

УДК 620.198:669.018.95(045)

А.П. УМАНСКИЙ¹, М.С. СТОРОЖЕНКО², В.В. АКОПЯН¹, И.С. МАРЦЕНЮК¹¹ *Институт проблем материаловедения НАН Украины, Киев,*² *Национальный авиационный университет, Киев, Украина*

ЭЛЕКТРОИСКРОВОЕ УПРОЧНЕНИЕ СТАЛИ КОМПОЗИЦИОННЫМИ МАТЕРИАЛАМИ СИСТЕМЫ TiB₂-(Fe-Mo)

Изучена кинетика массопереноса электродов из разработанных композиционных материалов ТБФМ системы TiB₂-(Fe-Mo) при электроискровом легировании стали. Исследовано влияние соотношения тугоплавкой и металлической фаз в композиционных материалах ТБФМ на технологичность нанесения и особенности формирования структурно-фазового состава электроискровых покрытий. Установлено, что с увеличением в материале электрода количества металлической фазы (Fe-Mo) улучшается технологичность процесса электроискрового легирования, но уменьшается износостойкость полученных покрытий в условиях абразивного изнашивания.

Ключевые слова: композиционный материал, диборид титана, железо, молибден, электроискровое легирование, кинетика массопереноса, покрытие, износостойкость.

Введение

Работоспособность и надежность двигателя, стабильность его технико-экономических характеристик в значительной степени зависят от износостойкости рабочих поверхностей деталей, которые в процессе эксплуатации подвергаются воздействию повышенных температур, переменных нагрузок и высоких скоростей. В результате износа контактирующих поверхностей пар трения увеличиваются рабочие зазоры, что приводит к падению мощности, увеличению вибрации и шума, ухудшению экономичности двигателя в целом. Поэтому актуальной задачей двигателестроения является увеличение износостойкости поверхностного слоя деталей.

В мировой практике по упрочнению и восстановлению деталей двигателей внутреннего сгорания (ДВС) широко применяют различные защитные покрытия. Для локального нанесения покрытий, например, при упрочнении верхней головки шатуна, а также для восстановления поверхностей с малыми величинами износа наиболее перспективным является метод электроискрового легирования (ЭИЛ). По сравнению с газотермическими методами, технология нанесения электроискровых покрытий обладает такими преимуществами, как простота оборудования, экономия материала и небольшие энергозатраты.

Эффективность применения электроискровых покрытий определяется применением электродных материалов, которые должны обеспечивать, с одной стороны, технологичность процесса нанесения покрытия, а с другой – высокий уровень физико-

механических и эксплуатационных свойств поверхности.

Традиционно в качестве материалов легирующих электродов используют чистые металлы (Mo, Cr), металлические сплавы (Fe-Cr, Fe-C, Ni-Cr, Ni-Mo), а также стандартные твердые сплавы марок ТК и ВК [1]. Недостаточная износостойкость металлических покрытий, высокая эрозионная стойкость твердых сплавов, а также возрастающая дефицитность вольфрама, приводят к необходимости создания новых материалов для ЭИЛ.

В последнее время большое внимание уделяется разработке ЭИЛ-покрытий из композиционных материалов на основе тугоплавких соединений титана, которые обладают высокой твердостью и износостойкостью [2]. Применение диборида, карбида и нитрида титана в качестве электродов в чистом виде ограничено их высокой эрозионной стойкостью, что не позволяет получать покрытия значительной толщины [1, 3, 4].

Для снижения хрупкости тугоплавкого соединения и увеличения производительности процесса электроискрового легирования целесообразно введение металлической связки. Материал металлической связки должен смачивать тугоплавкую фазу композита, поскольку в этом случае эродируемая износостойкая частица обволакивается легкоплавкой компонентой, что обеспечивает хорошее сцепление с легируемой поверхностью.

Для достижения высокой адгезии покрытия с подложкой и эффективного формирования легированного слоя компоненты металлической связки электродного материала должны образовывать с

материалом катода твердые растворы или интерметаллиды и иметь близкий с ним коэффициент термического расширения.

В работе [5] изучали эффективность применения в качестве электродов материалов на основе карбида титана со связками Ni–Mo, Ni–Cr и Ni–Co–Cr. Установлено, что ЭИЛ-покрытие на основе TiC-20%(Ni-Mo) характеризуется равномерной структурой и высокой износостойкостью.

В работе [6] для электроискрового упрочнения стали использовали электроды ТБФХ на основе TiB₂ с металлической связкой (Fe–Cr). Показано что наличие в связке железа способствует высокой адгезии покрытия с поверхностью стали. За счет тугоплавкой составляющей микротвердость поверхностного слоя увеличивается до 30 МПа.

В работе [7] выявлено, что в результате электроискрового легирования стали электродами на основе TiB₂-20%SiC с металлической связкой Ni-20%Cr на поверхности формируется упрочненный слой, который представляет собой матрицу из твердого раствора на основе железа, которая дисперсно упрочнена включениями диборида титана. Разработанные ЭИЛ-модифицированные слои имеют высокий уровень триботехнических характеристик в условиях трения без смазки и повышают износостойкость стали 30ХГСА в 3-4 раза.

В работе [8] исследована кинетика массопереноса при нанесении электроискровых покрытий композитами на основе TiB₂ с добавками 5, 10, 15, 20% Mo. Авторами публикации установлено, что основными фазовыми составляющими в материале и покрытии являются TiB₂ и MoB. В то же время, в работе выявлено, что с увеличением легкоплавкой составляющей в материале электрода улучшается технологичность нанесения покрытий.

Как известно, бориды молибдена, как и диборид титана, являются достаточно твердыми и хрупкими соединениями. Поэтому для увеличения технологичности процесса нанесения покрытия целесообразно введение в систему TiB₂-Mo пластичного железа, которое будет способствовать высокой адгезии покрытия со сталью.

В результате исследования закономерностей смачивания и контактного взаимодействия в системах TiB₂-Fe/(Fe-Mo), установлено, что в качестве металлической связки для новых композиционных материалов ТБФМ на основе диборида титана целесообразно использовать сплав Fe-13мас.%Mo [9].

Целью данной работы является исследование особенностей формирования структуры покрытий нанесенных на сталь электроискровым методом с использованием в качестве электродов композиционных материалов системы TiB₂-(Fe-13мас.%Mo).

Методика и материалы

В качестве электродов для нанесения покрытий использовали разработанные композиционные материалы ТБФМ системы TiB₂-(Fe-13%Mo) с различным содержанием металлической фазы. Варьирование соотношения тугоплавкой и металлической фаз в композите позволит определить влияние состава материала на технологичность процесса нанесения и свойства полученных покрытий. Электроды ТБФМ с 20, 40, 60, 80мас.%(Fe-13мас.%Mo) получали методом спекания в вакууме при температуре 1540 °С. Композиты ТБФМ имеют гетерофазную структуру, которая состоит из зерен диборида титана и сложных боридов титана, железа и молибдена и металлической фазы представляющей собой твердый раствор молибдена в железе.

Электроискровое легирование стали 65Г осуществляли на установке "ALIER 52" на 5 режиме (амплитудное значение тока импульса I=200 А, энергия импульса E_{им}=2,52 Дж, продолжительность импульса t_{им}=700 мкс).

В условиях проведения эксперимента определяли влияние состава электродов TiB₂-(Fe-13%Mo) на кинетику массопереноса при электроискровом легировании стали. Для этого через каждую минуту нанесения фиксировали изменение массы электрода (ΣΔ_а) и образца площадью 1 см² (ΣΔ_к).

Триботехнические испытания разработанных покрытий осуществляли на лабораторной установке при трении образцов в абразивной массе (песок). Для сравнения в таких же условиях испытывали ЭИЛ-покрытие на основе ВК-6.

Структуру и фазовый состав покрытий изучали на растровом электронном микроскопе. Микротвердость измеряли на микротвердомере ПМТ-3 при нагрузке 0,05 Н.

2. Результаты исследований и их обсуждение

На рис. 1 представлены кинетические зависимости изменения массы катода и анода при электроискровом легировании стали (на 5 режиме) электродами ТБФМ с различным содержанием металлической фазы. Положительный прирост массы катода наблюдается только при использовании в качестве электрода композита ТБФМ80 с 80мас.%(Fe-Mo). В процессе легирования стали электродами ТБФМ с 20, 40 и 60мас. % (Fe-Mo) фиксировали уменьшение массы катода. Характерной особенностью нанесения покрытий разработанными электродами ТБФМ является возрастание потери массы на аноде с увеличением количества металлической фазы.

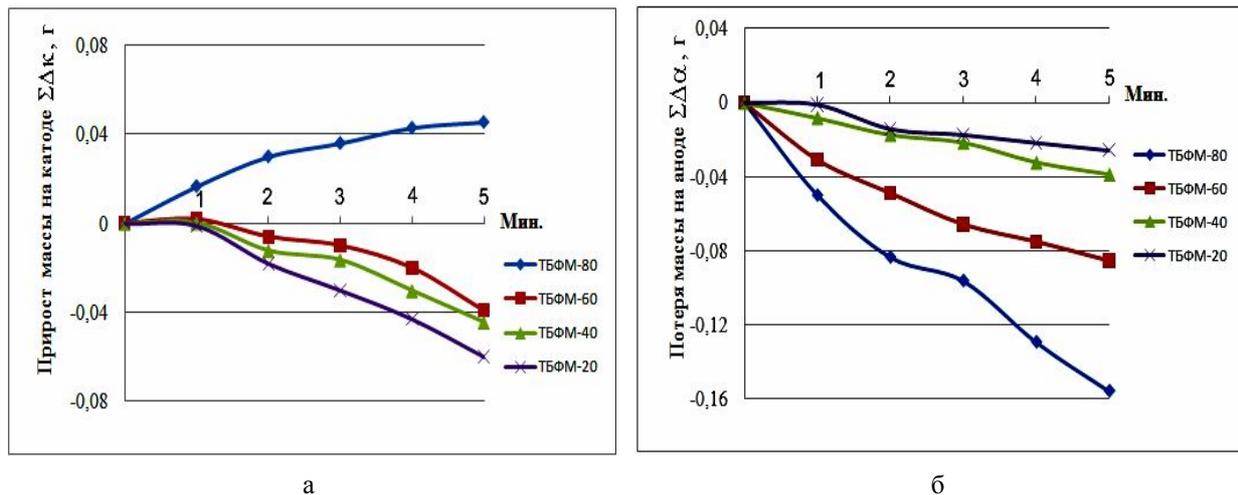


Рис. 1. Кинетика изменения массы анода и катода в процессе ЭИЛ электродами ТБФМ: а – прирост массы на катоде; б – потеря массы на аноде

Нанесение покрытия ТБФМ20 сопровождается сильным растрескиванием электрода. Полученное покрытие системы $TiB_2-20\text{мас.}\%(Fe-Mo)$ имеет дискретную структуру. Методами оптической металлографии и микрорентгеноспектрального анализа в поверхностном слое были обнаружены отдельные участки с гетерофазной структурой, которая представляет собой металлическую матрицу упрочненную зернами диборида титана размером 5-7 мкм (рис. 2). Металлическая фаза является собой твердый раствор титана и молибдена в железе. Размер зерен TiB_2 в покрытии соответствует их исходному размеру в материале электрода. Микротвердость таких участков составляет 14-16 ГПа у поверхности и снижается к основе до 9 ГПа, микротвердость основы оставляет 1,8 ГПа.

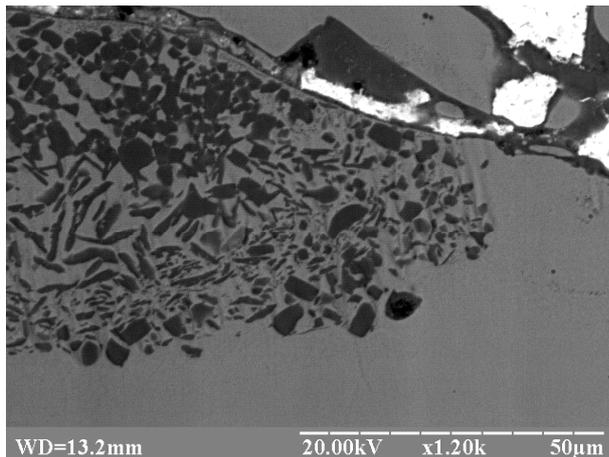
Процесс формирования ЭИЛ-покрытий системы $TiB_2-20\text{мас.}\%(Fe-Mo)$ можно объяснить следующим образом. В процессе электроискрового легирования происходит хрупкое разрушение материала электрода. Это приводит к тому, что большие конгломераты композиционного материала попадают в микрованну на поверхности катода. При этом происходит расплескивание микрованны и частичное перемешивание частиц композита с материалом стальной основы. Так как TiB_2 имеет меньший удельный вес по сравнению со сталью, а также за счет процесса расплескивания микрованны масса катода в процессе ЭИЛ уменьшается.

Полученные покрытия ТБФМ40 и ТБФМ60, так же как и ТБФМ20, характеризуются дискретной структурой, но при этом наблюдается более равномерное распределение упрочненных участков (рис. 2). Размер включений тугоплавких фаз в покрытиях уменьшается с увеличением количества металлической составляющей в материале электро-

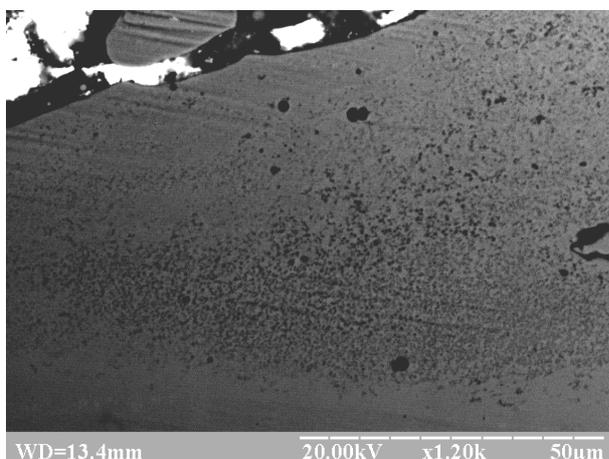
да. В структуре электроискровых покрытий системы $TiB_2-40\text{мас.}\%(Fe-Mo)$ и $TiB_2-60\text{мас.}\%(Fe-Mo)$ равномерно распределены зерна боридов размером 1-2 мкм. Микротвердость ЭИЛ-покрытия ТБФМ40 у поверхности составляет 12-16 ГПа, а ТБФМ60 – 12-14 ГПа.

При увеличении в материале электрода количества (Fe-Mo), повышается электропроводность, что значительно интенсифицирует процессы массопереноса. В процессе ЭИЛ стали электродами ТБФМ40 и ТБФМ60 формирование покрытия происходит как за счет хрупкого разрушения электрода так и расплавления металлической фазы. Во время электроискрового легирования происходит расплавление металлической связки и перемешивание ее с материалом стальной основы. Зерна тугоплавких боридов захватываются конвективными потоками расплава и также переносятся в поверхностный слой стали. Под воздействием механических факторов, а также за счет высоких температур в зоне микрованны происходит разложение зерен TiB_2 и измельчение включений сложных боридов титана и молибдена, исходный размер которых в композитах ТБФМ40 и ТБФМ60 составляет 20-30 мкм.

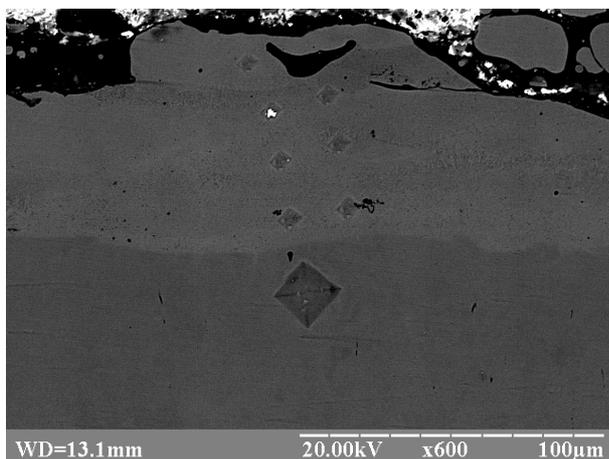
При увеличении количества металлической составляющей в материале электрода до 80мас.% обеспечивается положительный прирост массы катода при наибольшей потере массы на аноде. В процессе электроискрового легирования стали композитом $TiB_2-80\text{мас.}\%(Fe-Mo)$ происходит формирование модифицированного упрочненного слоя на основе твердого раствора молибдена и титана в железе (рис. 2, в). Следует отметить, что наличие значительного количества металлической фазы не снижает существенно микротвердость поверхностного слоя ТБФМ, которая в данном случае составляет 12-14 ГПа.



а



б



в

Рис. 2. Структура ЭИЛ-покрытий ТБФМ: а – ТБФМ20; б – ТБФМ60; в – ТБФМ 80

Разработанные ЭИЛ-покрытия системы TiB_2 -(Fe-Mo) были исследованы на стойкость к абразивному износу (рис. 3). Результаты триботехнических испытаний свидетельствуют о том, что износостойкость покрытий возрастает с уменьшением количества металлической фазы в материале легирующего

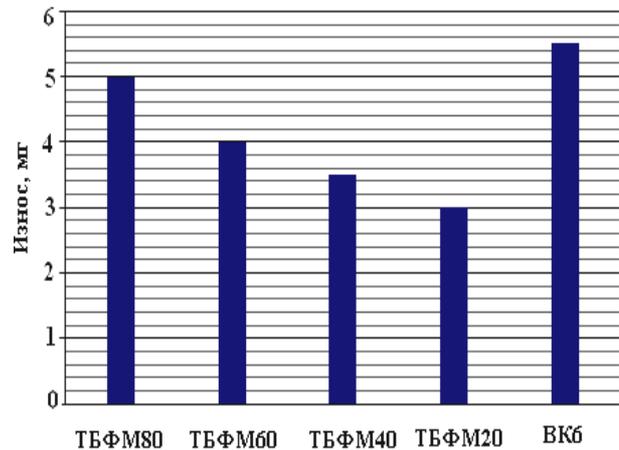


Рис. 3. Износостойкость ЭИЛ-покрытий ТБФМ

электрода. В условиях абразивного износа отдельные конгломераты в структуре ЭИЛ-покрытий ТБФМ20, ТБФМ40 и ТБФМ60 являются препятствием для внедрения и перемещения абразивных частиц. Равномерная матричная структура модифицированного слоя ТБФМ80 не содержит упрочняющих фаз, которые бы эффективно препятствовали действию абразивных частиц, в результате чего происходит микроцарапание по всей площади образца.

Выводы

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

- при электроискровом легировании стали разработанными электродами ТБФМ с 20, 40 и 60%(Fe-Mo) формируются покрытия в виде отдельных конгломератов с гетерофазной структурой, которая состоит из зерен диборида титана в матрице на основе железа. При увеличении количества металлической фазы в электроде до 80мас.% на поверхности стали происходит формирование равномерного упрочненного слоя.

- увеличением содержания (Fe-Mo) в материале электрода улучшается технологичность процесса электроискрового легирования, но при этом уменьшается износостойкость полученных ЭИЛ-покрытий в условиях абразивного изнашивания.

Литература

1. *Электродные материалы для электроискрового легирования [Текст] / А.Д. Верхотуров, И.А. Подчерняев., Л.Ф. Прядко, Ф.Ф. Егоров – М.: Наука, 1988. – 200 с.*
2. *Самсонов, Г.В. Тугоплавкие соединения [Текст] / Г.В. Самсонов, И.М. Виницкий. – М.: Металлургия, 1976. – 557 с.*
3. *Alfintseva, R.A. The applications of refractory metal borides as electrodes in electrospark machining*

[Text]/ R.A. Alfintseva, I.G. Bodrova, A. D. Verkhoturov // *J. Less Common Metals*. – 1979. – №67. – P. 443 – 448.

4. Agarwal, A. *Synthesis of boride coating on steel using high energy density processes: comparative study of evolution of microstructure* [Text] / A. Agarwal // *Materials Characterization*. – 1999. – №42. – P. 31 – 44.

5. Электроискровое легирование стали безвольфрамовыми твердыми сплавами [Текст] / М.С. Ковальченко, А.В. Паустовский, С.Н. Кириленко и др. // *Порошковая металлургия*. – 1984. – № 6. – С. 47 – 50.

6. Формування електроіскрових покриттів з композиційних матеріалів на основі карбиду і дибориду титану хрому [Текст] / В.П. Коновал, О.П. Уманський, А.Д. Панасюк та інші. // *Сверхтвердые материалы*. – 2009. – № 4. – С. 84 – 91.

7. Стороженко, М.С. Підвищення зносостійкості сталі 30ХГСА електроіскровим легуванням ком-

позитами на основі TiB_2-SiC [Текст] / М.С. Стороженко, О.П. Уманський, О.А. Тамаргазин // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2010. – № 4 (71). – С. 21 – 25.

8. Закономерности формирования покрытий на стали при электроискровом легировании гетерофазными материалами TiB_2-Mo [Текст] / А.Д. Верхотуров, Ф.Ф. Егоров, И.А. Подчерняева и др. // *Порошковая металлургия*. – 1983. – № 12. – С. 61 – 63.

9. Уманський О.П. Дослідження закономірностей змочування та контактної взаємодії в системах $TiB_2-(Fe-Mo)$ [Текст] / О.П. Уманський, В.В. Акоюн, М.С. Стороженко // *Матеріали II Міжнародної конференції молодих вчених «Інженерна механіка та транспорт»* – Львів – 2011. – С. 62.

Поступила в редакцію 23.05.2012

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.Д. Панасюк, Інститут проблем матеріалознавства НАН України, Київ.

ЕЛЕКТРОІСКРОВЕ ЗМІЦНЕННЯ СТАЛІ КОМПОЗИЦІЙНИМИ МАТЕРІАЛАМИ СИСТЕМИ $TiB_2-(Fe-Mo)$

О.П. Уманський, М.С. Стороженко, В.В. Акоюн, І.С. Марценюк

Вивчено кінетику масопереносу електродів з розроблених композиційних матеріалів ТБФМ системи $TiB_2-(Fe-Mo)$ при електроіскровому легування сталі. Досліджено вплив співвідношення тугоплавної і металевої фаз в композиційних матеріалах на технологічність нанесення і особливості формування структурно-фазового складу ЕІЛ-покриттів. Встановлено, що зі збільшенням в матеріалі електроду вмісту металевої фази (Fe-Mo) підвищується технологічність процесу електроіскрового легування, але зменшується зносостійкість отриманих покриттів в умовах абразивного зношування.

Ключові слова: композиційний матеріал, диборид титану, залізо, молібден, електроіскрове легування, кінетика масопереносу, покриття, зносостійкість.

STEEL HARDENING BY ELECTRIC-SPARK ALLOYING WITH COMPOSITE MATERIALS OF $TiB_2-(Fe-Mo)$ SYSTEM

A.P. Umanskyi, M.S. Storozhenko, V.V. Akopian, I.S. Marzenyuk

The mass transfer kinetics of the developed electrodes of $TiB_2-(Fe-Mo)$ system at electric-spark alloying of the steel substrate have been studied. The influence of metallic phase content in ТБФМ electrodes on the technological effectiveness and formation of electric-spark coatings structure has been investigated. The coatings microhardness and abrasive wear-resistance have been determined. It is shown, that increase of (Fe-Mo) phase content in ТБФМ electrodes leads to the improvement of electric spark alloying effectiveness. The erosive wear-resistance of the developed coatings decreases with the increase of metal phase content in electrode material.

Key words: composite material, titanium boride, iron, molybdenum, electric-spark alloying, mass transfer kinetics, coating, wear-resistance.

Уманський Александр Павлович – д-р техн. наук, ведучий научний співробітник Інститута проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН, Київ, Україна, kermet@voliacable.com.

Стороженко Марина Сергеевна – канд. техн. наук., доцент кафедри технологій аеропортів Аерокосмічного інститута Національного авіаційного університету, Київ, Україна, storozhenkomary@ukr.net.

Акоюн Владимир Вячеславович – аспірант Інститута проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН, Київ, Україна.

Марценюк Ирина Семеновна – научн. співробітник 49 відділу Інститута проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН, Київ, Україна.