



УДК 621.793.79

**В. П. Коновал, О. П. Уманський, А. Д. Костенко, Л. М. Мелах,
Т. В. Мосіна**

**Триботехнічні властивості електроіскрових покриттів
із дибориду титану-хрому та композиційних матеріалів
на його основі**

(Представлено членом-кореспондентом НАН України О. М. Григор'євим)

Методом електроіскрового легування отримано покриття на конструкційній сталі із різного класу матеріалів: металопоподібної кераміки, керметів та металевого сплаву. Досліджено механізм формування покриттів та їх триботехнічні властивості залежно від складу легуючого електрода. Із збільшенням кількості металевої фази в матеріалі електрода зростає суцільність і товщина покриттів, а зносостійкість знижується, особливо при збільшенні швидкості тертя.

Надійність та ефективність роботи машин та механізмів головним чином визначається конструктивною міцністю деталей та властивостями їх робочих поверхонь. Деталі, виготовлені із металів та сплавів, мають високу міцність і досить хороші триботехнічні властивості в присутності мастила. При експлуатації деталей в умовах високих температур, швидкостей, навантажень без мастила більшість металів і їх сплавів мають високі коефіцієнти тертя та інтенсивність зносу і практично непрацездатні.

На відміну від металів, коефіцієнт тертя і знос тугоплавких сполук, наприклад карбідів і боридів, залишається порівняно низьким навіть в таких умовах. Тому вони знаходять широке застосування для виготовлення ріжучого інструмента, фільтер для протяжки і волочиння, ущільнювачів та інших деталей, працюючих при високих швидкостях, навантаженнях, температурах в умовах тертя–ковзання без мастила. Основним недоліком тугоплавких сполук, який не дозволяє використовувати їх для широкої номенклатури деталей і замінити металеві сплави, є їх висока крихкість. Підвищити пластичність тугоплавких сполук із збереженням, а інколи й підвищенням, триботехнічних і корозійних властивостей можна при використанні їх у вигляді композиційних матеріалів з пластичною металевою зв'язкою. Однак використання матеріалів даного класу для виготовлення деталей машин і механізмів часто обмежується технологічними труднощами, тому доцільніше використовувати їх корисні властивості у вигляді покриттів на досить міцних і пластичних металевих основах.

© В. П. Коновал, О. П. Уманський, А. Д. Костенко, Л. М. Мелах, Т. В. Мосіна, 2013

При такому технологічному підході можливе створення виробів з унікальним поєднанням властивостей, які неможна одержати при використанні традиційних конструкційних матеріалів для деталей різної конфігурації і розмірів. Створення таких покриттів в ряді випадків є найбільш ефективним, а інколи і єдиною можливим способом вирішення складних технічних проблем. Покриття із тугоплавких сполук і КМ на їх основі є економічно рентабельними, оскільки їх застосування дозволяє в ряді випадків спростити технологію, а також замінити дорогі й рідкісні компоненти менш дефіцитними з покращенням працездатності деталей, конструкцій, машин та механізмів [1].

Серед різних методів нанесення покриттів та зміцнення робочих поверхонь значний інтерес становить електроіскрове легування (ЕІЛ). Основними перевагами даного способу є простота процесу нанесення покриття, низька енергоємність, мобільність обладнання у поєднанні з високою ефективністю збільшення рівня експлуатаційних властивостей поверхні.

Метою даної роботи є дослідження впливу складу металокерамічних композиційних матеріалів, зокрема співвідношення тугоплавкої і металевої фази на зносостійкість та механізм формування електроіскрових покриттів.

Як вихідні матеріали для отримання електродів використовували порошки дибориду титану-хрому $(\text{Ti,Cr})\text{B}_2$ та сплаву на основі інтерметаліду NiAl (ВКНА). Шихта порошоків у необхідних співвідношеннях подрібнювалася з одночасним перемішуванням у середовищі ацетону в планетарному млині. Потім суміші порошоків просушувались і просіювались. Електроди отримували брикетуванням порошоків, розмір яких не перевищував 3 мкм, під тиском у сталевій прес-формі з наступним спіканням в печі СШВЛ у вакуумі при температурі $T = 1500$ °С. Електроіскрові покриття наносили на установці "Alleg-52", під час процесу вивчали вплив режимів процесу (амплітуда імпульсного струму, енергія і тривалість імпульсу) на якісні характеристики покриттів (товщина, суцільність, коефіцієнт масопереносу). Мікроструктури покриттів вивчалися на мікроскопі МІМ-10, мікротвердість вимірювалася на мікротвердомірі ПМТ-3. Зносостійкість отриманих покриттів досліджувалася в умовах тертя-ковзання без мастила за схемою палець-диск при навантаженні $P = 0,65$ МПа і швидкостях $V = 4; 8$ і 12 м/хв в парі із контртілом із сталі 45 (HRC50).

Вибір дибориду титану-хрому як тугоплавкої складової пов'язаний з високим рівнем фізико-механічних та триботехнічних властивостей даного матеріалу [2–5]. Також раніше було показано перспективність електроіскрових покриттів на сталях і титанових сплавах із композиційних матеріалів на основі $(\text{TiCr})\text{B}_2$ [6, 7]. За металеву зв'язку вибрано сплав на основі інтерметаліду NiAl (ВКНА), який характеризується високим рівнем зносо- та жаростійкості у поєднанні з хорошою пластичністю та струмопровідністю [8, 9].

Покриття наносилися електродами із чистого $(\text{TiCr})\text{B}_2$, сплаву ВКНА, композиційних матеріалів системи $(\text{TiCr})\text{B}_2$ – ВКНА із різним співвідношенням структурних складових (75 : 25 (ТВ25), 50 : 50 (ТВ50), 25 : 75 (ТВ75)% (об.)) та для порівняння стандартного твердого сплаву ВК6. Вплив співвідношення структурних складових легуючого електрода на механізм формування покриттів та їх зносостійкість становить особливий практичний інтерес, пов'язаний з вибором матеріалу покриття залежно від швидко-навантажувальних умов експлуатації деталей, інтенсивності зношування та граничного значення зносу тощо.

Встановлено, що при невисоких значеннях тривалості ($t = 20$ – 170 мкс) та енергії імпульсу ($E = 0,045$ – $0,61$ Дж) товщина покриттів із різних матеріалів зростає в ряді ВК6 → TiCrB_2 → ТВ25 → ТВ50 → ТВ75 → ВКНА і становить до 200 мкм при тривалості легування 3 хв/см². Покриття, отримані при зазначених режимах, мають досить гладку

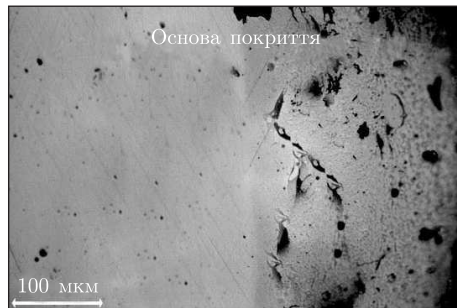


Рис. 1. Мікроструктура електроіскрового покриття із композиційного матеріалу ТВ50

поверхню практично без глобулярних виступів (крім TiCrB_2) і високу суцільність, яка на покриттях ТВ75 і ВКНА наближалася до 100%.

При $t = 350\text{--}700$ мкс, $E = 1,26\text{--}2,52$ Дж товщина покриттів зростає до 400 мкм, але при цьому значно знижується суцільність. На поверхні покриття утворюються глобулярні виступи округлої форми діаметром до 1 мм. Кількість таких виступів становить до 10–15 шт./ см^2 , причому із збільшенням кількості металевої зв'язки їх діаметр і кількість збільшуються, а висота зменшується. Як правило, такі виступи утворюються на початку нанесення покриття, а вже після 1 хв/ см^2 легування йде поступове їх розгладжування і заповнення міжглобулярного простору. Після 5 хв/ см^2 такі глобулярні виступи мають в декілька разів більшу площу і меншу висоту, а середня товщина покриттів становить 200–350 мкм (максимальна для ТВ50, ТВ75).

При нанесенні покриттів при $t = 1400$ мкс, $E = 5$ Дж (максимальний режим для установки “Alieg-52”) на поверхні зразка утворюються покриття з досить високою шорсткістю (або 2–3-рівневі). Перший так званий рівень повністю покриває поверхню зразка (суцільність до 80%) і має товщину до 150 мкм. Одночасно на поверхні зразка утворюються нарости острівкового характеру діаметром 2–5 мм і висотою до 700 мкм. Вони мають пологі боки з плавно наростаючою висотою, на відміну від глобулярних наростів, що утворюються при нижчій енергоємності процесу. Із збільшенням енергії, тривалості та струму імпульсу процес нанесення покриттів ускладнюється. Зокрема, електродні матеріали починають інтенсивно розігріватися (судячи з кольору, до температур вище 900 °С), внаслідок чого відбувається розтріскування і відколювання частинок електрода (характерно для TiCrB_2), руйнування електрода внаслідок інтенсивного окиснення (ВК6), короткочасне захоплення електрода і зразка (ВКНА). З точки зору технологічності нанесення покриття, найкращими виявились електродні матеріали (ТВ50 і ТВ75).

Для випробувань на зносостійкість наносилися електроіскрові покриття на зразки із сталі 30ХГСА ($d = 10$ мм, $h = 15$ мм). Процес легування здійснювався поетапно — спочатку при мінімальному значенні енергії та тривалості імпульсу, потім при середніх значеннях і в кінці — при максимальних, так, щоб загальний час легування не перевищував 3 хв/ см^2 . Отримані покриття мають дрібнодисперсну структуру і якісний адгезійний контакт покриття з основою (рис. 1). Перед триботехнічними випробуваннями поверхневий шар покриттів товщиною 20–40 мкм зшліфовувався, після чого фактична площа контакту зразків із контртілом становила 70–90%.

Зразки, що випробовувалися, мали товщину покриття 130–650 мкм, причому товщина покриттів плавно зростає із збільшенням кількості металевої фази в матеріалі електрода

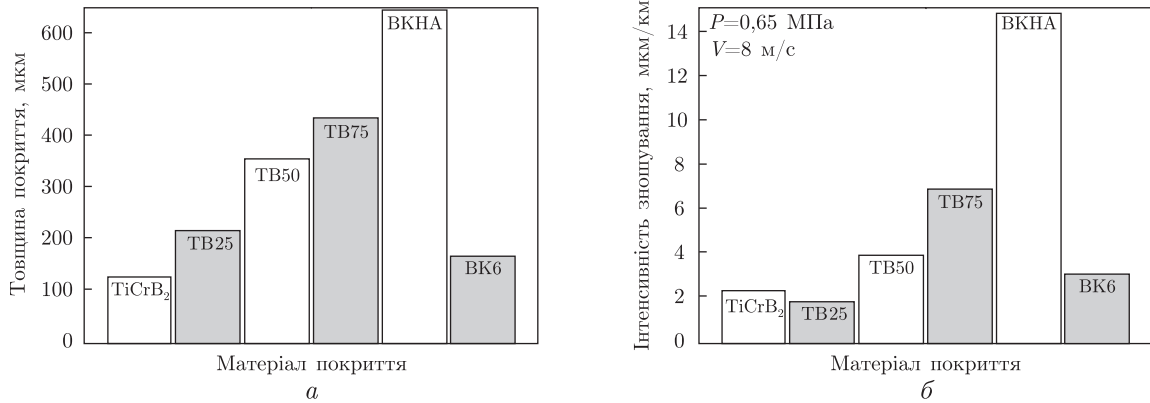


Рис. 2. Вплив матеріалу легуючого електрода на товщину (а) і зносостійкість (б) електроіскрових покриттів

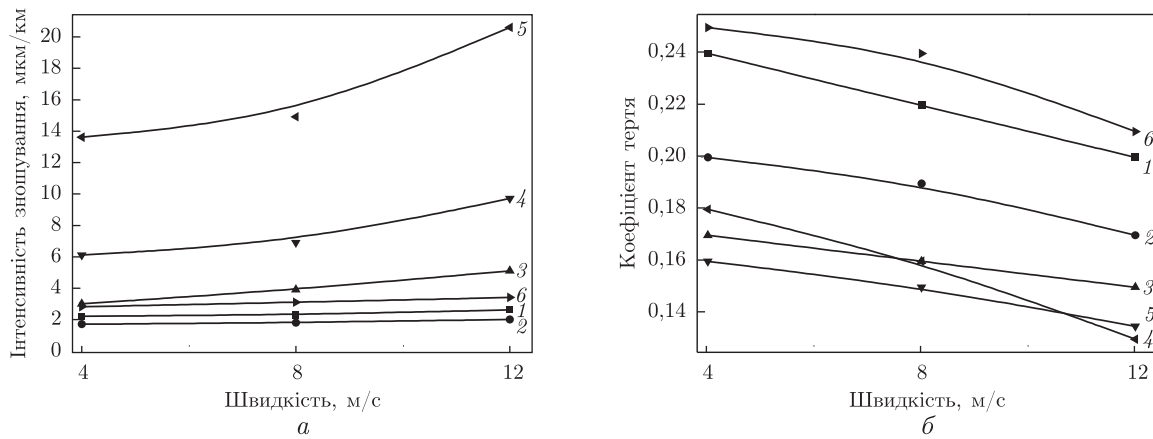


Рис. 3. Залежність інтенсивності зношування (а) та коефіцієнтів тертя (б) від швидкості тертя при постійному тиску ($P = 0,65$ МПа): 1 – TiCrB₂; 2 – TB25; 3 – TB50; 4 – TB75; 5 – BKHA; 6 – BK6

(рис. 2, а). Така закономірність пов'язана із збільшенням електропровідності, пластичності електродів і зниженням їх температури плавлення. Внаслідок цього в процесі масопереносу збільшується частка рідкої фази, яка сприяє формуванню більш суцільного, щільного і дрібнодисперсного покриття. В результаті випробувань найвища зносостійкість була зафіксована на покриттях TB25 (TiCrB₂ – 25%BKHA) і трохи поступаються їм покриття із чистого TiCrB₂ і TB50 (TiCrB₂ – 50%BKHA) (рис. 2, б). В даних умовах випробувань (тертя ковзання без мастила, $P = 0,65 - 1$ МПа, $V = 8$ м/с) основним чинником, що визначає рівень зносостійкості, є механічні властивості покриттів. Покриття із TiCrB₂ мають найвищу мікротвердість ($H\mu = 23$ ГПа), але поряд з цим і найвищу крихкість. Введення до складу покриття 25% (об.) металевої фази дозволяє сформувати гетерофазну структуру, в якій частинки зносостійкої фази міцно утримуються в об'ємі покриття. Досить значна кількість зносостійкої фази в покритті дозволяє забезпечувати високу твердість, а, відповідно, і зносостійкість покриття.

Випробування покриттів при різних швидкостях тертя (4–12 м/с) показали, що із збільшенням швидкості тертя збільшується знос покриттів (рис. 3, а). Для покриттів на основі тугоплавких сполук (рис. 3, а, криві 1, 2, б) зносостійкість при різних швидкостях практично не змінюється, тоді як для покриттів на основі металевої фази зносостійкість знижується,

особливо при збільшенні швидкості до 12 м/с. Це пов'язано із зростанням температур в зоні тертя при збільшенні швидкості, яке приводить до зниження механічних властивостей покриттів, в першу чергу тих, які містять більше металевої фази. Адже відомо, що металеві сплави мають значно меншу жароміцність порівняно з тугоплавкими сполуками. Такий механізм зношування також підтверджується зміною коефіцієнтів тертя, які із збільшенням швидкості знижуються, причому покриття із більшим вмістом металевої фази мають нижчі коефіцієнти тертя (рис. 3, б). Цю закономірність можна пояснити як високими антифрикційними властивостями металевої фази, так і зростанням пластичності матеріалу внаслідок нагріву в процесі тертя. Якби інтенсивність зношування збільшувалася в результаті схоплювання, то коефіцієнти тертя ймовірноше всього також збільшувалися б. Зниження коефіцієнтів тертя для покриттів з більшим вмістом тугоплавкої фази (рис. 3, б, криві б, 2, 1) може бути пов'язано з інтенсифікацією окислювальних процесів і формуванням вторинних структур у зоні тертя внаслідок підвищення температури. Для покриттів із керметів характерне протікання декількох механізмів зношування, домінування яких визначається складом покриття і режимами тертя.

Проведені дослідження довели, що із збільшенням швидкісно-навантажувальних параметрів тертя перевага щодо зносостійкості покриттів із вищим вмістом тугоплавкої фази буде зростати. Порівняно високий рівень зносостійкості покриттів на основі металевих сплавів пов'язаний з малими навантаженнями (до 1 МПа) при випробуваннях, хоча швидкості були досить високими (до 12 м/с). Відповідно, при відносно малих навантаженнях (до 0,5 МПа) і швидкостях (до 5 м/с) покриття на основі металевих сплавів можуть успішно використовуватися. При конструюванні вузлів тертя-ковзання без змащування із більш високими швидкостями і навантаженнями варто збільшувати вміст тугоплавкої фази в покритті. Хоча чітку кореляцію між режимами тертя і складом покриття встановити досить складно, оскільки на механізм тертя також істотно впливає матеріал контртіла, масогабаритні характеристики вузла, циклічність та інтенсивність експлуатації тощо.

1. Самсонов Г. В., Этик А. П. Покрyтия из тугоплавких соединений. – Москва: Металлургия, 1973. – 400 с.
2. Самсонов Г. В., Марковский Л. Я., Жигач А. Ф., Валяшко М. Г. Бор, его соединения и сплавы. – Киев: Изд-во АН УССР, 1960. – 590 с.
3. Ковальченко М. С., Очкас Л. Ф., Юрченко Д. З. Износостойкие твердые сплавы на основе двойного диборида титана-хрома // Порошк. металлургия. – 1982. – № 11. – С. 54–57.
4. Козина Г. К., Призно И. Г., Дзыкович И. Я., Артемюк С. А. Наполнитель композиционного наплавочного износостойкого материала на основе диборида титана-хрома // Сверхтвердые материалы. – 1996. – № 3. – С. 14–21.
5. Евтушок Т. М., Григорьев О. Н., Костенко А. Д. и др. Трибологические свойства композиционных материалов на основе тугоплавких соединений титана // Порошк. металлургия. – 2005. – № 7/8. – С. 58–64.
6. Коновал В. П. Зносостійкість металокерамічних покриттів при фреттінг-корозії // Пробл. трибології. – 2009. – № 4. – С. 93–96.
7. Коновал В. П., Уманський О. П., Панасюк А. Д. та ін. Формування електроіскрових покриттів із композиційних матеріалів на основі карбіду і дибориду титану-хромy // Сверхтв. материалы. – 2009. – № 4. – С. 84–91.
8. Darolia R. NiAl alloys for high temperature structural applications // J. of Metals. – 1991. – P. 44–49.
9. Заутхофф Г., Цоймер Б. Интерметаллический сплав на основе никель-алюминия. Пат. 2148671. Российская федерация. – Заявл. 19.05.1995. – Оpubл. 10.05.2000.

**В. П. Коновал, А. П. Уманский, А. Д. Костенко, Л. М. Мелах,
Т. В. Мосина**

Триботехнические свойства электроискровых покрытий из диборида титана-хрома и композиционных материалов на его основе

Методом электроискрового легирования получены покрытия на конструкционной стали из разного класса материалов: металлоподобной керамики, керметов и металлического сплава. Исследован механизм формирования покрытий и их триботехнические свойства в зависимости от состава легирующего электрода. С увеличением количества металлической фазы в материале электрода растет сплошность и толщина покрытий, а износостойкость снижается, особенно при увеличении скорости трения.

V. P. Konoval, O. P. Umanskyi, A. D. Kostenko, L. M. Melakh, T. V. Mosina

Tribotechnical properties of TiCrB₂ electric-spark coatings and TiCrB₂-based composite materials

The coatings on a structural steel from different materials such as metal-ceramics, cermets, and metal alloys have been obtained by the electric-spark alloying method. The mechanism of formation of the coatings and their tribotechnical properties, depending on the composition of the alloying electrode, have been investigated. With an increase of the metallic phase in the electrode material, the coating integrity and thickness increase, and the wear resistance reduces, especially with an increase of the sliding speed.