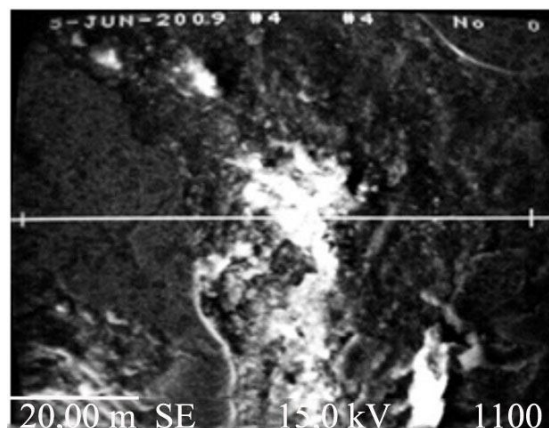
а



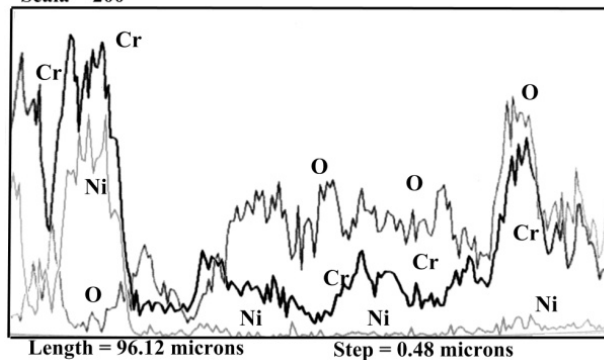
б

Рис. 2. Микроструктура покрытия ТБХН40 (а) и дорожки трения покрытия ТБХН40 (б)

Так как энергетические параметры установки ЭИЛ достаточно высокие, то в процессе нанесения покрытий образуется микрованна, где в жидкой фазе присутствуют как компоненты подложки, так и компоненты электрода. За счет высоких температур происходит частичное окисление составляющих покрытия и, как следствие, образуются сложные оксиды титана, хрома и никеля. В процессе трения покрытий на основе ТБХН40 на поверхности дорожек трения также образуются сложные оксиды титана и хрома и оксиды никеля и хрома (рис. 3).

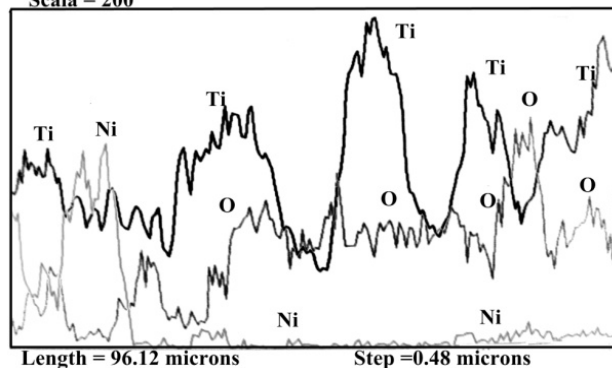


Scala = 200



а

Scala = 200



б

Рис. 3. Микроструктура дорожки трения покрытия ТБХН40 и распределение в ней элементов: а – никель, хром, кислород; б – кислород, никель, титан

То есть, материал покрытия характеризуется селективностью окисляемости тугоплавкой составляющей с формированием сложных оксидов титана и хрома и металлической связкой с образованием оксидов никеля и хрома. Более интенсивно окисляется тугоплавкая составляющая материала покрытия ТБХН40, то есть диборид титана хрома, и именно оксидная пленка, формируемая на ее поверхности, работает как защитная. Таким образом, реализуется окислительный механизм изнашивания с формированием сложных оксидных пленок, которые работают как защитные, предотвращая повы-

шенный износ покрытий.

Интенсивность изнашивания покрытий из ВК6 сопоставима с интенсивностью изнашивания покрытий ТБХН40.

При амплитуде перемещений 125 мкм и изменяющейся нагрузке интенсивность изнашивания разработанных покрытий составила $2-4 \text{ мкм}/5 \cdot 10^5$ циклов (рис. 4). Минимальная интенсивность изнашивания наблюдалась при 20 МПа нагрузки, т.е. происходит самокомпенсация нагрузки и амплитуды, что приводит к уменьшению интенсивности изнашивания покрытий. Кроме того, образующиеся на поверхности трения защитные оксидные пленки дополнительно способствуют снижению интенсивности изнашивания покрытий. Покрытия из сплава ВК6 наоборот показали наибольшую интенсивность изнашивания при 20 МПа нагрузки. Покрытия из сплава ВК6 также окисляются в процессе трения, однако в отличие от оксидных пленок, формируемых на поверхности трения покрытий ТБХН40, оксиды вольфрама не несут защитной функции, а наоборот – разрыхляют и тем самым разрушают материал покрытия.

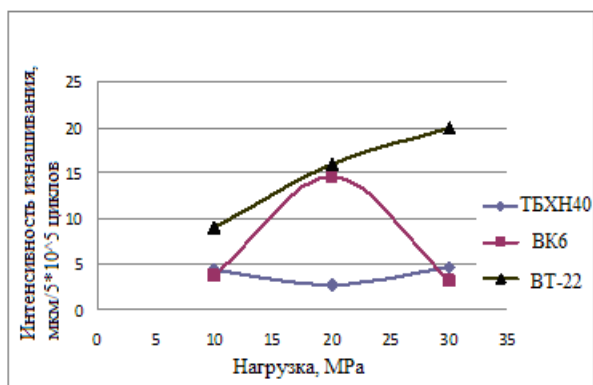


Рис. 4. Изменение линейного износа ЭИЛ-покрытий от удельной нагрузки при амплитуде 125 мкм

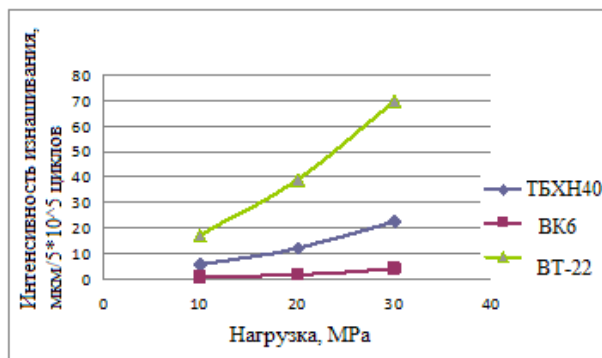


Рис. 5. Изменение линейного износа ЭИЛ-покрытий от удельной нагрузки при амплитуде 200 мкм

При амплитуде перемещений 200 мкм оба покрытия и титановый сплав характеризуются тенденцией увеличения интенсивности изнашивания с увеличением нагрузки от 10 до 30 МПа (рис. 5). Данные условия испытаний являются достаточно жесткими, чем и объясняются полученные результаты.

Заключение

Проведенные испытания показали, что интенсивность изнашивания покрытий напрямую зависит от нагрузки и амплитуды относительного перемещения. Однако необходимо отметить влияние физико-механических свойств материала покрытий, а также механизма изнашивания данных покрытий. Так, за счет реализации окислительного механизма изнашивания покрытий ТБХН40 интенсивность их изнашивания в 1,5 – 2 раза ниже интенсивности изнашивания титанового сплава ВТ-22, при трении которого реализуется адгезионный механизм изнашивания. Сравнительный анализ интенсивности изнашивания разработанных покрытий и покрытий из сплава ВК6 показал сопоставимость результатов, а с учетом дороговизны и дефицитности сплавов ВК, можно отметить превосходство разработанных покрытий на основе диборида титана-хрома.

Литература

1. Котельников, Р. Б. Особо тугоплавкие элементы и соединения [Текст] : справ. / под ред. Р. Б. Котельникова. – М. : Металлургия, 1969. – 468 с.
2. Самсонов, Г. В. Тугоплавкие соединения. [Текст] / Г. В. Самсонов. – М. : Металлургиздат, 1963. – 397 с.
3. Туманова, А. Г. Тугоплавкие материалы в машиностроении [Текст] : справ. / А. Г. Туманова ; под ред. А. Г. Туманова и К. И. Портного. – М. : Машиностроение, 1967. – 438 с.
4. Пат. №25933 України, МПК С22С 29/00. Композиційний зносостійкий матеріал на основі дибориду титану-хрому [Текст] / О. П. Уманський, А. Д. Панасюк, В. П. Коновал, С. Р. Ігнатович, Є. П. Дворник, В. Д. Гулевець ; заявник і власник інститут проблем матеріалознавства ім. Францевича НАН України. – № u200704682 ; Заявл. 27.04.07 ; Опубл. 27.08.07 ; Бюл. № 13. – 3 с.
5. Уманський, А. П. Исследование контактного взаимодействия диборида титана хрома со сплавами Ni-Cr [Текст] / А. П. Уманский, В. П. Коновал, Е. П. Дворник // Адгезия металлов и сплавов. – К. : ПІМ НАНУ, 2008. – Вип. 41. – С. 44 – 52.
6. Уманський, А. П. Разработка технологии нанесения новых износостойких композиционных покрытий для упрочнения деталей авиационных

двигателей [Текст] / А. П. Уманський, Е. П. Пугачевская, А. Н. Химко // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2009. – № 9(66). – С. 38–44.

7. Pugachevskaya, E. P. *Wear mechanisms of the VT-3 titanium alloy and titanium-chromium diboride composite under fretting corrosion* [Text] /

E. P. Pugachevskaya, A. P. Umanskiy, S. S. Chuprov // *Powder Metallurgy and Metal Ceramics* (4 October 2012), P. 1-7, doi:10.1007/s11106-012-9429-y Key: citeulike: 11423864 ; Translated from *Poroshkovaya Metallurgiya*. – 2012. – Vol. 51, No. 5–6 (485). – P. 41–48.

Поступила в редакцію 1.06.2014, рассмотрена на редколлегии 12.06.2014

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

ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕЛЕКТРОІСКРОВИХ ПОКРИТТІВ НА ОСНОВІ ТУГОПЛАВКИХ БОРИДІВ

Є. П. Пугачевська

Наведено результати випробувань в умовах фретинг-корозії розроблених електроіскрових покриттів системи $TiCrB_2-Ni-Cr$. Проведено порівняльний аналіз інтенсивності зношування розроблених покриттів та покриттів зі сплаву ВК6. Показано вплив амплітуди відносного переміщення та навантаження на інтенсивність зношування покриттів. Зі збільшенням навантаження зменшується інтенсивність зношування розроблених покриттів за рахунок зменшення впливу амплітуди відносного переміщення та реалізації окислювального механізму зношування. Вивчено роль механізму зношування покриттів. Показано, що окислювальний механізм зношування покриттів забезпечує підвищення їх зносостійкості в порівнянні з адгезійним, який реалізується на титановому сплаві ВТ-22. Інтенсивність зношування покриттів системи $TiCrB_2-Ni-Cr$ відповідає інтенсивності зношування сплаву ВК6 та в 2-5 разів нижче інтенсивності зношування титанового сплаву ВТ-22.

Ключові слова: фретинг-корозія, електроіскрові покриття, диборид титану-хрому, інтенсивність зношування, окислювальний механізм зношування.

OPERATIONAL CHARACTERISTICS OF ELECTRIC-SPARK COATINGS ON THE BASE OF REFRACTORY BORIDES

E. P. Puhachevska

The experimental results in fretting-corrosion conditions of developed electric-spark coatings of $TiCrB_2-Ni-Cr$ system are reflected. The comparison analysis of wear intensity of developed coatings and WC coatings are conducted. The influence of relative displacement amplitude and loading on coating wear intensity is shown. The coating wear intensity decreases with loading increasing due to influence of relative displacement amplitude decreasing and realization of oxidative wear mechanism of developed coatings. The wear mechanism of coatings is investigated. It is shown that oxidative wear mechanism provides wear resistance increase in comparison with adhesive one, which is realized on titanium alloy VT-22. The wear intensity of $TiCrB_2-Ni-Cr$ system coatings is correspond to wear intensity of WC6 alloys and it is low in 2-5 times than wear intensity of titanium alloy VT-22.

Key words: fretting-corrosion, electric-spark coatings, titanium-chrome diboride, wear intensity, oxidative wear mechanism.

Пугачевская Евгения Петровна – канд. техн. наук, доцент кафедры технологий аэропортов, Национальный авиационный университет, Киев, Украина, e-mail: JaneD2003@ukr.net.