

УДК 621.793.7

Карпеченко А. А.,

karpetchenkoanton@gmail.com., ORCID ID: 0000-0002-7543-4159,

Scopus Author ID: 57194341724,

к.т.н., доцент кафедри матеріалознавства і технології металів,

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв

Бобров М. М.,

laborantmtm@gmail.com., ORCID ID: 0000-0002-9098-6912,

Scopus Author ID: 57194197238,

к.т.н., асистент кафедри матеріалознавства і технології металів,

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв

Вороненко С. В.,

voronenko447@gmail.com., ORCID ID: 0000-0001-9606-6538,

к.т.н., доцент кафедри експлуатації суднового електрообладнання і засобів автоматики,

Херсонська державна морська академія, м. Херсон

Олійник В. А.,

Директор товариства з обмеженою відповідальністю "ОЛДІ", м. Миколаїв

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЕЛЕКТРОІМПУЛЬСНОЇ ДІЇ НА ФОРМУВАННЯ ЕЛЕКТРОДУГОВИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ КЕРМЕТНИХ ПОКРИТТІВ СИСТЕМИ СТАЛЬ 65Г – Cr_3C_2

Анотація. Найбільш перспективним вирішенням проблеми зміцнення та відновлення зношених поверхонь деталей машин та механізмів є нанесення захисних газотермічних покриттів, зокрема з керметною структурою. Аналіз сучасної науково-технічної літератури показує, що в останній час найбільш широкі практичне застосування отримали керметні системи з карбідами хрому, титану та вольфраму, які характеризуються високою собівартістю через використання дорогих напилюваних матеріалів та високошвидкісних методів для їх нанесення. У роботі вперше отримано електродугові композиційні керметні покриття системи сталь 65Г- Cr_3C_2 з використанням порошку зміцнювальної фази у вільному вигляді за рахунок використання модернізованого електродугового розпилювача ЕМ-14М. Аналіз електронних знімків мікроструктури отриманих покриттів показав, що вони характеризуються пористістю близько 11,5%, в структурі добре диференціюються частинки Cr_3C_2 та сталі 65Г. Проведено ідентифікацію фаз шляхом визначення їх хімічного складу та встановлено, що вміст карбідної фази у покритті складає 15,4% (об.). Для підвищення фізико-механічних властивостей вказаних покриттів запропоновано використання електроімпульсної дії на оптимальних амплітудно-частотних параметрах (амплітуда 5 кВ, частота – 6,5 кГц), що характеризується простотою реалізації та використанням недорогого додаткового обладнання. Порівняльний металографічний аналіз оптичних знімків мікроструктур покриттів показав, що електроімпульсна дія забезпечує зменшення пористості керметного покриття системи сталь 65Г- Cr_3C_2 з 11,5% до 7,7%; спостерігається відсутність областей викришування частинок карбіду та зменшення розміру структурних складових покриття. Показано, що використання електроімпульсної дії забезпечує підвищення міцності зчеплення покриттів зі сталеву основою з 28 МПа до 34 МПа (+21,5%) та збільшення мікротвердості металевої матриці з 2,7 ГПа до 3,25 ГПа (+20%).

Ключові слова: електродугове напилення, керметні покриття, електроімпульсна дія, твердість, пористість.

Karpechenko A. A.,

karpechenkoanton@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-7543-4159,

Scopus Author ID: 57194341724,

*Ph.D., Associate Professor, Associate Professor of
Department of Materials Science and Metal Technology,
Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv*

Bobrov M. M.,

laborantmtm@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-9098-6912,

Scopus Author ID: 57194197238,

*Ph.D., assistant of Department of Materials Science and Metal Technology,
Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv*

Voronenko S. V.,

voronenko447@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-9606-6538,

Ph.D., Associate Professor, Associate Professor of

*Department Kherson State Marine Academy,
Kherson State Maritime Academy, Kherson*

Oliylyk V. A.,

Director of "OLDI" Limited Liability Company, Mykolaiv

STUDY OF THE INFLUENCE OF THE ELECTROPULSE EXPOSURE ON THE FORMATION OF ELECTRIC ARC COMPOSITE CERMET COATINGS OF THE SYSTEM STEEL 65G – Cr₃C₂

Abstract. *The most promising solution to the problem of strengthening and restoring the worn surfaces of machine parts and mechanisms is the deposition of protective thermal sprayed coatings, in particular with a cermet structure. The analysis of the scientific and technical literature shows that in recent times the most widely used cermet systems with carbides of chromium, titanium and tungsten, which are characterized by high cost due to the use of expensive sprayed materials and high-velocity methods for their deposition. In the work, for the first time, electric arc composite cermet coatings of the steel 65G-Cr₃C₂ system were obtained using the powder of the strengthening phase in free form due to the use of a modernized electric arc spraying gun EM-14M. The analysis of the microstructure of the obtained coatings showed that they are characterized by a porosity of about 11.5%, and the particles of Cr₃C₂ and steel 65G are well differentiated in the structure. Phases were identified by determining their chemical composition and it was established that the content of the carbide phase in the coating is 15.4% (vol.). In order to improve the physical and mechanical properties of the specified coatings, it is proposed to use electropulse exposure at optimal amplitude-frequency parameters (amplitude 5 kV, frequency – 6.5 kHz), which are characterized by ease of implementation and the use of inexpensive additional equipment. The comparative metallographic analysis of microstructures of the coatings showed that the electropulse exposure reduces the porosity of the cermet coating of the steel 65G-Cr₃C₂ system from 11.5% to 7.7%; there is an absence of areas of carbide particles pull-out and a decrease in the size of the structural components of the coating. It is shown that the use of electric pulse exposure provides an increase in the bond strength of coatings to the substrate made of steel 45 from 28 MPa to 34 MPa (+21.5%) and an increase in the microhardness of the metal matrix from 2.7 GPa to 3.25 GPa (+20%).*

Key words: electric arc spraying, cermet coatings, electropulse exposure, hardness, porosity.

JEL Classification: L 61

DOI 10.32782/2522-1221-2023-34-02

Постановка проблеми. Експлуатаційні властивості деталей та механізмів, а також ресурс їх роботи визначаються переважно фізико-механічними властивостями поверхні. Як показує статистичний аналіз, більшість машин (85...90%)

виходять з ладу не через поломку, а в результаті зношування поверхонь окремих деталей. На практиці існують різні способи вирішення проблеми зношування деталей різного обладнання, але найбільш вигідним і перспективним є нанесення

захисних покриттів на робочі поверхні методами газотермічного напилення (ГТН). Пояснюється це тим, що при усуненні зносу деталі, маса матеріалу, що наноситься, зазвичай становить 2...4%, а вартість ремонту не перевищує 10...30% від вартості нової. Слід зазначити, що серед методів ГТН саме електродугове напилення вирізняється простотою, високою продуктивністю, енергетичним ККД та коефіцієнтом використання матеріалу. Відносна вартість електродугових покриттів у 3...10 разів нижча в порівнянні з іншими методами ГТН. Однак покриття, отримані за традиційними технологіями напилення, не завжди забезпечують достатній рівень фізико-механічних та експлуатаційних властивостей, необхідний для ефективної роботи деталей та механізмів у заданих умовах. Для вирішення цієї проблеми останнім часом все частіше застосовують композиційні керметні покриття, що складаються з металевої матриці, в основному на основі сплавів нікелю, кобальту або заліза, та зміцнювальної фази, головним чином карбідів вольфраму, хрому або титану.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Газотермічні покриття з керметною структурою є найбільш широко поширеним класом покриттів, що захищають поверхню деталей від різних видів зношування [1]. В останній час їм приділяється особлива увага у зв'язку з можливістю їх застосування в якості альтернативи покриттям з твердого хрому, що дозволяє вирішити одне з сучасних завдань захисту навколишнього середовища [2-4]. Найбільш широке практичне застосування отримали керметні системи WC-Co і Cr₃C₂-NiCr [1, 4]. Провідними світовими фірмами «Starck» (Німеччина), «Sulzer» (США), «Praxair» (США) проведена розробка складів і освоєний ряд технологій виготовлення порошків цих матеріалів, спеціалізованих за своїми властивостями для використання на установках холодного газодинамічного, детонаційного, високошвидкісного газополуменевого та плазмового напилення [5-8]. Дані матеріали випускаються у вигляді або механічних сумішей порошків карбідів і матричного сплаву, або порошків конгломератів компонентів кермету, які пройшли попередні технологічні операції спікання-дроблення механічної суміші або її конгломерування – спікання.

Практичний інтерес викликають дослідження саме зносостійкості керметних покриттів. Так у роботі [9] досліджено вплив параметрів високошвидкісного газополуменевого напилення (кута та дистанції напилення) на зносостійкість керметних покриттів системи WC-17Co. На

поверхні тертя спостерігаються місця викришування частинок карбідної фази і відповідно канавки тертя на поверхні зразку. Таким чином можна говорити про досить низьку когезійну міцність покриттів, отриманих з вказаного порошку. Таким чином, до недоліків покриттів, нанесених зазначеними методами, слід віднести їхню високу собівартість, пов'язану із застосуванням дорогих плакованих або агломерованих порошків та їх сумішей; горючих та інертних газів; обов'язкове використання дорогого обладнання для нанесення; високі вимоги до кваліфікації робітників.

Щодо електродугових керметних покриттів, то їх одержують розпиленням порошкових дротів різних складів [10-12]. Використання порошкових дротів для одержання композиційних покриттів призводить до підвищеної пористості, що негативно позначається на комплексі фізико-механічних властивостей. При цьому підвищується їхня вартість. Для зносостійких композиційних покриттів характерний високий рівень залишкових напружень, що викликає появу мікро- і макротріщин, а також недостатню когезійну та адгезійну міцність. Особливо це притаманно для покриттів значної товщини, які у процесі механічної обробки шліфуються під ремонтні розміри.

Для вирішення означених проблем, авторами робіт [13, 14, 15] пропонується використання модернізованого розпилювача та порошку зміцнюючої фази у вільному вигляді для нанесення покриттів різноманітних складів. Так нанесено металополімерні [13], металокерамічні та металокермічні композиційні покриття [14]. Однак сформовані електродугові покриття характеризуються зниженою міцністю зчеплення з основою та когезійною міцністю, що приводить до викришування частинок зміцнювальної фази при роботі у вузлах тертя. Для підвищення фізико-механічних та експлуатаційних властивостей електродугових покриттів запропоновано використання електроімпульсного впливу на дистанції напилення [16], що забезпечує додаткове подрібнення та прискорення напилюваних частинок у високо-температурному гетерофазному струмені.

Постановка завдання. Мета роботи полягає у дослідженні впливу електроімпульсної дії при напиленні на формування електродугових композиційних керметних покриттів, визначенні їх фізико-механічних властивостей.

Виклад основного матеріалу дослідження. Об'єктом досліджень обрані електродугові композиційні керметні покриття, отримані шляхом роз-

пилення суцільнотягнутого сталевих дроту марки 65Г і порошку карбіду хрому (Cr_3C_2) на підкладку, виготовлену з вуглецевої конструкційної якісної сталі 45. Підготовку поверхні зразків здійснювали безпосередньо перед напиленням за допомогою установки струменево-абразивної обробки марки 026-7 «Ремдеталь». Як абразив використовували електрокорунд марки 7Б, шліфзерно номер 125. Для напилення керметних електродугових покриттів використовували установку КДМ-2, укомплектовану апаратом ЕМ-14М з модернізованим ковпаком розпилювальної голівки, призначеним для безперебійної подачі частинок порошку у високотемпературну зону дугового розряду [15]. Для запобігання налипанню розплавлених частинок на бронзове робоче сопло використовували дріт діаметром 1,2 мм. Напилення здійснювали на сталеві пластини, виготовлені з вуглецевої конструкційної якісної сталі 45 розміром $50 \times 20 \times 5$ мм і на зразки, які призначені для визначення міцності зчеплення покриттів з основою. Параметри технологічного режиму напилення обиралися виходячи з попередніх досліджень щодо формування композиційних керметних покриттів [14] та становили: сила струму – 120 А, напруга на дузі – 30 В, тиск стисненого повітря – 0,6 МПа, дистанція напилення – 100 мм.

Порошок карбіду хрому перед напиленням прожарювали в сушильній шафі марки ШСВ 3,5.3.5.6/3,5 при температурі 150 °С протягом 3 годин. Ситову класифікацію порошоків, проводили на лабораторній установці модель 029, використовуючи сітку номерів 004 і 008. В результаті просіву виділено порошки фрак-

цією 40...80 мкм, які застосовувалися для отримання композиційних керметних електродугових покриттів. Металографічні дослідження та визначення хімічного складу методом рентгеноспектрального аналізу проводили на скануючому електронному мікроскопі ZEISS Gemini SEM 500. Порівняльний металографічний аналіз при невеликих збільшеннях виконували за допомогою оптичного мікроскопу ММУ-3. Мікротвердість покриттів визначали за допомогою мікротвердоміра ПМТ-3 на поперечних шліфах при навантаженні на індентор 100 г.

Результати досліджень. На рис. 1 наведено мікроструктуру керметного електродугового покриття на різних збільшеннях.

Аналіз мікроструктур показав, що покриття має пористість близько 11,5%, добре диференціюються частинки карбіду хрому темного кольору, границя поділу «покриття-основа» не містить включень та відшарувань. Спостерігаються області викришування частинок карбідної фази під час підготовки мікрошліфів, що пояснюється низькою когезійною міцністю покриття. Для ідентифікації фаз проводили хімічний аналіз за точками (рис. 2).

Результати показали, що хімічний склад зазначеної фази складається з 14,43% вуглецю і 85,57% хрому. Як відомо, молярна маса карбіду хрому (Cr_3C_2) становить 180 г/моль. З них хром становить 86,7% (мас.) (156 г/моль), а вуглець 13,3% (мас.) (24 г/моль). Таким чином, отримані результати відповідають стехіометрії даної хімічної сполуки і дають підстави з упевненістю віднести темну фазу до карбіду хрому.

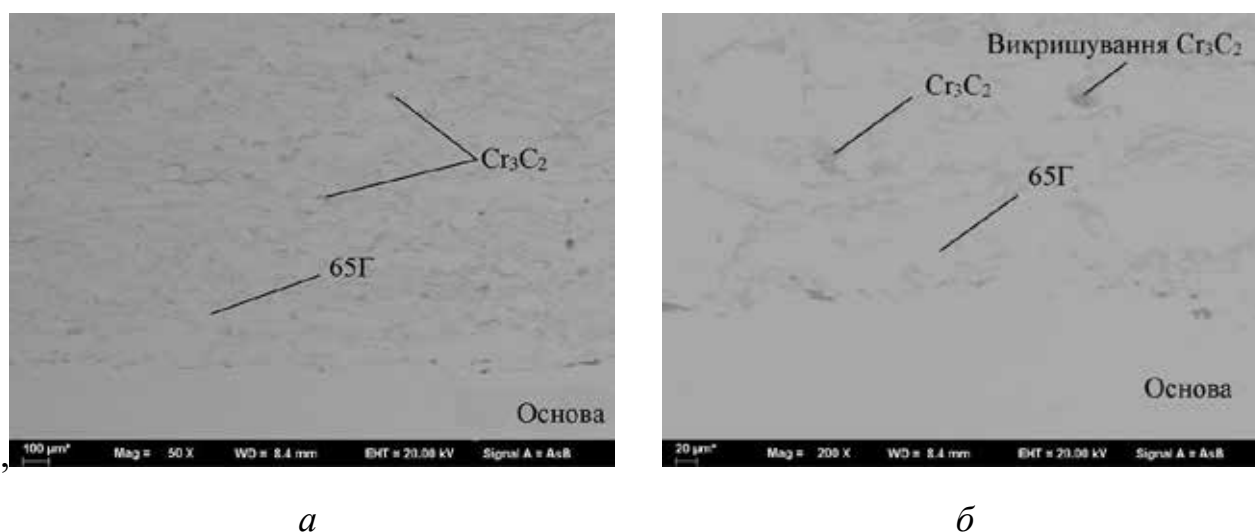


Рис. 1. Мікроструктура композиційного керметного покриття системи сталь 65Г- Cr_3C_2 , отримана за допомогою електронного мікроскопу: а - $\times 50$; б - $\times 200$

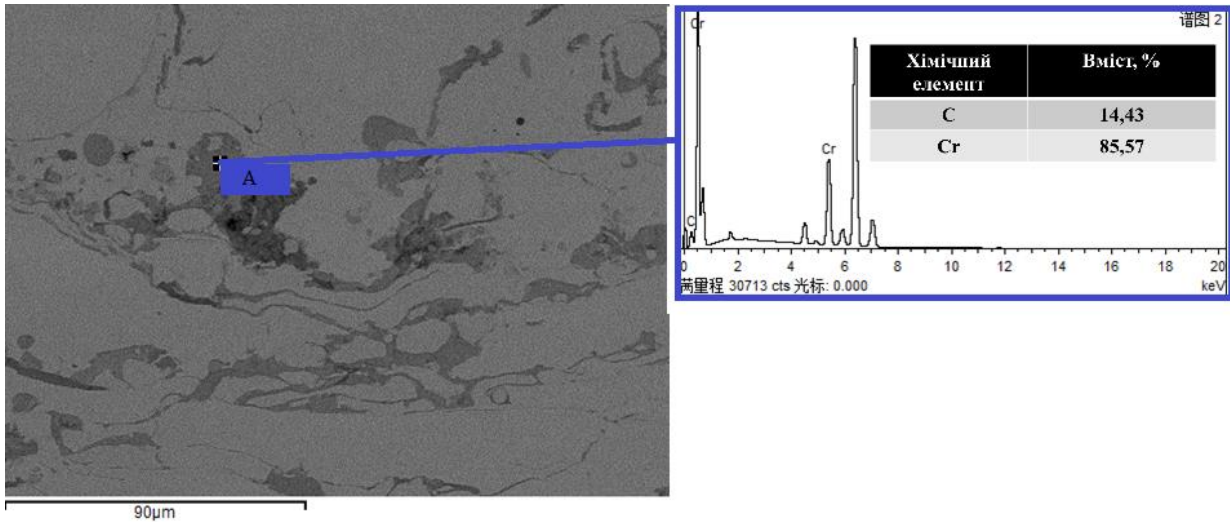


Рис. 2. Область проведення та результати рентгеноспектрального аналізу

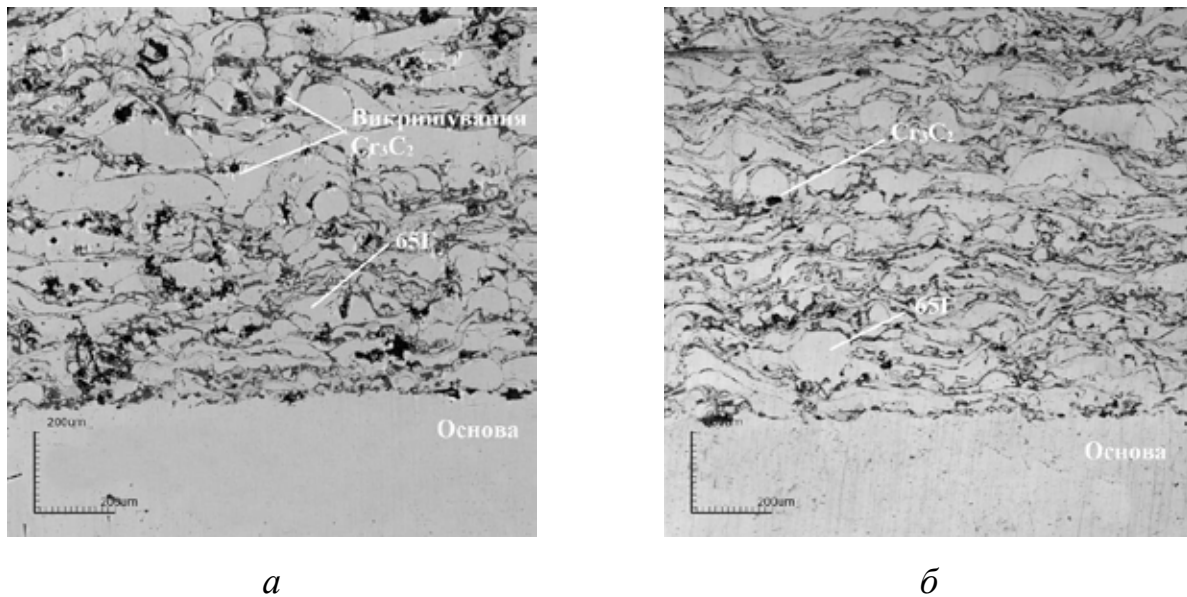


Рис. 3. Мікроструктура (оптичний мікроскоп) електродугового композиційного керметного покриття системи сталь 65Г – Cr₃C₂, нанесеного за різними технологіями: *а* – за традиційною технологією; *б* – з використанням електроімпульсної дії

Визначення вмісту карбідної фази проводили планіметричним методом за отриманими мікроструктурами. Вибір даного методу пояснюється тим, що він у металографічній практиці достатньо ефективний при малому вмісті аналізованої фази (порядку декількох відсотків), та у таких випадках являється надійнішим за точковий або лінійний методи. В результаті розрахунків встановлено, що вміст карбиду хрому в покритті складає 15,4% (об.).

Для електроімпульсного впливу на високо-температурний двофазний потік використовували джерело високовольтних високочастотних

імпульсів, яке підключали до розпилювача за прямою схемою. Напилення здійснювалося на попередньо встановленому оптимальному режимі роботи джерела імпульсів при електродуговому напиленні: частота 6,5 кГц; напруга 5 кВ [16]. На рис. 3 наведено знімки мікроструктур покриттів, нанесених за традиційною технологією та з використанням електроімпульсної дії, які отримано на оптичному мікроскопі.

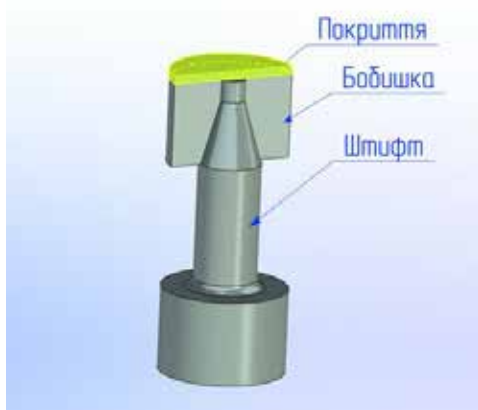
Порівняльний аналіз знімків показує, що електроімпульсна дія на оптимальних амплітудно-частотних параметрах забезпечує зменшення пористості електродугового композиційного

керметного покриття системи сталь 65Г – Cr_3C_2 з 11,5% до 7,7%. При цьому відсутнє викришування часток карбиду з металевої матриці під час шліфування та полірування мікрошліфів, що дає підстави стверджувати про підвищення когезійної міцності між ними, спостерігається більш рівномірний їх розподіл по перерізу покриття. Також відбувається зменшення структурних складових покриття та збільшується величина деформації напилюваних часток (зменшується висота ламелей) з 80 % до 85 % за рахунок підвищення їх швидкості. Згідно з результатами визначення мікротвердості металевої матриці встановлено, що використання електроімпульсної дії приводить до підвищення вказаної характеристики з 2,7 ГПа до 3,25 ГПа (+20%).

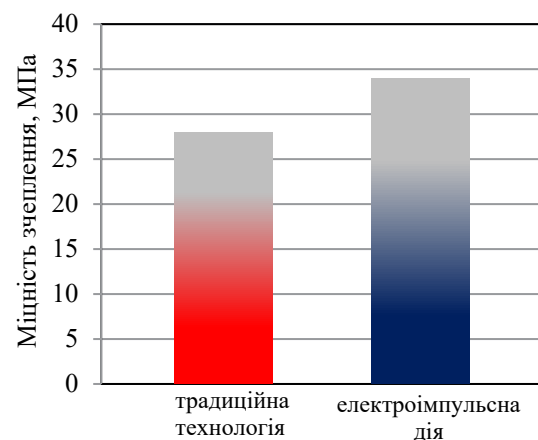
Одним з основних способів визначення міцності зчеплення покриття з основним металом вважається штифтовий метод, який дозволяє оперативно проводити випробування безпосередньо після нанесення покриття на зразки, тому його й використовували у даній роботі. Зразок для визначення міцності зчеплення покриття з основою складається з бобишки, в отвір якої встановлюється штифт таким чином, що його торцева поверхня знаходиться в одній площині з площиною основи – бобишки (рис. 4 а). На загальну поверхню торця штифта і бобишки після відповідної підготовки наноситься покриття. Випробування проводять шляхом витягування конусного штифта з бобишки із записом зміни зусилля, після відриву штифта від покриття визначають відношення максимального навантаження до площі торця штифта. Це відношення є кількіс-

ною характеристикою з'єднання покриття з основою. Для розтягування зразків використовували розривну машину УММ-5. Зразки для визначення міцності зчеплення виготовляли з вуглецевої конструкційної якісної сталі 45. Перед нанесенням покриттів поверхню, яка підлягала напиленню, обезжирювали технічним етанолом та піддавали струменево-абразивній обробці на наступному технологічному режимі: тиск стисненого повітря 0,6 МПа; відстань від зрізу сопла до оброблюваної поверхні 100 мм; діаметр сопла 12 мм; кут падіння струменя на оброблювану поверхню 80 град; лінійна швидкість переміщення пістолета 200 мм/хв. Товщина нанесених покриттів складала 0,5...0,6 мм. Для отримання результатів міцності зчеплення покриттів з основою напилення на одному режимі виконували в один прохід на 5 зразків. Результати визначення міцності зчеплення з металевою основою напилених покриттів за традиційної технологією та з використанням електроімпульсної дії зі зазначених матеріалів наведено на рис. 4 б.

Аналіз наведених результатів показує, що використання електроімпульсної дії забезпечує підвищення даної характеристики для композиційного електродугового керметного покриття системи 65Г- Cr_3C_2 з 28 МПа до 34 МПа (+21,5%). Пояснюється даний ефект підвищенням швидкості напилюваних частинок та, як наслідок, збільшенням площі фактичного контакту напилюваних частинок з основою та кількості місць зчеплення, що забезпечує зменшення результуючого навантаження на одиницю площі нанесеного покриття.



а



б

Рис. 4. Загальний вигляд зразків (а) та результати визначення міцності зчеплення керметних покриттів з основою (б)

Висновки і перспективи подальших досліджень у даному напрямі. Проаналізовано основні методи та напилювані матеріали, що застосовуються для формування керметних газотермічних покриттів. Зроблено висновок щодо перспективи використання електродугового напилення та порошку карбіду у вільному вигляді для нанесення керметних композиційних покриттів. За допомогою модернізованого електродугового розпилювача отримано зразки керметного композиційного покриття системи сталь 65Г – Cr₃C₂. Аналіз знімків мікроструктури покриттів, отриманих за допомогою електронного мікроскопу, показав, що покриття має пористість близько 11,5%, добре диференціюються частинки карбіду хрому темного кольору, границя поділу «покриття-основа» не містить відшарувань, однак спостерігаються місця викришування зміцнювальної фази. Проведено ідентифікацію фаз шляхом визначення їх хімічного складу за допомогою рентгеноспектрального аналізу. Планіметричним методом встановлено вміст карбідної фази у покритті - 15,4% об. Для підвищення фізико-механічних властивостей покриттів запропоновано використання електроімпульсної дії на оптимальних амплітудно-частотних параметрах (амплітуда 5 кВ, частота – 6,5 кГц). Встановлено, що електроімпульсна дія на оптимальних амплітудно-частотних параметрах забезпечує: зменшення пористості покриття з 11,5% до 7,7%; підвищення мікротвердості металевої складової з 2,7 ГПа до 3,25 ГПа (+20%); приводить до меншого викришування частинок карбіду хрому в процесі виготовлення мікрошліфів. Штифтовим методом визначено міцність зчеплення зі сталеву основою вказаних покриттів та показано, що використання електроімпульсної дії забезпечує підвищення даної характеристики для композиційного електродугового керметного покриття системи 65Г – Cr₃C₂ з 28 МПа до 34 МПа (+21,5%). Подальші перспективи досліджень полягають у встановленні нових закономірностей і оптимізації процесу нанесення зазначених електродугових покриттів, а також у визначенні їх експлуатаційних властивостей, зокрема, зносостійкості.

ЛІТЕРАТУРА:

1. D. Toma, W. Brandtt, G. Marginean “Wear and corrosion of thermo alloy sprayed cermet coatings”, *Surface and Coatings Technology*, vol.138, pp.149-158, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(00\)01141-5](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(00)01141-5)
2. N. Espallargas, J. Berget, J.M. Guilemany, A.V. Benedetti, P.H. Suegama “Cr₃C₂-NiCr and WC-Ni

spray coatings as alternatives to hard chromium for erosion-corrosion resistance”, *Surface and Coating Technology*, vol. 202, pp.1405-1417, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2007.06.048>.

3. L. Fedrizzi, S. Rossi, R. Cristel, P.L. Bonora “Corrosion and wear behavior of HVOF cermet coatings used to replace hard chromium”, *Electrochimica Acta*, vol. 49, pp. 2803-2814, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2004.01.043>.

4. J.M. Guilemany, N. Espallargas, P.H. Suegama, A.V. Benedetti “Comparative study of Cr₃C₂-NiCr coatings obtained by HVOF and hard chromium coatings”, *Corrosion Science*, vol. 48, pp. 2998-3013, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2005.10.016>.

5. A. Sai Jagadeeswar, S. Kumar, B. Venkataraman, P. Suresh Babu, A. Jyothirmayi “Effect of thermal energy on the deposition behavior, wear and corrosion resistance of cold sprayed Ni-WC cermet coatings”, *Surface and Coatings Technology*, vol. 399, 126138, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126138>.

6. V.N. Shukla, H. Trivedi, H. Kumar, A. Yadav “Surface Engineering Analysis of D-Gun Sprayed Cermet Coating in Aggressive Environment”, *Material Today: Proceedings*, vol. 4, pp. 10212-10215, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.06.350>.

7. E. Jonda, M. Szala, M. Sroka, L. Łatka, M. Walczak “Investigations of cavitation erosion and wear resistance of cermet coatings manufactured by HVOF spraying”, *Applied Surface Science*, vol. 608, 155071, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2022.155071>.

8. Q. Liu, Y. Wang, Y. Bai, Z. Li, G. Tan, M. Bao, X. Li, H. Zhan, Y. Sun, N. Chong, R. Wang, Y.S. Ma “Formation mechanism of gas phase in supersonic atmospheric plasma sprayed NiCr-Cr₃C₂ cermet coatings”, *Surface and Coatings Technology*, vol. 397, 126052, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126052>.

9. K. Vasileios, S. Kamnis, B. Allcock, S. Gu “Effects and Interplays of Spray Angle and Stand-off Distance on the Sliding Wear Behavior of HVOF WC-17Co Coatings”, *Journal of Thermal Spray Technology*, vol. 28, pp. 517-534, 2019. <https://doi.org/10.1007/s11666-019-00831-x>.

10. C. Lima, R. Libardi, R. Camargo “Assessment of abrasive wear of nanostructured WC-Co and Fe-based coatings applied by HP-HVOF, flame, and wire arc spray”, *Journal of thermal spray technology*, vol.23, pp. 1097-1104, 2014. <https://doi.org/10.1007/s11666-014-0101-6>.

11. B. Wielage, H. Pokhmurska, M. Student “Iron-based coatings arc-sprayed with cored wires for applications at elevated temperatures”, *Surface and Coatings Technology*, vol. 220, pp. 27-35, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.12.013>.

12. P. Sheppard, H. Koiprasert “Effect of W dissolution in NiCrBSi-WC and NiBSi-WC arc sprayed coatings on wear behaviors”, *Surface and*

Coatings Technology, vol. 317, pp. 194-200, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2014.06.008>.

13. A. Karpechenko, M. Bobrov, Yu. Halynkin, Al. Labartkava, An Labartkava “Microstructure and Thermal Conductivity Analysis of Metal-Polymer Composite Coatings Deposited by Electric Arc Spraying”, *Bulletin of the Georgian National Academy of Sciences*, vol. 16, pp. 38-43, 2022.

14. O. Dubovoy, A. Karpechenko, M. Bobrov, et al. “Electric arc spraying of cermet coatings of steel 65G-TiC system”, *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, vol.2, pp. 63–68, 2021. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-2/063>.

15. O. Dubovyi, O. Chechel, M. Bobrov, Yu. Nedel’ko “Perspectives of improving physical and mechanical properties of thermal coatings by electropulse exposure”, *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, vol.1, pp. 82-87, 2017.

16. О.М. Дубовий, А.А. Карпеченко, М.М. Бобров, А.О. Мазуренко, «Пристрій для електродугового напилення композиційних покриттів», *Патент України, МПК C23C 26/02, B05B 7/22, № 111760, 10.06.2016.*

REFERENCES:

1. D. Toma, W. Brandtt, G. Marginean “Wear and corrosion of thermo alloy sprayed cermet coatings”, *Surface and Coatings Technology*, vol.138, pp.149-158, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(00\)01141-5](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(00)01141-5)

2. N. Espallargas, J. Berget, J.M. Guilemany, A.V. Benedetti, P.H. Suegama “Cr₃C₂-NiCr and WC-Ni spray coatings as alternatives to hard chromium for erosion-corrosion resistance”, *Surface and Coating Technology*, vol. 202, pp.1405-1417, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2007.06.048>.

3. L. Fedrizzi, S. Rossi, R. Cristel, P.L. Bonora “Corrosion and wear behavior of HVOF cermet coatings used to replace hard chromium”, *Electrochimica Acta*, vol. 49, pp. 2803-2814, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2004.01.043>.

4. J.M. Guilemany, N. Espallargas, P.H. Suegama, A.V. Benedetti “Comparative study of Cr₃C₂-NiCr coatings obtained by HVOF and hard chromium coatings”, *Corrosion Science*, vol. 48, pp. 2998-3013, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2005.10.016>.

5. A. Sai Jagadeeswar, S. Kumar, B. Venkataraman, P. Suresh Babu, A. Jyothirmayi “Effect of thermal energy on the deposition behavior, wear and corrosion resistance of cold sprayed Ni-WC cermet coatings”, *Surface and Coatings Technology*, vol. 399, 126138, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126138>.

6. V.N. Shukla, H. Trivedi, H. Kumar, A. Yadav “Surface Engineering Analysis of D-Gun Sprayed Cermet Coating in Aggressive Environment”, *Material Today: Proceedings*, vol. 4, pp. 10212-10215, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.06.350>.

7. E. Jonda, M. Szala, M. Sroka, L. Łatka, M. Walczak “Investigations of cavitation erosion and wear resistance of cermet coatings manufactured by HVOF spraying”, *Applied Surface Science*, vol. 608, 155071, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2022.155071>.

8. Q. Liu, Y. Wang, Y. Bai, Z. Li, G. Tan, M. Bao, X. Li, H. Zhan, Y. Sun, N. Chong, R. Wang, Y.S. Ma “Formation mechanism of gas phase in supersonic atmospheric plasma sprayed NiCr-Cr₃C₂ cermet coatings”, *Surface and Coatings Technology*, vol. 397, 126052, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126052>.

9. K. Vasileios, S. Kamnis, B. Allcock, S. Gu “Effects and Interplays of Spray Angle and Stand-off Distance on the Sliding Wear Behavior of HVOF WC-17Co Coatings”, *Journal of Thermal Spray Technology*, vol. 28, pp. 517-534, 2019. <https://doi.org/10.1007/s11666-019-00831-x>.

10. C. Lima, R. Libardi, R. Camargo “Assessment of abrasive wear of nanostructured WC-Co and Fe-based coatings applied by HP-HVOF, flame, and wire arc spray”, *Journal of thermal spray technology*, vol.23, pp. 1097-1104, 2014. <https://doi.org/10.1007/s11666-014-0101-6>.

11. B. Wielage, H. Pokhmurska, M, Student “Iron-based coatings arc-sprayed with cored wires for applications at elevated temperatures”, *Surface and Coatings Technology*, vol. 220, pp. 27-35, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.12.013>.

12. P. Sheppard, H. Koiprasert “Effect of W dissolution in NiCrBSi-WC and NiBSi-WC arc sprayed coatings on wear behaviors”, *Surface and Coatings Technology*, vol. 317, pp. 194-200, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2014.06.008>.

13. A. Karpechenko, M. Bobrov, Yu. Halynkin, Al. Labartkava, An Labartkava “Microstructure and Thermal Conductivity Analysis of Metal-Polymer Composite Coatings Deposited by Electric Arc Spraying”, *Bulletin of the Georgian National Academy of Sciences*, vol. 16, pp. 38-43, 2022.

14. O. Dubovoy, A. Karpechenko, M. Bobrov, et al. “Electric arc spraying of cermet coatings of steel 65G-TiC system”, *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, vol.2, pp. 63–68, 2021. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-2/063>.

15. O. Dubovyi, O. Chechel, M. Bobrov, Yu. Nedel’ko “Perspectives of improving physical and mechanical properties of thermal coatings by electropulse exposure”, *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, vol.1, pp. 82-87, 2017.

16. О.М. Дубовий, А.А. Карпеченко, М.М. Бобров, А.О. Мазуренко, «Пристрій для електродугового напилення композиційних покриттів», *Патент України, МПК C23C 26/02, B05B 7/22, № 111760, 10.06.2016.*

Стаття надійшла до редакції 22 травня 2023 року