

ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДУ ЕЛЕКТРОДУГОВОГО НАПИЛЮВАННЯ ПОКРИТТІВ ДЛЯ ВІДНОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН ТА КОНСТРУКЦІЙ

Г. В. ЧУМАЛО¹, Н. З. МОЗОЛА¹, Т. І. АРТИМ¹,
Р. М. ЮРКЕВИЧ², В. І. ТОПЧІЙ³

¹ Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів;

² Національна академія сухопутних військ ім. Гетьмана Петра Сагайдачного, Львів;

³ Національний університет "Львівська політехніка"

Проаналізовано можливості застосування захисних електродугових покриттів на деталях машин та конструкцій для підвищення їхніх експлуатаційних характеристик, зменшення витрат металів, відновлення зношених деталей. Показано вплив властивостей електродних матеріалів та різних систем легування на характеристики отриманих покриттів. Підтверджено ефективність створених композиційних покриттів з двох різнорідних дротів – порошкових та суцільнотягнутих. Досліджено сучасні тенденції розвитку електродугового методу.

Ключові слова: *електродугове напилення, покриття, порошкові дроти, суцільні дроти, шихта, твердість, зносотривкість.*

The possibilities of using protective electric arc coatings on machine parts and structures to improve their operational characteristics, reduce metal consumption, and renewal of worn parts are analyzed. The influence of parameters of electrode materials and different alloying systems on the characteristics of the obtained coatings is shown. The effectiveness of the composite coatings formed from two dissimilar wires – powder-coated and solid-drawn – are confirmed. Modern tendencies in the development of the electric arc method are studied.

Keywords: *electric arc spraying, coating, powder wires, solid wires, charge, hardness, wear resistance.*

Вступ. Надійність та довговічність автомобілів, технологічного обладнання, механізмів знижуються під час експлуатації внаслідок зношування деталей, корозії, втоми, старіння матеріалу та інших процесів, які викликають несправності та дефекти. Якщо зношення деталей перевищує допустимі значення, то вони підлягають відновленню. Здебільшого це складні деталі високої вартості: колінчасті та розподільні вали, головки та блоки циліндрів, ходові вали тощо [1]. Вартість їх відновлення не перевищує 10...30% затрат на виготовлення нових, що свідчить про економічну доцільність та ефективність ремонтного відновлення деталей машин. Окрім цього, суттєво економлять метал, енергетичні і трудові ресурси та беруть на навколишнє середовище. Застосування корозійно- та зносотривких покриттів дає змогу різко скоротити витрати металів та збільшити надійність, довговічність машин та механізмів.

Для підвищення експлуатаційних характеристик машин та механізмів, збільшення терміну їх роботи, зменшення витрат металів, відновлення зношених деталей все ширше застосовують газотермічне нанесення покриттів на деталі машин та конструкцій: плазмове, газополуменеве, детонаційне, газодинамічне та електродугове напилення [2].

Серед вищезгаданих методів електродугове напилення (ЕДН) покриттів характеризується найвищою продуктивністю за найменших затрат, що особливо зацікавлює дослідників [3–8]. Ця технологія забезпечує відновлення зношених поверхонь та підвищує їх роботоздатність. Перевагами ЕДН порівняно з іншими газотермічними методами є незначне нагрівання деталі (до температури 150°C), висока продуктивність процесу, можливість одержати необхідну товщину напиленого металу у великому діапазоні (0,1...10 mm), простота технологічного процесу. Недоліки методу – недостатньо висока міцність зчеплення покриття з основою.

Параметри електродугового напилення. Типова схема формування покриттів наведена у праці [6]. Під час ЕДН напилюваний матеріал у вигляді дроту безперервно подають у зону утворення дуги, де він плавиться. Під дією стисненого повітря матеріал розпилюється і утворює металоповітряний потік, який переносить розплавлені краплини на поверхню напилення. Параметри процесу такі: тиск повітряного струменя 0,35...0,65 МПа, його витрата 60...150 м³/h, сила струму 80...600 А і напруга 18...35 В, діаметр електродного дроту $d_w = 1...3,2$ mm, дистанція напилення 60...150 mm, продуктивність розпилення $G_n = 2...50$ kg/h.

Одним з істотних недоліків електродугового методу донедавна був низький асортимент використовуваних електродів – дроти суцільного перетину. Використання порошкових дротів (ПД) як електродних матеріалів для ЕДН покриттів дало можливість широко змінювати хімічний склад покриттів, різко розширити область їх використання та отримувати покриття з властивостями на рівні кращих плазмових та надзвукових газотермічних покриттів, але з меншими витратами.

Абразивна зносотривкість ЕДН покриттів. Встановлено, що на опір зношуванню електродугових покриттів суттєво впливають параметри їх напилення. Так, покриття із ПД (Fe–Cr–B–Al (рис. 1)), сформовані за тиску повітря 0,65 МПа, мають приблизно у 1,5 раза більшу зносотривкість за тертя незакріпленим абразивом, ніж покриття, сформовані за тиску 0,3 МПа [9].

Зі зростанням тиску повітря формується дисперсніша структура покриття з більшою кількістю легованих оксидів алюмінію та з меншим розміром пор. При цьому мікротвердість і зносотривкість покриття зростають (рис. 1).

За випробовувань зносотривкості незакріпленим абразивом отримали обернену залежність від тиску струменя повітря (з його зростанням зносотривкість зменшується) (рис. 2). У цьому випадку реалізується інший механізм зношування і покриття руйнується внаслідок різання та (частково) через його багаторазове пластичне деформування абразивними частинками. Вищу зносотривкість матимуть ті покриття, яким властивий більший запас пластичності.

Покриття, сформовані за низького тиску розпилювального повітря (0,3 МПа), утворюються із крупних краплин розплаву ПД (300...500 μm), які вистигають і кристалізуються на металевій підкладці довше, ніж дрібні краплини. Завдяки цьому релаксація напружень у них відбувається повніше і, як наслідок, напруження розтягу, які виникають у крупних краплинах, нижчі. Внаслідок багаторазового своєрідного “переорювання” поверхонь покриттів частинками абразиву мікротріщини в них зароджуються важче. Сліди тертя на їх поверхні від зношування гумовим диском свідчать про те, що в дрібнодисперсних покриттях руйнування відбувається переважно вздовж меж ламелей, а в крупнодисперсних – переважно по тілу ламелей з рівномірнішим розташуванням пошкоджень.

На абразивну зносотривкість ЕДН покриттів найбільше впливає вміст твердих включень боридів у їх структурі [10]. Так, із збільшенням вмісту TiB₂ від 0 до 25...30 mass% їх твердість зростає до 14 GPa, а зносотривкість – у 8 разів, проте за подальшого збільшення його вмісту – зменшується [11, 12]. Подібні результати отримали і у інших працях [13–15]. Із підвищенням дисперсності боридної або карбідної фази у матриці їх зношування зменшується [16–18].

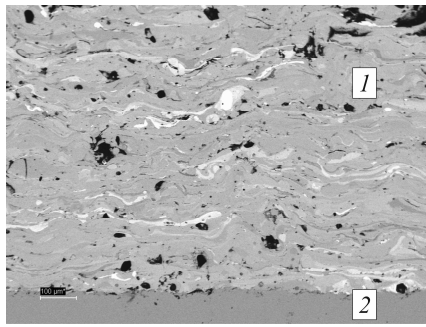


Рис. 1. Fig. 1.

Рис. 1. Типова структура ЕАН покриття із ПД: 1 – ЕАН покриття; 2 – сталева основа.

Fig. 1. Typical structure of EA coating with powder wire:
1 – electric arc sprayed coating; 2 – steel base.

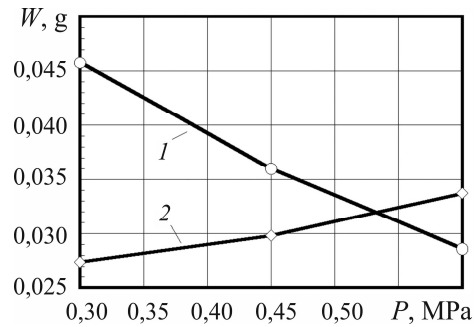


Рис. 2. Fig. 2.

Рис. 2. Вплив тиску струменя розпилювального повітря P на знос W покриттів з ПД системи Fe–Cr–B–Al за випроб незакріпленим (1) та закріпленим (2) абразивом. Режим напилювання: $U = 32$ V, $I = 150$ A, $L = 100$ mm.

Fig. 2. Influence of the sprayed air jet pressure P on the amount of wear W of coatings from the Fe–Cr–B–Al powder wire during tests with unfixed (1) and fixed (2) abrasive. Spraying mode: $U = 32$ V, $I = 150$ A, $L = 100$ mm.

Заміна сталеві малоуглецевої оболонки ПД на нержавну або ніхромову суттєво підвищує зносотривкість (у 15 разів вищу, ніж середньовуглецевої сталі). Причиною їх високої зносотривкості є наявність в структурі покриттів дисперсних фаз боридів TiB_2 . Додавання до шихти ПД додатково 10...12 mass% Sn підвищує зносотривкість покриттів, тоді як додавання 5...8 mass% Al, Si, по 4 mass% Ti і W знижує її. Дослідження електродугових покриттів з ПД систем Fe–B, Fe–Cr–B, Fe–Cr–B–Al, Fe–Cr–C, Fe–Cr–C–Al показали, що їм властива висока мікротвердість $H_{\mu} = 6...12$ GPa. Зносотривкість цих покриттів, яка оцінена за методикою Брінелля–Хаурта, вища у 5,5 раза, ніж покриттів, сформованих із суцільного електродного дроту 06X19H9T [19].

Зносотривкість аморфізованих електродугових покриттів із ПД систем Fe–B і Fe–Cr–B, визначена за цією методикою, в 1,8–1,9 раза вища, ніж оплавленого із нікелевого самофлюсного сплаву ПГ-10Н-01, що є типовим зносотривким матеріалом. Абразивна зносотривкість ЕАН покриттів є на рівні покриття (WC–Ni), отриманого надзвуковою газополуменевою металізацією, та наплавленого шару із ПД системи Fe–Cr–B [20, 21]. На основі отриманих експериментальних результатів запропоновано визначати зносотривкість композиційних покриттів за формулою

$$1/W = f_1/W_1 + f_2/W_2,$$

де $1/W$, $1/W_1$, $1/W_2$ – зносотривкості покриття, матриці та включень TiB_2 , відповідно; f_1 – об'ємна частка металевої матричної фази; f_2 – об'ємний вміст TiB_2 [22, 23].

Загалом зі збільшенням продуктивності напилювання (внаслідок підвищення струму від 100 до 350 A) зносотривкість всіх покриттів зростає в 2 рази. Підвищення напруги дуги від 29 до 37 V збільшує її на 50%, а зростання дистанції напилювання від 70 до 200 mm на 50% її знижує. Абразивна зносотривкість зростає зі збільшенням у в'язкій матриці композиційного покриття металокерамічних частинок (понад 50%).

Отже, коли твердість абразиву вища за твердість покриттів, зносотривкість останніх не корелює з мікротвердістю і їх знос однаковий. Коли ж мікротвердість

абразиву менша за твердість покриттів, тоді зносотривкість корелює з мікротвердістю – що вища мікротвердість покриттів, то більша їх абразивна зносотривкість.

Зносотривкість покриттів за граничного тертя. Під час дослідження трибологічних характеристик (зокрема коефіцієнта тертя μ) сталевих автомобільних валів, металізованих ЕДН і неметалізованих, за змащування і без нього виявили, що для напильної сталі коефіцієнт тертя μ на 5...30% нижчий, ніж для гартованої [24].

Позитивно на зносотривкість покриттів за граничного тертя впливає їх поруватість, яка сприяє акумулюванню мастила в порах і поліпшує умови змащування. Показано, що за низьких навантажень (< 20 N) та швидкостей ковзання (< 1 m/s) переважає окиснювальне зношування покриття і на поверхні тертя формується фрагментарна ($< 20\%$ площі контактування) оксидна плівка Fe_2O_3 . За жорсткіших режимів (швидкості ковзання > 1 m/s і невисокі навантаження < 20 N) на поверхні тертя утворюються оксидні плівки мішаного типу Fe_2O_3 , FeO та Fe_3O_4 , які вкривають вже $\sim 50\%$ площі контактування. Зношування покриття при цьому мінімальне. За високих навантажень (> 20 N) і низьких швидкостей ковзання (< 1 m/s) домінує механізм зношування через подрібнення ламелей, руйнування та окиснення поверхневих шарів. Таким чином, показано, що для електродугових покриттів дієвим є не один, а декілька механізмів зношування, які залежать в кожному випадку від інтенсивності енергетичного впливу на зону тертя. У низці публікацій [25–28] наведено порівняльний аналіз зносотривкості покриттів з ПД на залізній та нікелевій основах за умов граничного тертя.

Зокрема, порівняли за зносотривкістю покриття з ПД систем $\text{Fe}-\text{B}_4\text{C}$, $\text{Fe}-\text{B}$, $\text{Fe}-\text{Cr}-\text{B}$, $\text{Fe}-\text{Cr}-\text{B}_4\text{C}$, отриманих різними методами розпилювання (газополуменим, ЕДН та надзвуковим газополуменим з імітуванням роботи реальної трибопари типу “поршневе кільце–циліндр”). Виявлено, що за малих навантажень (до 4 МПа) у парі з контртілом із чавуну СЧ НМД-НВ 235 ($R_a = 2,5$ μm) електродуговим покриттям властивий найвищий коефіцієнт тертя, а зі зростанням навантаження (до 8...12 МПа) він знижується. Відзначено також, що за всіх досліджених питомих навантажень електродугові покриття з ПД системи $\text{Fe}-\text{B}$ характеризуються найвищою, а системи $\text{Fe}-\text{B}_4\text{C}$ – найнижчою зносотривкістю [29].

Досліджено також трибологічні характеристики покриттів з ПД систем $\text{Fe}-\text{Cr}-\text{B}-\text{Al}$ з відносно термостабільним фазовим складом, а також з ПД $\text{Fe}-\text{Cr}-\text{C}-\text{Al}$ з фазовими перетвореннями під час тертя. Покриття випробовували на установці СМЦ-2 за схемою “диск–контртіло” та умов граничного тертя ковзання в мастилi М14В2 [30].

Виявили, що за граничного тертя найвищу зносотривкість мають електродугові покриття з ПД систем $\text{Fe}-\text{Cr}-\text{B}-\text{Al}$ та $\text{Fe}-\text{Cr}-\text{C}-\text{Al}$ з додаванням 1,3 mass% графіту за їх роботи у парі із колодкою з бронзи БрС-30. Їх зношування менше, ніж еталона зі сталі 45 і приблизно в 4 рази менше, ніж покриттів із суцільного високовуглецевого дроту зі сталі У8, плазмового покриття з порошку ПГ-19Н-01, а також покриття, наплавленого вуглецевим дротом.

Композиційні електродугові покриття. Зносотривкі композиційні покриття (КП) наносили із застосуванням комбінації з ПД системи $\text{Fe}-\text{Cr}-\text{B}-\text{C}$ (ПП-АН-305 та ПП-АН-307), які відрізнялись вмістом Cr і B, та суцільних дротів (СД) з різним вмістом вуглецю (Св-08 та 65Г), при цьому ПД був як катод, а СД – анод [31].

Краплини із СД формують м’яку матрицю із мікротвердістю 1500...3000 МПа (Св-08) та 3000...4500 МПа (65Г), а з розплаву ПД – тверду матрицю із мікротвердістю 5000...7000 МПа (ПД-305) та 6000...10000 МПа (ПД-307). Показано, що підвищена зносотривкість КП та високі трибологічні характеристики в трибопарі ПД ($\text{Fe}-\text{Cr}-\text{B}$) + Св-08 з контртілом із БрС-30 зумовлена присутністю у ньому ве-

ликої кількості дисперсних боридів Fe_2B та карбідів $(\text{FeCr})_{23}\text{C}_6$, які забезпечують низький коефіцієнт тертя та зменшують інтенсивність зношування до $I = (0,15...0,25) \cdot 10^{-12}$. Встановлено, що за абразивного зношування закріпленим абразивом зносотривкість КП у 2,1 раза вища, ніж покриттів із однойменних дротів, і в 1,4 раза вища, ніж у сталі ШХ15. Результати досліджень свідчать про можливість застосування обраного способу для відновлення зношених деталей машин та конструкцій для підвищення їхніх експлуатаційних характеристик.

У праці [32] вперше отримали електродугові композиційні металокерамічні покриття методом напилення з суцільного дроту марки 65Г із вдуванням у зону високотемпературного дугового розряду порошку карбіду титану на підкладку з високоякісної вуглецевої конструкційної сталі 45 та визначили їх фізико-механічні властивості. Встановлено, що вміст TiC у металокерамічних електродугових покриттях зростає зі збільшенням струму, напруги та витрат порошку. Показано, що міцність зчеплення покриття без TiC становить 27 МПа, а максимальне значення (37 МПа) є за вмісту карбідної фази 18,4%. Встановлено, що пористість у металокерамічних покриттях зменшується до $\sim 5\%$, а мікротвердість покриття зростає на 15%.

Упродовж останнього десятиліття широко досліджують також і аморфні покриття. Вивчено [33] зношувальність аморфних КП на основі Fe, зміцнених частинками Al_2O_3 . Ці покриття показали унікальну комбінацію зношування і стійкості до корозії, що дає можливість використовувати їх у різноманітних промислових виробках. На сьогодні розроблено аморфні КП на основі Fe з додаванням частинок оксиду алюмінію $f = 5...20 \text{ mass\%}$. Показано, що покриття мають гарне поєднання твердості та зносотривкості порівняно з монолітним аморфним покриттям. КП демонструють нижчий коефіцієнт тертя, ніж монолітне аморфне як у сухих, так і вологих умовах. Крім того, КП з 20 mass% Al_2O_3 показує найвищу зносотривкість.

Активация електродугового напилення. На сьогодні реалізовані процедури для активації напилення: зменшення розміру розпиленних частинок; активація поверхні підкладки механічними методами (збільшення шорсткості); збільшення ентальпії розпилюваного потоку введенням термореактивних компонентів; зовнішній вплив на покриття (ультразвукові хвилі, електромагнетні поля; термо- або хіміко-термічна обробка тощо).

У Фізико-механічному інституті ім. Г. В. Карпенка НАН України для відновлення та продовження експлуатаційного ресурсу деталей машин застосовано надзвуковий електродуговий метод напилення покриттів із порошкових дротів [34].

Надзвукову швидкість повітряного струменя (число Маха 2) отримали за використання сопла Лавалю з вертикальним розміщенням двох повітряних каналів з критичним діаметром отворів по 2,2 mm та підвищення тиску повітря від 0,6 до 1,2 МПа. Показано, що таке зростання тиску зумовлює пришвидшення повітряного потоку у 2 рази від 300 до 600 m/s. При цьому швидкість диспергованих повітряним струменем краплин під час розпилення електродних порошкових дротів зростає від 60...90 до 160...220 m/s, а їх розмір зменшується. Також це підвищення тиску зумовлює зменшення товщини ламелей покриття, формування дисперсніших зміцнювальних фаз у покритті; при цьому зростає твердість, зносотривкість та когезивна міцність [35].

На відміну від методу ЕДН, який використовує стиснене повітря, технологія надзвукового електродугового напилення покриттів HVAFArc використовує як розпилювальний газ продукти згоряння пропану та повітря. При цьому швидкість розпиленних частинок металевого розплаву сталі X20X13 зростає від 75 до 125 m/s. Покриття із ПД Fe–Cr–B–C, напилені за допомогою HVAFArc, мають

меншу пористість, вищу на 30% твердість, на 50% міцність зчеплення та в два рази менший коефіцієнт тертя, ніж ЕДН покриття [36–38].

Надзвукові покриття із ПД FeMnCrNiBNbAl мають мікротвердість 700...800 HV_{0,1}, пористість 1,03% та перевершують зносотривкість сталі Q235 на 66%. Основним механізмом зношування як надзвукових, так і дозвукових покриттів було відколювання матеріалу, що супроводжувалося незначним окисним і абразивним зношуванням [39, 40].

ВИСНОВКИ

Аналіз літературних джерел підтвердив, що велику увагу в останні роки приділяють саме композиційним покриттям. Розроблені вітчизняні КП можуть мати багатообіцяюче застосування в інженерії поверхні, де одночасно потрібні як висока стійкість до корозії, так і зносотривкість. Вітчизняні системи Fe–Cr–B–Al з вмістом алюмінію (2...12 mass%) і бору (3...4 mass%) забезпечують покриття високої твердості (HV_{0,3} = 800...1200), а системи Fe–Cr–C–Ti з матричною фазою мартенситу – високу когезивну міцність та низькі залишкові напруження розтягу. Актуальними залишаються питання взаємозв'язку складу шихти ПД та комбінацій ПД і СД з трибологічними властивостями одержаних покриттів, що стримує широке їх застосування у виробництві. Окрім цього, визначення оптимальних технологічних параметрів напилення за використання різномірних порошкових дрітків залишається важливим завданням, розв'язання якого призведе до підвищення терміну експлуатації деталей у різних галузях промисловості: транспортної, оборонної, гірничодобувної, енергетичної, комунальної та харчопереробної.

1. *Електродугові відновні та захисні покриття* / В. І. Похмурський, М. М. Студент, В. М. Довгунік, Г. В. Похмурська, І. Й. Сидорак. – Львів: ФМІ ім. Г. В. Карпенка НАН України, 2005. – 192 с.
2. *Fauchais P. and Vaedelle A. Thermal sprayed coatings used against corrosion and corrosive wear* // Adv. plasma spray applications. – 2012. <https://doi.org/10.5772/34448>
3. *A review on the wear, corrosion and high-temperature resistant properties of wire arc-sprayed Fe-based coatings* / Joseph Ndiithi Ndumia, Min Kang, Bertrand Vigninou Gbenontin, Jinran Lin, and Samuel Mbugua Nyambura // Nanomaterials. – 2021. – **11**. – P. 25–27. <https://doi.org/10.3390/nano111025272>
4. *Optimization of the chromium content of powder wires of the Fe–Cr–C and Fe–Cr–B systems according to the corrosion resistance of electric-arc coatings* / T. R. Stupnyts'kyi, M. M. Student, H. V. Pokhmurska, and V. M. Hvozdet's'kyi // Materials Science. – 2016. – **52**, № 2. – P. 165–172. <https://doi.org/10.1007/s11003-016-9939-8>
5. *Assessment of abrasive wear of nanostructured WC–Co and Fe-based coatings applied by HP-HVOF, flame, and wire arc spray* / C. Lima, R. Libardi, R. Camargo, H. Fals, and V. Ferraresi // J. of Thermal Spray Technol. – 2014. – **23**. – Article number 10971104. <https://doi.org/10.1007/s11666-014-0101-6>
6. *Mechanical properties of arc coatings sprayed with cored wires with different charge compositions* / M. Student, V. Hvozdet's'kyi, T. Stupnyts'kyi, O. Prentkovskis, and P. Skackauskas // Coatings. – 2022. – **12**, № 7. – Article number 925. <https://doi.org/10.3390/coatings12070925>
7. *Arc-sprayed iron-based coatings for erosion-corrosion protection of boiler tubes at elevated temperatures* / V. Pokhmurskii, M. Student, V. Gvozdeckii, T. Stupnitskyi, O. Student, B. Wielage, and H. Pokhmurska // J. of Thermal Spray Technol. – 2013. – **22**(5). – P. 808–810. <https://doi.org/10.1007/s11666-013-9921-z>
8. *Iron-based coatings arc-sprayed with cored wires for applications at elevated temperatures* / B. Wielage, H. Pokhmurska, M. Student, V. Gvozdet's'kyi, T. Stupnyckij, and V. Pokhmurskii // Surf. and Coat. Technol. – 2013. – **220**. – P. 27–35. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.12.013>
9. *Phase composition of coatings of Fe–Cr–Al system prepared by the method of electric arc metallizing* / V. I. Pokhmurskij, M. M. Student, I. I. Sidorak, I. A. Ryabtsev, Yu. M. Kuskov // Avtomaticheskaya Svarka. – 2002. – **10**. – P. 20–23.

10. Pokhmurska H. V., Dovhunya V. M., and Student M. M. Wear-resistance of laser modified electric arc coatings made of powder wire FMI-2 // *Materials Science*. – 2003. – **39**, № 4. – P. 533–538. <https://doi.org/10.1023/B:MASC.0000010931.01363.c5>
11. Dallaire S. and Levert H. Synthesis and deposition of TiB₂ containing materials by arc spraying // *Surf. and Coat. Technol.* – 1992. – **50**, № 2. – P. 241–248. [https://doi.org/10.1016/0257-8972\(92\)90007-W](https://doi.org/10.1016/0257-8972(92)90007-W)
12. Consolidation, microstructure and mechanical properties of newly developed TiB₂-based materials / J. M. Sanchez, M. G. Barandika, J. Gil-Sevillano, and F. Castro // *Scr. Metall. Mater.* – 1992. – **26**. – P. 957–962. [https://doi.org/10.1016/0956-716X\(92\)90690-G](https://doi.org/10.1016/0956-716X(92)90690-G)
13. Wear performance of Fe–Cr–CB hardfacing coatings: Dry sand/rubber wheel test and ball-on-disc test / Hülya Durmuş, Nilay Çömez, Canser Gül, Melis Yurddaşkal, Metin Yurddaşkal ül // *Int. J. of Refractory Metals and Hard Mater.* – 2018. – **77**. – P. 37–43. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2018.07.006>
14. Fang J. J., Li Z. X., and Shi Y. W. Microstructure and properties of TiB₂-containing coatings prepared by arcspraying // *Appl. Surf. Sci.* – 2008. – **254**, № 13. – P. 3849–3858. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2007.12.034>
15. Tillmann W., Hagen L., and Schröder P. Tribological characteristics of tungsten carbide reinforced arc sprayed coatings using different carbide grain size fractions // *Tribology in Industry*. – 2017. – **39**, № 2. – P. 168–182. <https://doi.org/10.24874/ti.2017.39.02.03>
16. Particle image velocity (PIV) as a tool to investigate the influence of nozzle configuration and spray parameters on the arc spray process / F. Bach, T. Copitzky, G. Tedeger, and J. Prehm // *Proc. Conf.: ITSC'2002*. – P. 67–72.
17. Wilden J., Jahn S., and Drescher V. Innovative solution extending applications spectrum of arc spraying // *Proc. II Międzynarodowa Konferencja: Natryskiwanie Ciepłnego Metalizacja w Przemysle – dziś i jutro (Szklarska Poreba, 21–23 września, 2009)*. – *Przegląd Spawalnictwa*, 2009. – **9**. – P. 14–17.
18. Erosion behavior of WC_p–Fe₃Al composite coating produced by high velocity arc spray at elevated temperature / X. Binchi, M. Shinig, T. Baohong, and L. Xiubing // *Proc. Conf.: ITSC'2002*. – P. 133–138.
19. Structural, mechanical, and tribological properties of hard coatings / Peihu Gao, Qiaoqin Guo, Yazhe Xing, and Yongchun Guo // *Coatings*. – 2023. – **13**. – Article number 325. <https://doi.org/10.3390/coatings13020325>
20. Dallaire S. and Levert H. Development of cored wires for improving the abrasion wear resistance of austenitic stainless steel // *J. of Thermal Spray Technol.* – 1997. – **6**, № 4. – P. 456–461. <https://doi.org/10.1007/s11666-997-0031-7>
21. Microstructure and abrasive-wear resistance of the vibration-deposited metal of core wires of the basic Fe–Cr–B system / A. A. Voitovych, H. V. Pokhmurs'ka, M. M., and O. Z. Student // *Materials Science*. – 2016. – **52**, № 3. – P. 365–370. <https://doi.org/10.1007/s11003-016-9965-6>
22. Sanchez J. M., Barandika M. G., and Gil-Sevillano J. Consolidation, microstructure and mechanical properties of newly developed TiB₂-based materials // *Scr. Metall. Mater.* – 1992. – **26**. – P. 957–962. [https://doi.org/10.1016/S0025-5408\(98\)00202-5](https://doi.org/10.1016/S0025-5408(98)00202-5)
23. Research on microstructure and properties of coating produced by high velocity electric wire arc spraying of TiB₂/Al₂O₃ cored wire / Wang Borchers, Wang Liuying, Su Xunjia, and Zhang Xuetao // *ITSC200 (Osaka, May 10–12, 2004)*, Paper No: itsc2004p0096. – P. 96–100. <https://doi.org/10.31399/asm.cp.itsc2004p0096>
24. Полищук И. Е., Назаренко П. В., Острица А. Е. Износостойкие газотермические покрытия на основе железа // *Проблеми трибології*. – 1997. – № 1. – С. 28–36.
25. Hagen L., Paulus M., and Tillmann W. Microstructural and tribo-mechanical properties of arc-sprayed CoCr-based coatings // *J. of Thermal Spray Technol.* – 2022. – № 31. – P. 2229–2242. <https://doi.org/10.1007/s11666-022-01440-x>
26. Tillmann W., Hagen L., and Schröder P. Investigation on the tribological behavior of arc-sprayed and hammer-peened coatings using tungsten carbide cored wires // *J. of Thermal Spray Technol.* – 2017. – № 26. – P. 229–242. <https://doi.org/10.1007/s11666-016-0447-z>
27. Structure and tribological properties of coatings produced by flux-cored wire electric arc metallizing / V. I. Pokhmurskij, M. M. Student, V. M. Dovgunik, Yu. M. Kuskov, and I. I. Ryabtsev // *Avtomaticheskaya Svarka*. – 2003. – **8**. – P. 13–23.

28. *Tribological properties of arc sprayed coatings obtained from FeCrB and FeCr-based powder wires* / H. Pokhmurska, V. Dovhunyk, M. Student, E. Bielanska, and E. Beltowska // *Surf. and Coat. Technol.* – 2002. – **151–152**. – P. 490–494.
[https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(01\)01577-8](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(01)01577-8)
29. *Effect of friction on phase transitions in the surface layers of FeCrB + Al gas-thermal coatings* / M. M. Student, V. M. Dovhunyk, I. I. Sydorak, H. V. Pokhmurs'ka, and O. I. Yas'kiv // *Materials Science.* – 2000. – **36**, № 4. – P. 607–611.
<https://doi.org/10.1023/A:1011386710665>
30. *Effect of friction on the structural and phase transformations in the subsurface layer of a FeCr+Al+C gas-thermal coating* / V. M. Dovhunyk, M. M. Student, I. I. Sydorak, H. V. Pokhmurs'ka, and O. I. Yas'kiv // *Materials Science.* – 2000. – **36**, № 5. – P. 770–775.
<https://doi.org/10.1023/A:1011328412434>
31. *Abrasive wear resistance and tribological characteristics of electrometallized composite coatings* / M. M. Student, S. I. Markovych, V. M. Hvozdet'skyi, O. S. Kalakhan, and V. M. Yuskiv // *Materials Science.* – 2022. – **58**, № 1. – P. 96–104.
<https://doi.org/10.1007/s11003-022-00636-4>
32. *Electric arc spraying of cermet coatings of steel 65G–TIC system* / O. M. Dubovoy, A. A. Karpechenko, M. M. Bobrov, O. S. Gerasin, and O. O. Lyamar // *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu.* – 2021. – № 2. – C. 63–68.
<https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-2/063>
33. *Wear behaviors of Fe-based amorphous composite coatings reinforced by Al₂O₃ particles in air and in NaCl solution* / M. Yasir, C. Zhang, W. Wang, P. Xu, and L. Liu // *Materials & Design.* – 2015. – **88**. – P. 207–213. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.08.142>
34. *The influence of size and speed of drops on the structure and properties of electric-ARC sprayed* / H. Pokhmurs'ka, M. Student, V. Hvozdet'skyi, T. Stupnytskyi, and V. Posuvailo // *Proc. of the Int. Thermal Spray Conf.* – 2017. – **2**. – P. 1031–1034.
<https://doi.org/10.31399/asm.cp.itsc2017p1031>
35. *The effect of increasing the air flow pressure on the properties of coatings during the arc spraying of cored wires* / M. Student, V. Hvozdet'skyi, O. Student, O. Olenyuk, and L. Titova // *Strojnicky Casopis.* – 2019. – **69**, № 4. – P. 133–146.
<https://doi.org/10.2478/scjme-2019-0048>
36. *Uniquecoat. HVAF arc 300 TM.* Available at (referred at 17.5.2017). – *Електронний ресурс.* – Режим доступу <http://www.uniquecoat.com/hvafarc.html>
37. *Study on the properties of FeCrNi/CBN composite coating with high velocity arc spraying* / Pan Ding, Xiao-juan Liu, Jin-jun Liu, Jing-bo Li, Hui-qin Li, Han-yu Zhao, Jun-yu Duan, and You-zhou Jiao // *Arabian J. of Chemistry.* – 2018. – **11**. – P. 935–941.
<https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2018.02.006>
38. *Microstructure and tribological properties of Fe-based composite coatings prepared by high-velocity arc spraying* / J. Liu, J. Lin, M. Kang, J. N. Ndumia, and F. Huang // *J. of Thermal Spray Technol.* – 2022. – **31**, № 3. – P. 644–657.
<https://doi.org/10.1007/s11666-022-01338-8>
39. *Microstructure and tribological properties of Fe-Based-Al₂O₃–B₄C composite coatings prepared by high-velocity arc spraying* / H. Li, F. Huang, J. Lin, M. Kang, J. N. Ndumia, and J. Liu // *Coatings.* – 2022. – **12**, № 12. – Article number 1956.
<https://doi.org/10.3390/coatings12121956>
40. *Microstructure and wear performance of high-velocity arc sprayed FeMnCrNiBNbAl coating* / Wenhui Qiang, Min Kang, Jitao Liu, and Joseph Ndiithi Ndumia // *Coatings.* – 2024. – **14**. – Article number 428. <https://doi.org/10.3390/coatings14040428>

Одержано 20.03.2024