

Р. М. Медюх¹
В. К. Медюх¹
В. В. Присяжнюк²
В. Ф. Лабунець³
О. О. Скворцов³

ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРИ ТА ТРИБОЛОГІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ КОМПОЗИЦІЙНОГО ПЛАЗМОВОГО ПОКРИТТЯ НА ОСНОВІ СТАЛІ

¹Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України, Київ;

²Вінницький національний технічний університет;

³Національний авіаційний університет, Київ

Досліджено особливості структуроутворення та фізико-механічні властивості композиційних сталевих плазмових покриттів. Як матеріал для покриття використовували феритну сталь 11X18МВД. В залежності від режимів плазмового напилення в покритті утворюється особлива пориста структура, що є однією з їхніх важливих характеристик. За оптимальних режимів напилення сталі 11X18МВД загальна пористість покриття становила 20...24 %, а максимальна відкрита пористість — 16...18 %.

Зазвичай пористість відіграє позитивну роль, підвищуючи триботехнічні властивості деталей під час їхньої експлуатації, особливо в середовищі мастила. Однак в процесі експлуатації покриттів триботехнічного призначення в умовах абразивного зносу пористість може погіршувати робочі характеристики деталі, тому за цих умов для покращення експлуатаційних властивостей плазмових покриттів застосовано додаткову термообробку. Це забезпечувало підвищення адгезії та формування необхідної композиції і гетерогенної структури на поверхні, таким чином значно покращуючи властивості покриттів.

В роботі показано доцільність суміщення процесів газотермічного напилення плазмових покриттів із їхнім подальшим дифузійним насиченням шляхом хіміко-термічної обробки хромуванням. Після хромування за температури 1100 °С і витримці протягом 3 год підвищується щільність покриття і значно зменшується кількість мікропорожнин в ньому, структура стає одноріднішою, підвищується щільність покриття. На поверхні утворюється хромове покриття товщиною 10 мкм, збільшується товщина дифузійно насиченого шару з рівномірнішим розподілом легувальних елементів по глибині.

Вивчення триботехнічних властивостей досліджуваних покриттів показало значне покращення їхніх експлуатаційних характеристик за умов різного виду інтенсивного зношування.

Ключові слова: плазмові покриття, сталь 11X18МВД, хіміко-термічна обробка, структуроутворення, зносостійкість.

Вступ

Проблема тертя, мащення та зношування деталей належить до найскладніших проблем сучасної техніки. На всіх етапах розвитку машинобудування для її вирішення витрачались великі кошти [1].

У процесі експлуатації машин і механізмів деталі їхніх вузлів тертя зазнають різного виду зношування, що пов'язано з дією таких зовнішніх чинників як: температура, навантаженість, швидкість, агресивність середовища, наявність абразивних частинок та їхня твердість. При цьому робочі поверхні деталей повинні володіти комплексом властивостей, зокрема, трибологічних, що

забезпечити працездатність поверхонь тертя [2]. На теперішній час такі властивості можна досягти завдяки використанню сучасних методів поверхневого зміцнення і захисних покриттів триботехнічного призначення.

До найпоширеніших захисних покриттів відносяться [3] гальванічні, дифузійні, газотермічні та покриття, отримані різноманітними способами обробки, а саме: електрохімічними, електрофізичними і комбінованими. Що стосується плазмових покриттів, то їхню перспективність ґрунтовно подано у багатьох джерелах [2], [4].

Особлива увага приділяється композиційним плазмовим покриттям, їхнім структурним складом, які визначають триботехнічні характеристики плазмового покриття [3], [4].

Найефективнішими способами нанесення покриттів є комплексні, до складу яких входять плазмові покриття [4]—[6]. Окрім плазмового напилення у комплексних покриттях використовують електроіскрове легування [4], хіміко-термічну обробку [7], лазерне оплавлення [8] та ін.

Метою роботи є отримання сталевих плазмових покриттів, дослідження їхнього структуроутворення після хіміко-термічної обробки (ХТО), а також вивчення фазового складу та триботехнічних властивостей покриттів за різних умов їхньої контактної взаємодії.

Матеріали та методики експерименту

Для напилення плазмових покриттів на підкладку зі сталі 45 використовували дріт нержавіючої хромомолібденової сталі 11X18МВД діаметром 1,6 мм.

Плазмове напилення проводили на установці УПУ-3Д на повітрі з використанням аргону як транспортувального і плазмоутворювального газу. Параметри напилення змінювали для забезпечення адгезії та отримання максимально відкритої пористості покриття, що є доцільним за подальшої хіміко-термічної обробки. Оптимальні параметри напилення такі: сила струму — 450...470 А, напруга — 35 В, відстань від плазмотрона до зразка — 140 мм, витрати газу — 26 л/хв, витрати дроту — 1,5...1,7 кг/год.

Перед напиленням робочі поверхні обробляли дробоструминним методом сталеву крихтою з розміром частинок 0,5...2,0 мм за тиску стисненого повітря 0,35...0,4 МПа, дистанція обробки 100...110 мм, кут нахилу пістолета 70...90° тривалість обробки 0,1 хв/см². Таке попереднє оброблення поверхні необхідне для надання їй розвинутого рельєфу та енергетично активного стану задля отримання міцного зчеплення покриття з основою.

Електроіскрове легування (ЕІЛ) здійснювали на установці «Елітрон-21» у режимі: струм короткого замикання 1 А, частота імпульсів струму 1200 Гц, енергія імпульсу 0,08 Дж. Для нанесення покриття використовували електрод з високовуглецевої сталі У12.

Пористість плазмових покриттів виміряно методом ртутної порометрії згідно з ISO 15901-1:2016.

Дифузійне насичення хромом проводили у печі СНОЛ-2,3.2./13 в контейнерах з жаростійкої сталі Х18Н9Т з плавким закривом із натрій-силікатного скла, контролюючи температуру та тривалість процесу. Насичення проводили у порошковій суміші, % (мас.): 50 Fe-Cr (у співвідношенні 40:60), 47 Al₂O₃, 3 NH₄Cl.

Мікротвердість та товщину покриттів досліджували на мікротвердомірі ПМТ-3 згідно з ГОСТ 9450-76.

Мікроструктуру сталі 11X18МВД проявляли травленням в реактиві Ніталя (5 % HNO₃ + 95 % C₂H₅OH) протягом 5...15 с за T = 20 °С.

Мікроструктурний аналіз поперечних шліфів плазмових покриттів проводили на оптичному мікроскопі МИМ-7 за різних збільшень.

Рентгенографічні дослідження проводили на дифрактометрі ДРОН-2,0 у фільтрованому Со-K_α випромінюванні.

Міцність зчеплення покриття з основою до і після термообробки визначали методом зсуву [8].

Випробування зносостійкості покриттів в умовах тертя ковзанням проводили на комп'ютеризованій машині 2070 СМТ-1 за схемою ролик-ролик в середовищі повітря (сухе тертя) та масла ЦІАТІМ-203 і АМГ-10 [9]. Для проведення триботехнічних випробувань в умовах тертя ковзанням плазмові покриття 11X18МВД наносили на твірну поверхню кілець із зовнішнім діаметром 50 мм, внутрішнім — 16 мм, шириною — 10 мм. Як матеріал контртіла використовувалась сталь 45, нормалізована за температури 960 °С з подальшим охолодженням на повітрі. Сталь мала феритно-перлітну структуру та твердість 195 HRB. Зразок із покриттям був нерухомий, а контртіло зі Ст. 45, забезпечувало необхідну швидкість ковзання. Випробування проводили за

навантаження 1 МПа і швидкості ковзання 1 м/с.

Абразивний знос вивчали на експериментальному обладнанні Бринеля–Хаворта за тертя в умовах нежорстко закріплених абразивних частинок (ГОСТ 23.20879). Як абразив використовували поперечно висушений кварцовий пісок зернистістю 220...250 мкм. Перед випробуванням зразки шліфували до шорсткості $R_z = 0,63$ мкм. Дослідження проводили на зразках розміром 30×30 мм і товщиною 4 мм із нанесеними покриттями. Зусилля притискання поверхонь при терті становило 44,1 Н.

Величину зносу зразків визначали ваговим методом на електронних вагах ВЛА-200 з точністю до 0,0001 г.

Результати дослідження

В залежності від режимів плазмового напилення в покриттях утворюється певна пориста структура, що є однією з їхніх важливих характеристик.

Головним у структуроутворенні покриття та формуванні його міцного зчеплення з основою є не тільки хімічний склад покриття, а і якість його розпилення плазмовим струменем та ступінь проплавлення частинок. Кінетична енергія напилюваних частинок, що спричиняє процеси структуроутворення, залежить від параметрів процесу, що дає можливість отримувати покриття з регульованою структурою. Для отримання необхідної пористості та міцності зчеплення покриття з основою вибрано оптимальні параметри його напилення.

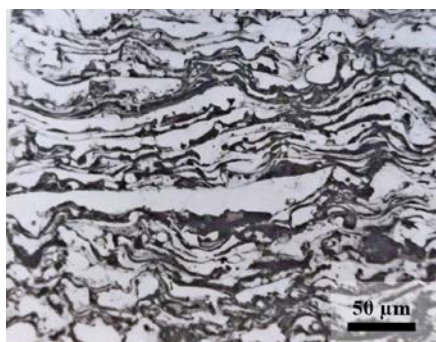


Рис. 1. Мікроструктура плазмового (11X18МВД) покриття без термообробки, ×200

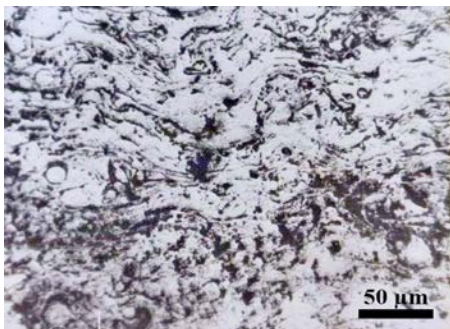


Рис. 2. Мікроструктура плазмового (11X18МВД) покриття після ХТО хромування, ×200.

Мікроструктура плазмового покриття після напилення (рис. 1) має шарувату будову, де видно чіткі відокремлені границі розділення між окремими частинками. Шари покриття, головним чином, складаються з частинок у вигляді тонких вигнутих пластинок, а також досить великої кількості частинок сферичної, неправильної округлої форми.

За оптимального режиму напилення мікротвердість покриття становила 63...68 МПа, загальна пористість — 20...24%, а максимальна відкрита пористість — 16...18%.

Пористість може відігравати позитивну роль, підвищуючи триботехнічні властивості деталей під час їхньої експлуатації за наявності мастила, коли пори відіграють роль резервуарів мастила та мастильних канавок. Однак у випадках, коли покриття триботехнічного призначення експлуатуються в корозійному середовищі, або в умовах абразивного зносу, пористість може погіршувати робочі характеристики деталі. Тому за таких умов для покращення експлуатаційних властивостей плазмових покриттів доцільно застосовувати різні види термічної обробки, зокрема ХТО.

Поєднання плазмового напилення з подальшою ХТО зменшує пористість покриття, поліпшує міцність зчеплення покриття з основою та формує спеціальні властивості в поверхневій зоні. З результатів досліджень мікроструктури (рис. 2), видно, що після ХТО хромування за температури 1100 °C і витримці протягом 3 год. відбувається перебудова пористої структури матеріалу, за рахунок реакцій цього процесу. Спостерігається значне зменшення кількості мікропорожнин і підвищення щільності покриття. Межі між шарами і частинками стають менш чіткими, згладженими, структура стає одноріднішою, підвищується щільність, на поверхні утворюється хромове покриття товщиною 10 мкм.

На рис. 3 показані штрих-рентгенограми сталюого плазмового покриття без термообробки (рис. 3б) та після термообробки (рис. 3в). Для порівняння наведена рентгенограма сталі 11X18МВД (рис. 3а), з якої видно, що дрiт зі сталі 11X18МВД має феритну структуру, а після його напилення (див. рис. 3б) утворюється аустенiт з невеликою домішкою фериту. Ймовiрним поясненням його утворення може бути таке. В процесі плавлення сталі за високої температури протягом короткого часу відбувається повна гомогенізація сплаву.

Протягом подальшого швидкісного загартування із рідкого стану спочатку утворюється високотемпературна дрібнокристалічна фаза — аустеніт з розчиненими в ній вуглецем, хромом, молібденом, вольфрамом і міддю. Такий стан є термодинамічно нестійким за низьких температур, але рушійні сили $\gamma \rightarrow \alpha$ перетворення малі. Тому, дуже дрібне зерно, утворене в процесі загартування із рідини, перешкоджає процесу $\gamma \rightarrow \alpha$ перетворення.

На штрих-рентгенограмі сталюого покриття після ХТО хромування (рис. 3в) з'являються лінії фаз Fe_3C і Cr_{23}C_6 , а також відбувається зменшення інтенсивностей ліній γ -фази і збільшення α -фази. Очевидно, що протягом ХТО відбувається частковий розпад γ -фази на ферит і відповідні карбіди.

Важливим фактором, що визначає можливість практичного застосування напиленних покриттів є міцність їхнього з'єднання з робочою поверхнею. Інші позитивні властивості нанесеного шару, втрачають своє значення, якщо міцність зчеплення з основою недостатня.

Відомо, що адгезія покриття залежить переважно від попередньої підготовки поверхні, властивостей напилюваного матеріалу і матеріалу основи, а також від параметрів процесу напилювання. Міцність зчеплення покриття зумовлюється механічним зачепленням розплавлених частинок за максимально розвинуті мікронерівності поверхні, що досягається дробоструминною обробкою напилюваної поверхні, а також взаємодією молекулярних сил між напиленим шаром і основою. Із застосуванням оптимального режиму попередньої обробки максимальна висота мікронерівностей поверхні становила 40...45 мкм.

Як показали результати експериментів, міцність зчеплення плазмових покриттів після ХТО хромування збільшується в 1,7 рази порівняно зі звичайним плазмовим покриттям (рис. 4).

Оскільки деталі машин і механізмів у багатьох галузях промисловості зазвичай працюють за умов різного виду інтенсивного зношування, а також в корозійних середовищах, то вивчення триботехнічних характеристик сталюих плазмових покриттів після ХТО має великий практичний інтерес.

Результати досліджень на тертя та зношування показали високу зносостійкість плазмових покриттів 11X18МВД особливо в середовищі мастила (рис. 5). Порівняно з еталоном Ст.45, плазмові покриття показали у 5 разів вищу зносостійкість, а покриття після ХТО хромування мають на порядок кращі результати випробувань. Покриття добре припрацьовуються, протистоять явищам схоплення і мають високу релаксаційну здатність.

Дані щодо абразивного зносу покриттів під час тертя в умовах нежорстко закріплених абразивних частинок показані на рис. 6.

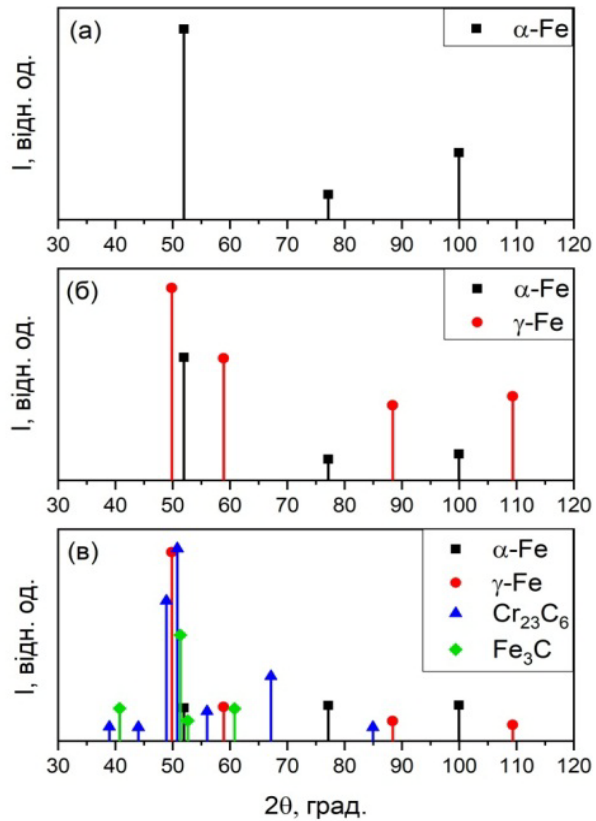


Рис. 3. Штрих-рентгенограми: а — сталь 11X18МВД; б — плазмове (11X18МВД) покриття до термообробки; в — плазмове (11X18МВД) покриття після ХТО хромування

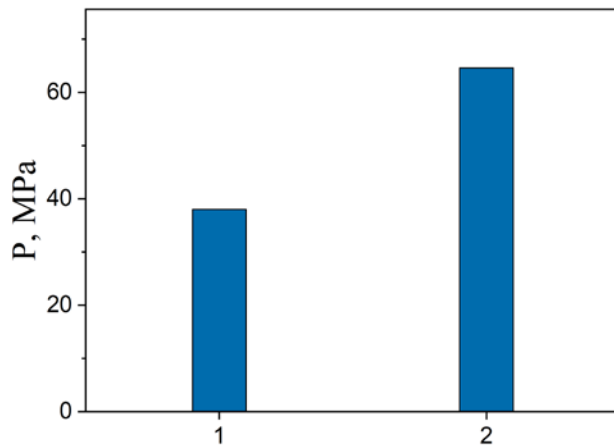


Рис. 4. Міцність зчеплення плазмового покриття з основою при зсуві: 1 — 11X18МВД; 2 — 11X18МВД після ХТО хромування

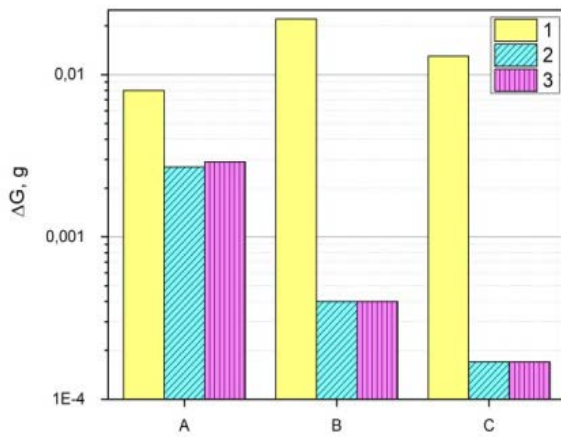


Рис. 5. Залежність втрати маси (ΔG): А — еталону Ст45, В — покриття 11X18MBD; С — 11X18MBD+ХТО за умов тертя ковзанням; тертя: 1 — без мастила; 2 — у мастилi ЦІАТІМ-203; 3 — у мастилi АМГ-10

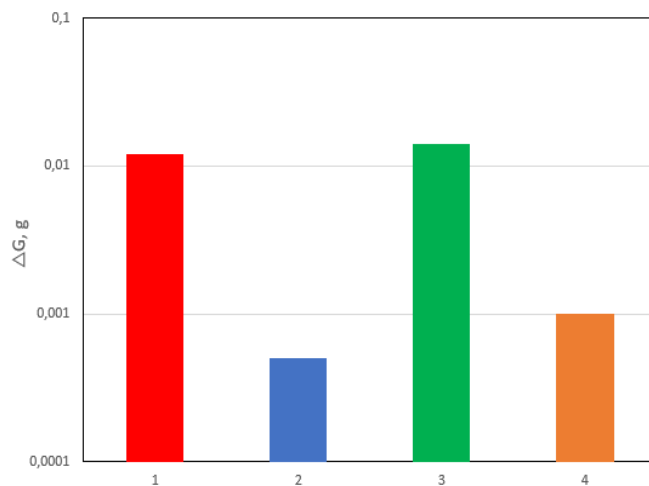


Рис. 6. Діаграма абразивного зносу покриттів за методом Бринеля–Хаворта: 1 — 11X18MBD без т/о; 2 — 11X18MBD + ХТО; 3 — сталь нормалізована без відпалу; 4 — E11

Утворення перехідної зони в процесі взаємодифузії елементів покриття і сталеві основи у разі застосування термообробки сприяє значному підвищенню адгезії. Міцність зчеплення плазмових покриттів після ХТО хромування збільшується в 1,7 рази.

Вивчення фізико-механічних властивостей досліджуваних покриттів показало значне поліпшення їхніх експлуатаційних характеристик за умов різного виду інтенсивного зношування. За результатами експериментальних випробувань доведено, що сталеві плазмові покриття після хіміко-термічного оброблення:

– за умов тертя ковзанням у середовищі мастила показали на порядок вищу зносостійкість порівняно з еталом Ст. 45;

– за умов абразивного зносу за методом Бринеля–Хаворта мають більше ніж на порядок кращі показники абразивної стійкості порівняно з еталом.

Метод електроіскрового легування сталю U12 показав значне поліпшення триботехнічних властивостей поверхні досліджуваних зразків і може бути рекомендований для відновлення зношених деталей та ремонту технічних засобів як простий і ефективний технологічний процес, що не потребує стаціонарного обладнання.

Проведені дослідження показали перспективність відновлення зношених деталей запропонованими вище методами.

Оцінка зносостійкості покриттів, (див. діаграму рис. 6), показує, що плазмові покриття 11X18MBD порівняно з еталом має вищу стійкість проти абразивного зносу, а ХТО підвищує зносостійкість покриття більше ніж на порядок. Очевидно, що і електроіскрове легування поверхні сталю U12 забезпечує підвищення зносостійкості на порядок.

Отже, як показали проведені дослідження, відновлення робочих поверхонь деталей запропонованими вище методами може бути перспективним за умови врахування усього комплексу вимог щодо роботи конкретної деталі.

Висновки

Дослідження процесів структуроутворення та триботехнічних властивостей плазмових 11X18MBD покриттів показали доцільність суміщення процесів газотермічного напилення з хіміко-термічним обробленням.

Метод дозволяє отримувати різні за складом композиційні гетерогенні покриття з високими адгезійними, фізико-механічними і експлуатаційними властивостями.

Застосування ХТО сталевих плазмових покриттів показало цілеспрямовану зміну їхньої тонкої кристалічної структури, а саме: надання їй однорідності, компактності, багатофазності, що забезпечило поліпшення їхніх фізико-механічних і триботехнічних властивостей. Дифузійне хромування призводить до зменшення пористості та збільшення глибини дифузії насичувальних елементів з утворенням перехідної зони між основою і покриттям.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] M. Paszeczko, M. Kindrachuk, V. Labunets et al. *Tribologia*. Lublin, 2017, 173 p.
- [2] В. Ф. Лабунець, «Тенденції створення захисних покриттів триботехнічного призначення,» *Проблеми тертя та зношування*, наук. техн. збірн. НАУ, вип. 45, с. 107-118, 2010.
- [3] М. В. Кіндрачук, В. Ф. Лабунець, М. І. Пашечко, і Є. В. Корбут, *Трибологія*, підруч. Київ, Україна: вид-во НАУ-друк, 2009, 392 с.
- [4] В. И. Копылов, И. В. Смирнов, И. А. Селиверстов, *Формирование и свойства плазменных многофазных покрытий с наноразмерными составляющими*. Киев, Украина: Наукова думка, 2019, 308 с.
- [5] Z. B. Chen, et al. "Failure behavior of coated nickel-based superalloy under thermomechanical fatigue," *J Mater Sci*, no. 44, pp. 6251-6257, 2009. <https://doi.org/10.1007/s10853-009-3855-3>.
- [6] M. Kabatova, et al. "Improvement of corrosion and wear resistance of sintered steels by coatings," *Powder Metallurgy*, Vienna; pp. 423-426, 2004.
- [7] Р. М. Медюх, В. К. Медюх, і І. В. Уварова. «Дифузійне хромовання пористих матеріалів на основі молібдену,» *Порошкова металургія*, № 5/6, с. 63-69, 2017.
- [8] И. А. Подчерняева, Д. В. Юречко, і В. М. Панашенко, «Некоторые тенденции в разработке износостойких функциональных покрытий,» *Порошковая металлургия*, № 3/4, с. 75-91, 2013.
- [9] В. І. Дворук, В. В. Клімкін, В. О. Пасічник, і О. В. Тісов, «Модернізована триботехнічна машина 2070 СМТ-1,» *Проблеми тертя та зношування*, вип. 51, с. 34-38, 2009.

Рекомендована кафедрою галузевого машинобудування ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 27.06. 2023

Медюх Роман Максимович — науковий співробітник відділу термомеханічної обробки тугоплавких матеріалів, e-mail: roman.mediukh@gmail.com ;

Медюх Віра Костянтинівна — молодший науковий співробітник відділу функціональних матеріалів медичного призначення, e-mail: vira.mediukh@gmail.com .

Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України, Київ;

Присяжнюк Василь Васильович — старший викладач кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем, e-mail: pvv_vin@ukr.net .

Вінницький національний технічний університет, Вінниця;

Лабунець Василь Федорович — канд. техн. наук, професор кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів, e-mail: nau12@ukr.net ;

Скворцов Олександр Олексійович — аспірант кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів, e-mail: romorie@i.ua .

Національний авіаційний університет, Київ

R. M. Mediukh¹
V. K. Mediukh¹
V. V. Prysiazhniuk²
V. F. Labunets³
O. O. Skvortsov³

Study of the Structure and Tribological Properties of the Composite Plasma Steel Coatings

I. M. Frantsevich Institute for Problems of Materials Science NAS of Ukraine, Kyiv;

²Vinnitsia National Technical University;

³National Aviation University, Kyiv

The characteristic features of structure formation, physical and mechanical properties of composite steel plasma coatings have been studied. Ferritic steel 11X18МВД was used as the material for coatings. Depending on the modes of gas-thermal spraying a special porous coating structure is formed, which is one of their important characteristics. Under the optimal modes of steel 11X18МВД spraying the total porosity of the coating was 20...24% and the maximum open porosity was 16...18%.

Usually the porosity plays a positive role, increasing the tribomechanical properties of the parts during their operation, especially in the lubrication medium. However, during the operation of tribotechnical coatings under conditions of abrasive wear, porosity can worsen the working characteristics of the parts, therefore under these conditions the additional heat treatment was applied to improve the operational properties of plasma coatings. It promoted a high adhesion and formation of the required composition and heterogeneous structure on the surface, thereby significantly improving the coating properties.

The paper shows the expediency of combining the processes of gas-thermal spraying of plasma coatings with their subsequent diffusion saturation by means of chemical-heat treatment with chromium plating. After chromium plating at a temperature of 1100 °C and soaking during 3 h, the coating density increases and the number of micro voids in it decreases significantly, the structure becomes more uniform, the integrity of the coating increases. Chromium coating with the thickness of 10 μm is formed on the surface, the thickness of the diffusely saturated metal layer increases with a more uniform distribution of alloying elements along the depth.

The study of the tribomechanical properties of the investigated coatings showed a significant improvement in their operational characteristics under conditions of various types of intensive wear.

Keywords: plasma coatings, steel IIX18MBД, chemical-heat treatment, structure formation, wear resistance.

Mediukh Roman M. — Researcher of the Department of Termomechanical Processing of Refractory Materials, e-mail: roman.mediukh@gmail.com ;

Mediukh Vira K. — Research Assistant of the Department of Functional Materials for Medical Application, e-mail: vira.mediukh@gmail.com ;

Prysiachniuk Vasyl V. — Senior Lecturer of the Chair of Information Communication Systems and Technologies e-mail: pvv_vin@ukr.net ;

Labunets Vasil F. — Cand. Sc. (Eng.), Professor of the Chair of Applied Mechanics and Materials Engineering, e-mail: nau12@ukr.net ;

Skvortsov Oleksandr O. — Post-Graduate Student of the Chair of Applied Mechanics and Materials Engineering, e-mail: pomorie@i.ua