УДК 621.891(045)

А.Г. Довгаль, асист.
В.В. Щепетов, д.т.н., проф.
В.Д. Гулевець, к.т.н., доц.

ДЕТОНАЦІЙНІ ЗНОСОСТІЙКІ ПОКРИТТЯ З ЛЕГОВАНИХ ПОРОШКІВ НА ОСНОВІ Cr-Si

Детонаційно-газовим методом отримано покриття з композиційного матеріалу Cr-Si-B на сталі. Вивчено склад, структуру та триботехнічні властивості покриттів порівняно з традиційними матеріалами на основі Ni-Cr і сплаву ВК.

Coatings from composition material Cr-Si-B on steel by detonation spraying method are obtained. Composition, structure and tribotechnical characteristics of coatings in comparison with traditional materials on the basis of Ni-Cr and alloy of tungsten and cobalt are investigated.

детонаційний метод, композиційний материал, покриття, триботехніка

Постановка проблеми

Для підвищення працездатності поверхонь тертя деталей машин, технологічного обладнання та інструменту нині широко використовують різні покриття. Застосування детонаційних покриттів − один з ефективних методів підвищення зносостійкості рухомих спряжень машин.

Для нанесення зносостійких газотермічних покриттів на конструкційні сплави традиційно використовують порошки металічних сплавів на основі Ni-Cr з різними добавками металів (Co, Mo, Y), неметалів (B, Si) і тугоплавких сполук (карбіди, бориди, оксиди алюмінію), а також порошки твердих вольфрамових сплавів марки ВК.

Покриття на основі металічних сплавів характеризуються відносно низькою зносостійкістю з високою стійкістю до окиснення (до 1100 °С), тоді як покриття з вольфрамових сплавів мають високу зносостійкість з низьким опором високотемпературній корозії (до 500−600 °С) [1]. У зв’язку з тенденцією до підвищення температур експлуатації, особливо в умовах знакозмінних навантажень і агресивних середовищ, вимоги до захисних покриттів зростають і приводять до необхідності створення зносостійких покриттів, для яких першочергового значення набуває висока поверхнева твердість в поєднанні з пружними властивостями матеріалу.

Розробляючи матеріали для детонаційно-газового напилювання слід враховувати техніко-економічні обмеження, обумовлені вимогами виробництва, зокрема витрату дефіцитних і дорогих компонентів. З тугоплавких сполук найбільш перспективні боридні, карбідні та нітридні сполуки титану та хрому [2; 3; 4].

Хром завдяки високій температурі плавлення, жаро- і корозійній стійкості часто служить основою створення конструкційних матеріалів. Він належить до металів, які важко деформуються, тому виготовлення виробів потрібної форми з нього є складною науково-технічною проблемою. Водночас завдяки високому рівню твердості, міцності зчеплення, низькому коефіцієнту тертя та корозійній стійкості хромові покриття широко застосовуються у промисловості [5].

Мета роботи − розроблення складу та отримання порошків системи Cr-Si-B і застосування їх для нанесення детонаційних покриттів з покращеними властивостями для захисту деталей машин, які працюють в умовах тертя.

Методика досліджень

Для напилювання використовували композиційні порошки системи Cr-Si-B, отримані методом механічного легування.

Детонаційні покриття напилювали на робочі поверхні зразків зі сталі 45 (після загартування і відпущення; структура − сорбіт-тростит) на модернізованій автоматичній установці «Днепр-3», товщина покриття становила 0,11−0,20 мм.

Під час вивчення детонаційних покриттів з композиційних порошкових матеріалів було реалізовано програму з дослідження триботехнічних властивостей від декількох факторів (швидкість, навантаження, температура).

Склад і структуру покриття досліджували на електронному мікроскопі «Camscan», мікротвердість вимірювали на мікротвердомірі ПМТ-3 за навантаження 0,5 Н.

Триботехнічні дослідження зразків з покриттями системи Cr-Si-B проводили за торцевою схемою в умовах, коли на машині тертя УТМ-2 не було мастил.

© А.Г. Довгаль, В.В. Щепетов, В.Д. Гулевець, 2009

Результати досліджень

Характеристики металічних фаз напиленого шару, а також отримання вторинних структур з певними властивостями суттєво залежать від хімічного складу вихідного матеріалу. Спочатку експериментально визначали оптимальний вміст кремнію в системі. Для цього на основу напилювали композиційний матеріал Cr-Si з різним процентним вмістом Si, після чого визначали мікротвердість отриманих покриттів (рис. 1).

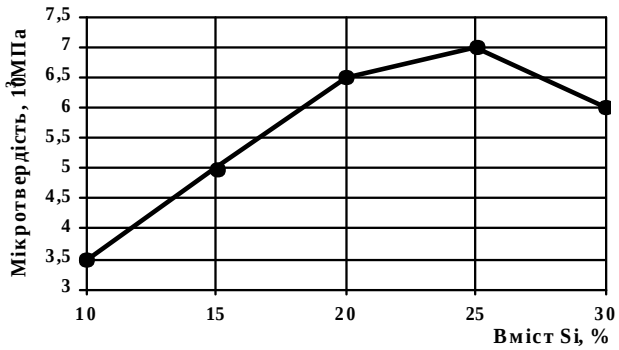


Рис. 1. Характер зміни мікротвердості залежно від вмісту Si

Найбільшу мікротвердість має детонаційне покриття системи Cr-Si з вмістом кремнію 25 %. Зважаючи цей вміст Si в системі сталим, визначали оптимальний вміст бору. Для цього наносили на стальну основу детонаційно-газовим методом композиційний порошок Cr-Si-B.

Найменші значення інтенсивності зношування мають за таких умов випробувань покриття, отримані з композиційного матеріалу, що містить 12 % бору (рис. 2). Ці ж покриття мають найбільшу мікротвердість − 7−8 ГПа.

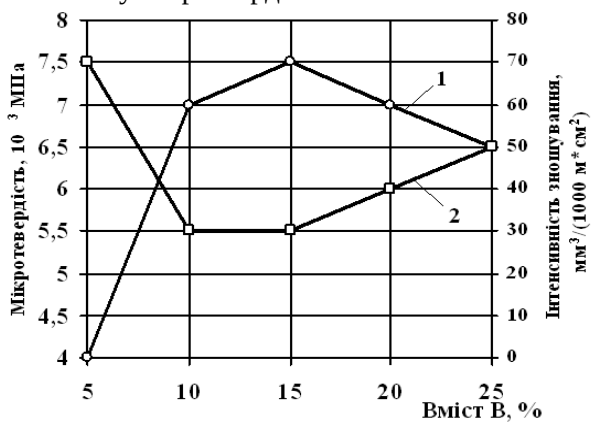


Рис. 2. Залежність мікротвердості (1) та інтенсивності зношування (2) покриття від вмісту бору

Введення бору до складу композиційного порошку значно покращує фізико-механічні властивості покриттів: стійкість до руйнування, міцність зчеплення з основою та мікротвердість. Це пояснюється формуванням під час нанесення покриттів тугоплавких боридних фаз типу CrB, Cr_2B, Cr_3B_4, $CrBr_2$. Взаємодія хрому та кремнію зумовлює до утворення твердих зносостійких силіцидів хрому CrSi, Cr_2Si_3, $CrSi_2$. Рентгеноструктурний аналіз виявив також наявність твердих розчинів бору у хромі та кремнії і твердий розчин кремнію у хромі.

Отже, бориди і силіциди, що являють собою дисперсні частинки, перешкоджають процесам пластичної деформації. Вони частково розчиняються у хромі і підвищують енергію зв'язку в атомах, що входять у твердий розчин. Все це сприяє підвищенню зносостійкості покриттів, навантажених тертям.

Під час вивчення зносостійкості композиційних детонаційних покриттів для порівняння у таких самих умовах і за аналогічними програмами досліджували зразки з детонаційними покриттями з порошку вольфрамового сплаву ВК-15 і на основі ніхрому, додатково легованого бором та алюмінієм.

Результати досліджень, що визначають функціональну залежність інтенсивності зношування від швидкості, показано на рис. 3.

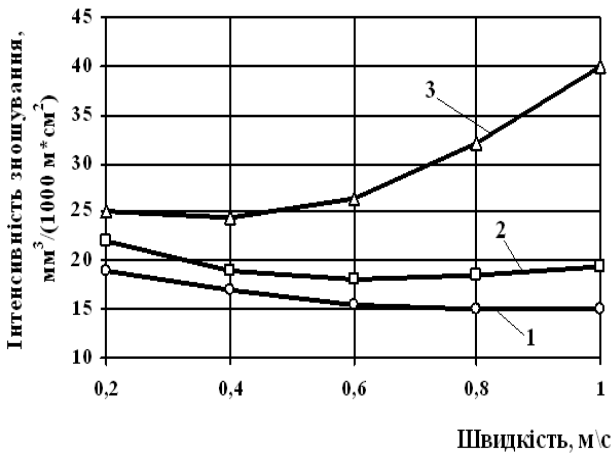
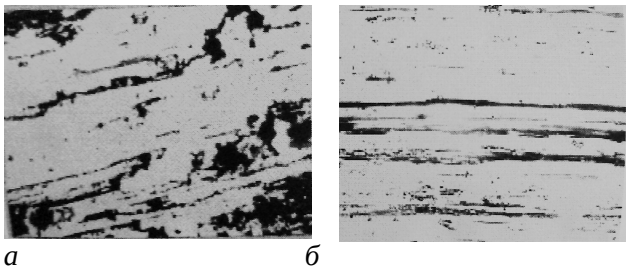


Рис. 3. Залежність інтенсивності зношування покриттів від швидкості:
1 − ВК-15;
2 − Cr-Si-B;
3 − Ni-Cr-A1-B

Випробовування проводили з навантаженням P = 5,0 МПа.

Найменші значення інтенсивності зношування характерні для детонаційних покриттів на основі Cr-Si-B і твердого сплаву ВК-15, для яких в усьому діапазоні швидкостей ковзання спостерігається режим нормального механохімічного зношування, що характеризується малими величинами зношування і низьким коефіцієнтом тертя.

При цьому збільшення швидкості суттєво не впливає на інтенсивність зношування покриття на основі Cr-Si-B. Поверхні тертя не зазнають значних пошкоджень, на них видно лише сліди направленої пластичної деформації без явних ознак схоплювання (рис. 4).



а *б*

Рис. 4. Мікрофотографії поверхонь тертя покриттів на основі Cr-Si-B у парах тертя зі зразками зі сталі 45 за швидкості ковзання:
а – 0,6 м/с;
б – 6–10 м/с (×320)

Результати досліджень, що визначають залежність інтенсивності зношування від температури подано на рис. 5.

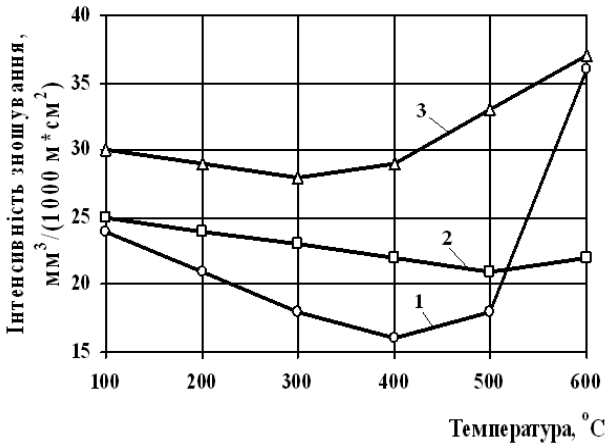


Рис. 5. Залежність інтенсивності зношування покриттів від температури:
1 – ВК-15;
2 – Cr-Si-B;
3 – Ni-Cr-Al-B

Дослідження проводили з постійним навантаженням P = 0,5 МПа і швидкості ковзання

V = 0.5 м/с.

Найменші значення інтенсивності зношування, як видно, мають за таких умов досліджень детонаційні покриття на основі Cr-Si-B, спостерігається стійкий процес механохімічного зношування. Збільшення температури майже не погіршує характеристики тертя і зношування, адже на поверхні відбувається інтенсивне утворення структур, що мають високі антифрикційні властивості.

Примусове нагрівання інтенсифікує процеси взаємодії поверхні тертя з киснем повітря, у результаті утворюються плівки вторинних структур. Природа їх утворення залежить від умов тертя, матеріалів пари і складу середовища у зоні контакту. Під час тертя в нормальних атмосферних умовах на поверхні утворюються тонкі плівки оксидів [5; 6].

Стабільність боридів менша, ніж оксидів. Продуктами окислення боридів є оксиди металу і борний ангідрид. Можна припустити, що оксидна плівка на робочих поверхнях складається зі шпінелі Cr_2O_3 B_2O_3 та оксидів Cr_2O_3, SiO. У цьому випадку оксиди зв'язуються борним ангідридом в аморфну плівку, що має високі зносостійкі властивості. Наявність B_2O_3, як зазначалось, обумовлена тим, що вищі борини хрому, взаємодіючи з киснем навколишнього середовища, розпадаються на оксид хрому і борний ангідрид, який за підвищених температур має малу в'язкість і дуже активно взаємодіє з іншими оксидами.

Підвищення температури випробувань майже не впливає на інтенсивність зношування покриття на основі Cr-Si-B, спостерігається стійкий процес механохімічного зношування.

У процесі випробувань ніхрому встановлено, що при нагріванні зразків більше ніж на 400 °С (теплові перевантаження) збільшують інтенсивність зношування, що обумовлює утворення у тонких поверхневих шарах точок схоплювання.

Для детонаційних покриттів з вольфрамового твердого сплаву ВК-15 за температури 540 °С і відбувається інтенсивне окиснення карбіду вольфраму і розм'кшення зв'язки, що обумовлює зниження триботехнічних властивостей покриттів.

Дослідження залежності інтенсивності зношування від навантажень проводили за швидкості V = 0,5 м/с (рис. 6).

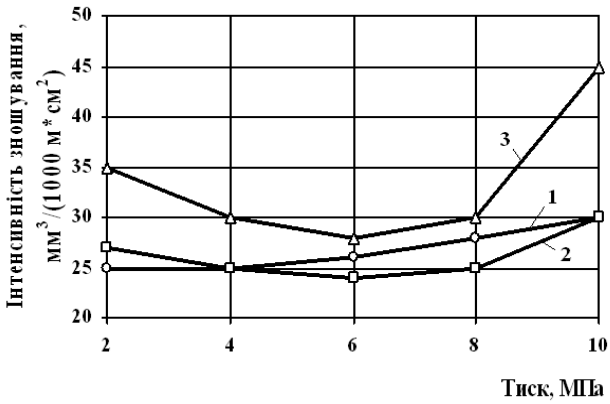


Рис. 6. Залежність інтенсивності зношування від навантаження:
1 – ВК-15;
2 – Cr-Si-B;
3 – Ni-Cr-A1-B

Аналіз експериментальних даних показав незначне збільшення зношування зі зростанням навантаження. Зростання питомого тиску обумовлює збільшення фактичної площі контакту, посилення молекулярної взаємодії поверхонь, інтенсивність зношування при цьому дещо зростає.

Так, інтенсивність зношування покриття з легованого ніхрому зі збільшенням навантаження до 8 МПа майже не зростає. Збільшення навантаження суттєво не впливає на інтенсивність зношування детонаційних покриттів на основі композиційного матеріалу Cr-Si-B.

Така висока працездатність покриття обумовлюється протіканням в широкому діапазоні навантажень універсального явища структурної пристосованості під час тертя.

Поверхневий шар покриття внаслідок пластичної деформації під час тертя переходить у термодинамічно нерівноважний активований стан, з якого шляхом адсорбційно-дифузійної і хімічної взаємодії з навколишнім середовищем намагається перейти в пасивний стан. У результаті цієї взаємодії утворюються гетерофазні тонкоплівкові вторинні структури [7]. За даними рентгенофазного аналізу вони являють собою суцільну і щільну плівку складу SiO, Cr_2O_3 і борного ангідриду.

Утворення вторинних структур відбувається в певному діапазоні режимів тертя за наявності динамічної рівноваги процесів активації і пасивації. Якщо під впливом зовнішніх умов динамічна рівновага зсувається у бік збільшення енергії активації, то не утворюється досить міцного і зносостійкого шару вторинних структур, що захищають основний матеріал пари тертя від безпосередньої взаємодії, і процес тертя відбувається в умовах пошкоджень, тоді відбувається тужавлення.

Висновки

Дослідження детонаційних покриттів у повітряному середовищі без застосування мастил показали високі зносостійкі властивості композиційних безвольфрамових покриттів на основі композиційного матеріалу Cr-Si-B.

Зносостійкість детонаційних покриттів з легованого ніхрому під дією високих температур обумовлена як характеристиками металічних фаз напиленого шару, так і властивостями оксидних плівок, які утворюються у процесі тертя. Ці оксидні плівки активно перешкоджають процесам контактного тужавлення, при цьому виключають вплив тертя на основний матеріал покриття, чим визначають високі антифрикційні характеристики пари тертя.

Найбільш якісні і зносостійкі покриття формуються під час використання порошків з таким масовим вмістом компонентів: Cr − 60−65 %; Si – 20−25 %; B − 10−15 %.

Література

1. *Гамуля Г.Д.* Триботехнические свойства материалов, предназначенных для работы в экстремальных условиях / Г.Д. Гамуля, Е.Л. Островская, Т.П. Юно. – Порошковая металлургия. − 2001. − № 3/4. − С. 47−56.

2. *Уманский А.П.* Структура и свойства плазменных покрытий из композиционных порошковых сплавов системы (TiCrC) − (FeCr) / А.П. Уманский, В.П. Коновал. – Порошковая металлургия. − 2007. − № 3/4. − С. 37−45.

3. *Аренсбургер Д.С.* Покрытия, напыляемые высокоскоростным газотермическим методом / Д.С. Аренсбургер, С.М. Зимаков, П.А. Кулу. – Порошковая металлургия. − 2001. − № 3/4. − С. 38−47.

4. *Астахов Е.А.* Исследование процесса фазообразования при детонационном напылении композиционных порошков системы FeTi-SiC / Е.А. Астахов, И.В. Миц. – Порошковая металлургия. – 2005. − №1/2. − С. 67−73.

5. *Игнатович С.Р.* Износостойкость керамических детонационных покрытий на основе тугоплавких соединений титана-хрома / С.Р. Игнатович, Е.П. Дворник. − Проблеми тертя та зношування // Наук.-техн. зб. − К.: НАУ, 2006. − Вип.46. − С. 170 − 175.

6. *Макаренко Г.Н.* Синтез, жаростойкость и оптические свойства силицида бора и материалов на его основе / Г.Н. Макаренко, В.Б. Федорус. – Порошковая металлургия. − 2007. − № 3/4. − С. 45−51.

7. *Машков Ю. А.* Трибология конструкционных материалов / Ю.А. Машков. − Омск: ОмГТУ, 2001. − 299 с.

Стаття надійшла до редакції 17.06.09.