

УДК 629.73 (045)

М.С. СТОРОЖЕНКО¹, О.П. УМАНСЬКИЙ², О.А. ТАМАРГАЗИН¹¹ *Національний авіаційний університет, Україна*² *Інститут проблем матеріалознавства НАН, Україна*

ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ СТАЛІ 30ХГСА ЕЛЕКТРОІСКРОВИМ ЛЕГУВАННЯМ КОМПОЗИТАМИ НА ОСНОВІ TiB₂-SiC

Вивчено кінетику масопереносу електродів з розроблених керметів ТБКНХ на основі TiB₂-20%SiC з 20, 30, 40 % (мас.) металевої зв'язки Ni-20%Cr при електроіскровому легуванні сталі 30ХГСА. Досліджено особливості формування структури модифікованого в результаті електроіскрового легування поверхневого шару сталі в залежності від вмісту металевої зв'язки в електродах ТБКНХ. Встановлено механізми зношування та досліджено триботехнічні характеристики отриманих покриттів в умовах тертя ковзання без мастила у порівнянні зі сталлю та ЕІЛ-покриттям з ВК-6. Показана перспективність застосування розроблених керметів для нанесення зносостійких покриттів для екстремальних умов експлуатації.

Ключові слова: кермет, диборид титану, карбід кремнію, електроіскрове легування, кінетика масопереносу, покриття, зносостійкість, триботехнічні властивості.

Вступ

Вирішення проблеми підвищення надійності і ресурсу роботи деталей авіаційної техніки нерозривно пов'язане зі збільшенням зносостійкості рухомих контактуючих пар, а також з підвищенням конструктивної міцності елементів конструкцій. Саме тому на сьогоднішній день велика увага приділяється створенню нових композиційних матеріалів триботехнічного призначення зі складним комплексом фізико-механічних властивостей. Однак безпосереднє використання композиційних матеріалів для виготовлення деталей машин і механізмів часто обмежується значними технологічними труднощами, а також відносно високою вартістю. Тому в ряді випадків найбільш ефективним методом вирішення складних технічних проблем є створення на поверхні виробів з конструкційних матеріалів зносостійких покриттів, для яких першочергового значення набуває поєднання високої твердості з пластичними властивостями. Перспективними в цьому відношенні є покриття на основі композиційної кераміки, в яких можна цілеспрямовано керувати фазовим складом та структурними ефектами, що дозволяє конструювати поверхневий шар з необхідними експлуатаційними властивостями.

В Інституті проблем матеріалознавства ім. Францевича НАН України було розроблено кермети ТБКНХ на основі TiB₂-20%SiC з металевою зв'язкою Ni-20%Cr, які мають високу зносостійкість в парі зі сталлю при терті ковзання без мастила [1]. Було встановлено, що в процесі тертя на поверхні

керметів ТБКНХ утворюються оксиди TiO₂, V₂O₃, SiO₂, які, зв'язуючись в аморфну плівку, що має низьку схильність до адгезійної взаємодії зі сталлю, захищають поверхню матеріалу від пошкоджень [2]. Для вивчення можливості створення зносостійких покриттів на основі розроблених керметів доцільним є дослідження процесу електроіскрового (ЕІЛ) зміцнення сталі електродами ТБКНХ.

В ряді напрямків зміцнювальних технологій метод ЕІЛ вирізняється можливістю нанесення будь-яких струмопровідних матеріалів, в тому числі тугоплавких металів і сполук, а також високою міцністю зчеплення зміцнюваного шару з основою, можливістю локального нанесення покриттів без помітної деформації деталей. Крім того, метод ЕІЛ відноситься до екологічно чистих технологій, характеризується низькою енергоємністю, простотою процесу, малими габаритами обладнання. Оптимізація властивостей ЕІЛ-покриттів передбачає відповідний вибір складу покриття, його структури, пористості і адгезії з врахуванням робочої температури, доступності і вартості матеріалу покриття.

Аналіз літературних даних показав [3 – 6], що для ЕІЛ широко застосовуються чисті метали (Mo, Cr), металеві сплави (Fe-Cr, Fe-C, Ni-Cr, Ni-Mo), графіт (ЕГ-2, ЕГ-4) та тверді сплави типу ВК і ТК. При використанні електродів із матеріалів перших трьох класів в багатьох випадках не вдається отримати покриття з необхідними високими експлуатаційними характеристиками. Тверді сплави не завжди задовольняють вимогам, що висувуються до електродних матеріалів в зв'язку з їх високою ерозійною

стійкістю і відповідно низьким коефіцієнтом масопереносу, а дефіцитність вольфраму ставить питання розробки безвольфрамових ЕІЛ-покриттів.

При формуванні покриттів керметами ТБКНХ наявність металевої зв'язки Ni-20%Cr повинна сприяти збільшенню коефіцієнту масопереносу та забезпечити високу адгезію компонентів електроду з сталюю основою, а тугоплавка складова на основі дибориду титану-карбіду кремнію забезпечити високий рівень фізико-механічних та експлуатаційних властивостей.

Таким чином, метою даної роботи є дослідження особливостей формування структури та трибологічних властивостей покриттів нанесених на сталь 30ХГСА електроіскровим методом з використанням електродних матеріалів на основі дибориду титану-карбіду кремнію.

1. Об'єкти і методи дослідження

ЕІЛ-покриття наносили на сталь 30ХГСА з використанням розроблених електродних матеріалів ТБКНХ на основі тугоплавкої складової $TiB_2-20\%SiC$ з 20, 30, 40% (мас.) металевої зв'язки Ni-20%Cr.

Електроди ТБКНХ отримували методом спікання в вакуумі при температурі 1650 °С в печі СШВ протягом однієї години. Електроіскрове легування сталі проводили на установці ALIER-50, яка дозволяє наносити покриття на семи режимах і за рахунок цього варіювати товщину отриманих покриттів. В умовах проведення експерименту ЕІЛ-покриття наносили протягом 8 хвилин на 6-му режимі (амплітудне значення струму імпульсу $I=200$ А, енергія імпульсу $E_{им}=2,52$ Дж, тривалість імпульсу $t_{им}=700$ мкс) з метою забезпечення більшої товщини (до 200 мкм). При цьому через кожну хвилину нанесення фіксували зміну ваги електроду і зразка площею 1 см². По отриманих даних будували кінетичні залежності зміни ваги анода $\sum\Delta a$ і катода $\sum\Delta k$ та розраховували коефіцієнт масопереносу ($K_n = (\sum\Delta k / \sum\Delta a) \cdot 100\%$).

Триботехнічні дослідження розроблених ЕІЛ-покриттів проводили в умовах тертя ковзання без мастильного матеріалу на установці МТ-68 за схемою вал-вкладиш в парі зі сталю 65Г в широкому діапазоні швидкостей та навантажень [7]. Для порівняння в таких же умовах і випробовували ЕІЛ-покриття на основі ВК-6 та сталь 30ХГСА.

Склад і структуру покриттів та вторинних фаз, що утворилися в процесі тертя, вивчали на електронному мікроаналізаторі «Сamebax SX-50». Мікротвердість вимірювали на мікротвердомірі ПМТ-3 при навантаженні 0,1Н.

2. Результати досліджень та їх обговорення

При нанесенні покриттів на сталь 30ХГСА розробленими електродами ТБКНХ з 20, 30 та 40% (мас.) зв'язки відмічається загальна тенденція процесу ЕІЛ: в першу хвилину легування процес відбувається дуже інтенсивно, при цьому спостерігається значне збільшення товщини легованого шару (до 130 мкм), однак в наступні хвилини ефективність ЕІЛ зменшується (рис. 1). Процес легування розробленими електродами характеризується порівняно високим коефіцієнтом масопереносу (до 85 %) в першу хвилину нанесення, а потім різко зменшується (до 30 %).

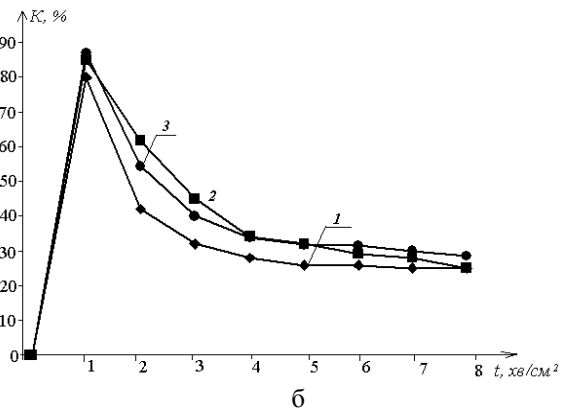
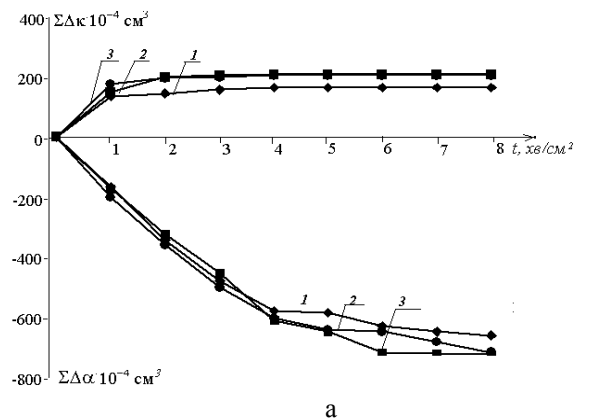


Рис. 1. Кінетика масопереносу при ЕІЛ сталі 30ХГСА електродами ТБКНХ: а – приріст катода та ерозія аноду; б – коефіцієнт масопереносу 1 – ТБКНХ20; 2 – ТБКНХ30; 3 – ТБКНХ40

Починаючи з другої-третьої хвилини процесу не відбувається приросту товщини покриття, а з 4–5 хвилини не спостерігається ерозія електродного матеріалу. Це пов'язано зі специфікою процесу ЕІЛ сталі розробленими електродами ТБКНХ: вже з перших хвилин ЕІЛ відбувається інтенсивне формування на оброблюваній поверхні легованого шару, який складається з компонентів електроду, сталюї

основи та продуктів їх взаємодії з навколишнім середовищем. Під час ЕІЛ відбувається розплавлення металеві зв'язки електроду, яка являє собою твердий розчин кремнію в ніхромі, та перемішування з матеріалом сталі на поверхні. Диборид титану захоплюється конвективними потоками розплаву і переноситься в поверхневий шар сталі. За рахунок оксидних фаз, що утворюються в процесі легування, на поверхні сталі відбувається формування діелектричного шару, що погіршує параметри процесу ЕІЛ. З іншого боку, на робочій поверхні електродів за рахунок зворотного масопереносу компонентів підкладки і їхнього високотемпературного окиснення також формуються оксидні плівки TiO_2 , Fe_2O_3 , SiO_2 , Cr_2O_3 , що також погіршують ефективність процесу.

На ефективність процесу ЕІЛ впливає зміна співвідношення фазових складових в матеріалі електроду. При використанні в якості легуючого матеріалу ТБКНХ20, що містить 20% зв'язки Ni-20%Cr, процес ЕІЛ характеризується найменшим приростом товщини легуючого шару ($h=150-165\text{мкм}$), при нанесенні покриття спостерігалось почервоніння та розтріскування електроду вже з першої хвилини процесу. Це свідчить про недостатню кількість пластичної складової електроду для забезпечення технологічності процесу ЕІЛ. Матеріали ТБКНХ30 ТБКНХ40 забезпечують отримання легованого шару більшої товщини ($h=180-200\text{мкм}$) у порівнянні з ТБКНХ20 ($h=150-165\text{мкм}$).

Фазовий склад легованого шару суттєво відрізняється від складу легуючого електроду за рахунок взаємодії матеріалів в процесі ЕІЛ. В процесі ЕІЛ електродними матеріалами ТБКНХ на сталі формується гетерофазна структура, яка являє собою матрицю з твердого розчину кремнію, нікелю та хрому в сталі (Fe-Ni-Cr-Si), що дисперсно зміцнена включеннями дибориду титану (рис. 2). Це підтверджується даними РФА, за результатами якого фазовий склад ЕІЛ-покриттів на основі композиційних матеріалів ТБКНХ з різним вмістом металеві зв'язки однаковий, основними фазами, що входять до складу покриття, є диборид титану, ніхром, фаза на основі заліза з розчиненими в ній нікелем, хромом та кремнієм. Дисперсність включень дибориду титану в матеріалі покриття залежить від кількості металеві зв'язки в електроді: зі збільшенням металеві зв'язки від 20 до 40% розмір включень TiB_2 зменшується в середньому від 4 до 1 мкм. Оскільки розмір зерен дибориду титану в керметах ТБКНХ30 та ТБКНХ40 в середньому сягає 6–8 мкм [2], то імовірно в процесі ЕІЛ відбувається подрібнення компонентів електродів внаслідок механічних та термічних впливів іскрового розряду.

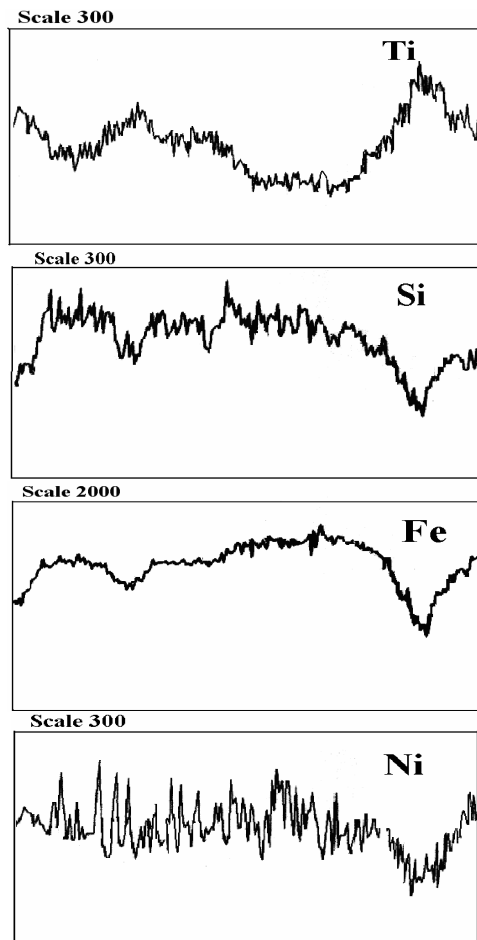
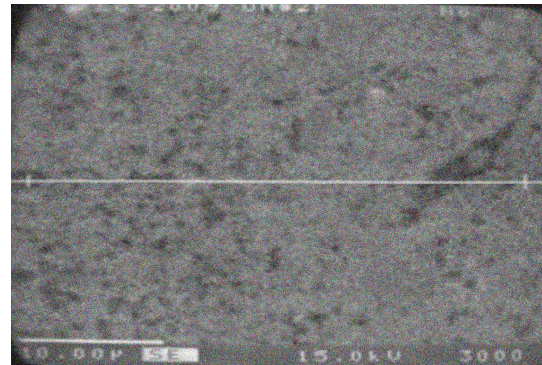


Рис. 2. Структура ЕІЛ-шару сталі на основі композиційного матеріалу ТБКНХ30

Між сталлю та покриттям не існує чіткої межі розділу, що свідчить про формування на сталі в процесі ЕІЛ не покриття, а модифікованого дисперсно зміцненого шару глибиною 300–400 мкм на зразок композиційного матеріалу з матричною структурою. Зміна мікротвердості по товщині легованого шару сталі на основі керметів ТБКНХ з 20, 30 та 40% металеві зв'язки має однаковий характер: H_c у поверхні становить 21–23 ГПа і плавно знижується в напрямку до сталі до $H_c = 4,8-4,6$ ГПа (рис. 3).

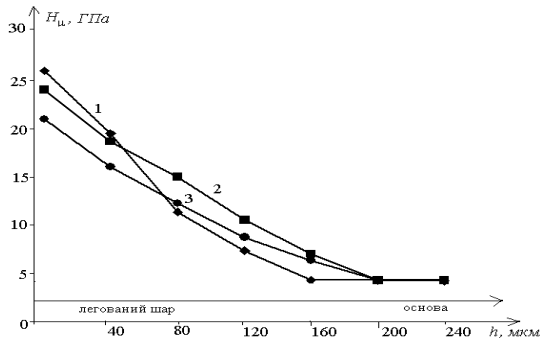


Рис. 3. Зміна мікротвердості по глибині легованого шару: 1 – ЕІЛ-шар ТБКНХ20; 2 – ЕІЛ-шар ТБКНХ30; 3 – ЕІЛ-шар ТБКНХ40

Формування модифікованого легованого шару на поверхні сталі має ряд переваг в порівнянні з класичним ЕІЛ-покриттям: в умовах тертя під дією контактних навантажень ЕІЛ-покриття може відколюватись або відшаровуватись внаслідок недостатньої адгезії з основою, в той час як рівномірна дрібнодисперсна структура ЕІЛ-шару на основі ТБКНХ по всій площі зразка має забезпечити високі експлуатаційні властивості. Крім того, оскільки при терті ковзання без мастила в контактній зоні розвиваються високі температури, то суттєвим є той факт, що в даному випадку коефіцієнт термічного розширення не матиме різкого стрибка по глибині модифікованого шару.

Триботехнічні дослідження в умовах тертя ковзання без мастила показали, що розроблені ЕІЛ-поверхні на основі ТБКНХ мають значно меншу інтенсивність зношування та коефіцієнт тертя в порівнянні зі сталлю 30ХГСА (рис. 4).

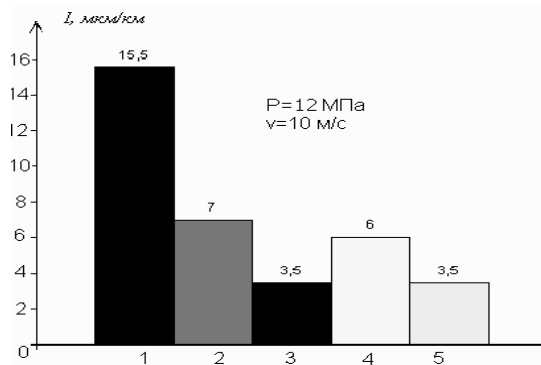


Рис. 4. Інтенсивність зношування в умовах тертя ковзання без мастила при $P=12$ МПа, $v=10$ м/с: 1 – Сталь 30ХГСА; 2 – ЕІЛ покриття ТБКНХ20; 3 – ЕІЛ покриття ТБКНХ30; 4 – ЕІЛ покриття ТБКНХ40; 5 – ВК-6

В умовах проведення експерименту ($P=12$ МПа, $v=10$ м/с) найменші значення інтенсивності зношування характерні для ЕІЛ-поверхні на основі ТБКНХ30 ($I=3,5$ мкм/км) і ЕІЛ-покриття на основі ВК-6 ($I=3,5$ мкм/км). При цьому покриття на основі

ТБКНХ мають кращі антифрикційні властивості ніж сталь 30ХГСА ($f=0,33-0,38$) і покриття ВК-6 ($f=0,2-0,34$); найменший коефіцієнт тертя ЕІЛ-поверхні на основі ТБКНХ30 становить $f=0,18-0,22$.

Механізм зношування розроблених покриттів в умовах тертя ковзання без мастила визначається процесами формування в зоні трибоконтакту вторинних структур в вигляді оксидних плівок складного компонентного складу: TiO_2 , SiO_2 , B_2O_3 та Fe_2O_3 , які відіграють роль твердого мастила та зменшують коефіцієнт тертя, що дозволяє отримувати високі триботехнічні характеристики.

Інтенсивність формування вторинних структур в вигляді захисних окисних плівок залежить від кількості металевої зв'язки в матеріалі електроду, а отже і від структури ЕІЛ-поверхонь. Окисні плівки на поверхні ЕІЛ-шару на основі ТБКНХ30 більш щільні та розміщені більш рівномірно, ніж на поверхні покриття ТБКНХ20. Поверхня тертя ЕІЛ-шару ТБКНХ30 не зазнає значних пошкоджень в процесі тертя, спостерігаються лише сліди направленої пластичної деформації без явних ознак адгезійної взаємодії. Покриття на основі ТБКНХ40 також характеризується утворенням в процесі тертя окисної плівки, однак на поверхні виявлено джерела адгезійної взаємодії з матеріалом сталевого контр тіла.

Висновки

Таким чином, було встановлено, що в процесі електроіскрового легування сталі 30ХГСА електродами ТБКНХ на основі композиційного матеріалу ($TiB_2-20\%SiC$) з вмістом 20, 30, 40% зв'язки ($Ni-20\%Cr$) формується гетерофазна структура, яка являє собою матрицю $Fe-Ni-Cr-Si$, дисперсно зміцнену зернами дибориду титану, розміром 1–5 мкм.

Нанесення захисних покриттів з матеріалів на основі ТБКНХ на сталь 30ХГСА приводить до суттєвого покращення триботехнічних властивостей. Триботехнічні характеристики розроблених ЕІЛ-поверхонь залежать від кількості металевої зв'язки в легуючому електроді. В умовах тертя ковзання при $v=10$ м/с та $P=12$ МПа оптимальним є застосування ЕІЛ-шару на основі ТБКНХ30, що підвищує зносостійкість сталі в 4–4,5 рази та знижує коефіцієнт тертя до $f=0,18-0,21$. Механізм зношування розроблених покриттів визначається процесами формування в зоні трибоконтакту вторинних структур в вигляді боросилікатних плівок на основі TiO_2 , SiO_2 , B_2O_3 , Fe_2O_3 , які відіграють роль твердого мастила та зменшують коефіцієнт тертя. Отже, розроблені кермети можуть бути використані в якості електродів для зміцнення сталевих деталей машин, що працюють в умовах тертя без мастила при швидкостях до 10 м/с та навантаженнях до 12 МПа.

Література

1. Пат. №42091 Україна, МПК C22C 29/06. Композиційний зносостійкий матеріал на основі дибориду титану / Панасюк А.Д., Уманський О.П., Костенко О.Д., Стороженко М.С., Тамаргазін О.А.; заявник і власник Інститут проблем матеріалознавства ім. Францевича НАН України. – Заявл. 30.12.2009; опубл. 25.06.2009, Бюл. №12.

2. Исследование структуры и трибологических свойств композиционных материалов на основе TiB_2-SiC / М.С. Стороженко, А.П. Уманский, А.В. Лавренко [и др.] // Проблемы трибологии. – 2009. – № 3. – С. 77-84.

3. Верховтуров А.Д. Формирование поверхностного слоя металлов при электроискровом легиро-

вании / А.Д. Верховтуров. – Владивосток: Дальнаука, 1995. – 323 с.

4. Электродные материалы для электроискрового легирования / А.Д. Верховтуров, И.А. Подчерняева, Л.Ф. Прядко, Ф.Ф. Егоров. – М.: Наука, 1988. – 200 с.

5. Самсонов Г.В. Электроискровое легирование металлических поверхностей / Г.В. Самсонов, А.Д. Верховтуров. – К.: Наукова думка, 1976. – 219 с.

6. Соловьев В.В. Изменение структуры стали 45 при электроискровом легировании сплавом ВК-6 / В.В. Соловьев, Е.С. Астапова, В.А. Агапатов // ФХОМ. – 2002. – №6. – С. 73-76.

7. Комплекс машин и методика определения антифрикционных свойств при трении скольжения / Э.Т. Мамыкин., А.И. Юга [и др.] // Порошковая металлургия. – 1973. – №1. – С. 67-72.

Поступила в редакцию 12.05.2010

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.Д. Панасюк, Институт проблем материаловедения НАН Украины, Киев.

ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ СТАЛИ 30ХГСА ЭЛЕКТРОИСКРОВЫМ ЛЕГИРОВАНИЕМ КОМПОЗИТАМИ НА ОСНОВЕ TiB_2-SiC

М.С. Стороженко, А.П. Уманский, А.А. Тамаргазін

Изучена кинетика массопереноса электродов из разработанных керметов ТБКНХ на основе $TiB_2-20\%SiC$ с 20, 30, 40 % (мас.) металлической связки Ni-20%Cr при электроискровом легировании стали 30ХГСА. Исследованы особенности формирования структуры модифицированного в результате электроискрового легирования поверхностного слоя стали в зависимости от содержания металлической связки в электродах ТБКНХ. Установлены механизмы изнашивания и исследованы триботехнические характеристики полученных покрытий в условиях трения скольжения без смазки в сравнении со сталью и ЭИЛ-покрытием ВК-6. Показана перспективность применения разработанных керметов для нанесения износостойких покрытий для экстремальных условий эксплуатации.

Ключевые слова: кермет, диборид титана, карбид кремния, электроискровое легирование, кинетика массопереноса, покрытие, износостойкость, триботехнические свойства.

INCREASE OF 30XGSA STEEL WEAR RESISTANCE BY ELECTRIC-SPARK ALLOYING WITH COMPOSITES ON THE BASE OF TiB_2-SiC

M.S. Storozhenko, A.P. Umansky, A.A. Tamargasin

The kinetics of mass transfer of electrodes from developed cermets ТБКНХ on the base $TiB_2-20\%SiC$ with 20, 30, 40 % of metallic bond Ni-20%Cr at electric-spark alloying of steel 30XGSA has been studied. Features of formation of structure of steel modified surface coating depend on metallic bond content in electrodes ТБКНХ have been investigated. Wear mechanisms and the tribotechnical characteristics of developed alloys spark coatings in sliding friction without lubricating conditions have been established. The perspective of developed cermets application for wear resistance coatings plating for operation extreme conditions were shown.

Key words: cermet, titanium boride, silicone carbide, electric spark alloying, kinetics of mass transfer, coating, wear-resistance, tribotechnical properties.

Стороженко Марина Сергіївна – асистент кафедри технологій аеропортів Аерокосмічного інституту Національного авіаційного університету, Київ, Україна, storozhenkomary@ukr.net.

Уманський Олександр Павлович – д-р техн. наук, провідний науковий співробітник Інституту проблем матеріалознавства ім. І.Н. Францевича НАН України, Київ, Україна.

Тамаргазін Олександр Анатолійович – д-р техн. наук, завідувач кафедри технологій аеропортів Аерокосмічного інституту Національного авіаційного університету, Київ, Україна.