

ВПЛИВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ФАКТОРІВ НА МІЦНІСТЬ ЗЧЕПЛЕННЯ ГАЗОТЕРМІЧНИХ ПОКРИТТІВ З ОСНОВОЮ

І. О. Шуляр*, В. В. Кустов, Б. Р. Шуляр, Ю. Я. Присяжнюк, А. О. Молчанов, Д. І. Бургарт

ІФНТУНГ; 76019, Україна, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15; тел. +380666083852;
e-mail: ira.shuliar@gmail.com

Підвищення якості поверхонь деталей машин шляхом покращення фізико-механічних характеристик верхніх шарів металів і сплавів є актуальною задачею сучасного машинобудування. Крім того, під час застосування прогресивних технологічних процесів слід прагнути до підвищення продуктивності обробки та економії металів. Вирішенню вказаних задач сприяють дослідження, розроблення й впровадження процесів, заснованих на комплексній дії на поверхню оброблюваних деталей. В роботі розглядаються питання, пов'язані з покращенням експлуатаційних властивостей металевих поверхонь. Зокрема, стосовно впливу різних способів попередньої підготовки поверхонь деталей і режимів процесу електродугового напилення металевих (нержавіюча сталь, алюміній, цинк) покриттів на міцність їх зчеплення зі сталеву основу. Уточнено методику випробування. Вказані питання вивчалися за допомогою експериментальної механізованої електрометалізаційної установки, створеної на базі токарно-гвинторізного верстата. Показано, що на якість напилюваних покриттів значний вплив мають такі режими електродугової металізації: відстань від зони горіння дуги до оброблюваної поверхні, тиск розпилюваного повітря, напруга і сила струму. Міцність зчеплення отримуваних покриттів залежить також від способу попередньої підготовки матеріалу основи. Відносно кращі результати за міцністю зчеплення отримані при попередньому створенні на оброблюваній поверхні рельєфу типу «рваної нарізі», децю менше значення – при попередній віброелектроіскровій обробці. Останній спосіб попередньої підготовки напилюваної поверхні слід вважати найбільш перспективним з точки зору його універсальності та продуктивності.

Ключові слова: електродугове напилення; основа; методи підготовки поверхонь; режими напилення; віброелектроіскровий спосіб підготовки поверхні; міцність зчеплення покриття з основою.

Improving the quality of the surfaces of machine parts by improving the physical and mechanical characteristics of the upper layers of metals and alloys is an urgent task of modern engineering. In addition, when applying progressive technological processes, efforts should be made to increase processing productivity and save metals. Research, development and implementation of processes substrate on complex action on the surface of processed parts contribute to the solution of these problems. In the presented work, some issues related to the research of the processes of improving the operational properties of metal surfaces are considered, in particular, the effect of various methods of preliminary preparation of the surfaces of parts and modes of the process of electric arc spraying of metal (stainless steel, aluminum, zinc) coatings on the strength of their adhesion to the steel base is considered, and a refined test methodology. These questions were studied with the help of an experimental mechanized electro-metallization unit, created on the basis of a lathe and screw-cutting machine. It is shown that the following modes of electric arc metallization have a significant influence on the quality of sprayed coatings: the distance from the arc burning zone to the treated surface, the pressure of the spraying air, voltage and current. The adhesion strength of the obtained coatings also depends on the method of preliminary preparation of the substrate material. Relatively better results in terms of adhesion strength were obtained with the preliminary creation of a relief of the "torn cut" type on the treated surface, a slightly lower value with preliminary electrospark treatment. The last method of preliminary preparation of the sprayed surface should be considered the most promising from the point of view of its versatility and productivity.

Key words: electric arc spraying; substrate, methods of surface preparation; vibroelectrospark method of surface preparation; spraying modes; adhesion strength of the coating to the base.

Вступ

Процеси напилення газотермічних покриттів досить широко застосовуються в машинобудуванні та інших галузях промисловості як для виготовлення нових, так і для відновлення (ремонт) зношених деталей машин і обладнання [1-4], покриттів покращують експлуатаційні властивості робочих поверхонь, у тому числі й внутрішніх [5]. Напиленням деталей,

наприклад, підвищують зносостійкість, корозійну стійкість, поліпшують антифрикційні властивості.

Як свідчить теорія і практика газотермічного напилення, успіхи в створенні таких покриттів значною мірою пов'язані із вивченням процесів адгезії – отримання міцного зчеплення покриття з основним матеріалом (основою), яке забезпечується силами механічного зчеплення

та фізико-хімічної взаємодії [6]. Міцність адгезійного з'єднання є однією з найважливіших характеристик, яка визначає надійність і роботоздатність деталей, які зміцненні газотермічними покриттями [7, 8]. Одним із кроків вирішення вказаної проблеми, на нашу думку, є представлені матеріали цього дослідження, які стали мотивацією до вивчення впливу технологічних факторів процесу напилення покриттів на міцність зчеплення їх з основою.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень та публікацій

Узагальнена теорія зчеплення поки що відсутня, хоча передумови для її створення вже існують. В прикладних дослідженнях, присвячених отриманню стійкого та надійного зв'язку напиленого покриття з основою, вивчаються питання впливу на дану характеристику матеріалів покриття і основи, геометричних характеристик напиленої поверхні, технологічних чинників процесу напилення та ін. При цьому основний вплив на міцність зчеплення покриттів з основою чинять способи підготовки поверхні під напилення та режими напилення на металеву [6, 9, 10], керамічну [11, 12] чи скляну [13] поверхні.

Існуючі методи підготовки поверхні поділяють за типом дії на механічні, хімічні та фізичні. Підготовка напиленої поверхні сприяє прискоренню фізико-хімічної взаємодії матеріалу покриття з основою внаслідок створення шорсткості та активації. Однак основний внесок у міцність зчеплення багатьох покриттів з основою робить саме механічне зчеплення [6, 10].

Підготовка поверхні деталей важливою і для формування двошарових покриттів [14], зокрема алюмінієвих, зовнішній шар яких піддають плазмовому електролітичному оксидуванню для підвищення зносостійкості та корозійної тривкості [15, 16].

Серед способів підготовки поверхні найбільш поширеними або перспективними вважаються струминно-абразивна обробка, нарізування рваної нарізи, хімічне травлення [17], а також поверхневе лазерне структурування та модифікування енергетичними полями [18, 19]. У праці [20] запропоновано створення заглибин типу «ластівчин хвіст».

Струминно-абразивним методом формують поверхні з розвиненою шорсткістю. Перевагою його є висока продуктивність процесу, зміцнення поверхневих шарів деталей, що позитивно впливає на загальну її міцність. Недолік методу – складність обладнання, яке повин-

но оснащуватись вентиляцією та комунікаціями стисненого повітря, шкідливий вплив на здоров'я людини та оточуюче середовище

Метод нарізування рваної нарізи реалізується із застосуванням нескладного стандартного обладнання і забезпечує, в порівнянні з іншими способами, найбільш міцне зчеплення товстошарових покриттів з основою, однак він знижує втомну міцність деталей.

Перспективним вважається метод хімічного травлення робочих поверхонь деталей (наприклад, в розчинах кислот і лугів). При цьому формується поверхня з розвиненим шорстким рельєфом на деталях різної форми (круглих, плоских, фасонних). Ускладнення, що стримують застосування цього способу, пов'язані зі складністю видалення залишків хімічних реакцій, які утворюються під час травлення матеріалу основи.

На особливу увагу заслуговують електрофізичні методи підготовки поверхні, до яких, зокрема, належить вдосконалений віброелектроіскровий спосіб обробки поверхні деталі [21]. Суть цього методу полягає в тому, що оброблювану деталь занурюють в середовище гранул-електродів у контейнері, який здійснює коливальний рух. На оброблювану деталь і контейнер з гранулами за допомогою струмовідводів подається напруга технологічного струму. Під час проходження струму через електричний ланцюг «деталь – катод, гранули контейнер – анод» між поверхнею деталі та електропровідними гранулами виникають електроіскрові розряди, які забезпечують направлене перенесення матеріалу гранул на оброблювану поверхню з формуванням шару з регульованою шорсткістю. При цьому обробка ведеться одночасно по всій поверхні деталі. Запропонований метод є прогресивним, але недостатньо вивченим, тому й обраний нами як об'єкт для дослідження.

Висвітлення невирішених раніше частин загальної проблеми

Для успішного впровадження віброелектроіскрового способу попередньої підготовки поверхні в практику газотермічного напилення в роботі передбачається дослідити технологію обробки в іскрових розрядах деталей з конструкційних сталей. Це дозволить формувати рельєф поверхні деталі, який забезпечить високу адгезію напилених на неї покриттів, а також визначити фактори, якими спосіб електроіскрової обробки вирізняється серед інших способів підготовки поверхні, на які напилюють покриття.

Формулювання цілей

Мета роботи полягає в порівнянні віброелектроіскрового способу з іншими методами обробки, що застосовуються для підготовки поверхонь деталей перед нанесенням газотермічних покриттів, з точки зору забезпечення високої міцності зчеплення з основою та оптимізації за цим критерієм технологічних режимів процесу.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- розробити конструкцію та виготовити установку для віброелектроіскрової обробки поверхонь деталей перед газотермічним напильненням покриттів;

- дослідити вплив способу підготовки сталевих поверхонь на міцність зчеплення з основою покриттів, напильнених із різних матеріалів.

Висвітлення основного матеріалу дослідження

Для проведення запланованих досліджень на базі патенту України [21] нами розроблено конструкцію та виготовлено установку для віброелектроіскрової підготовки поверхонь деталей перед газотермічним напильненням покриттів (рис. 1).

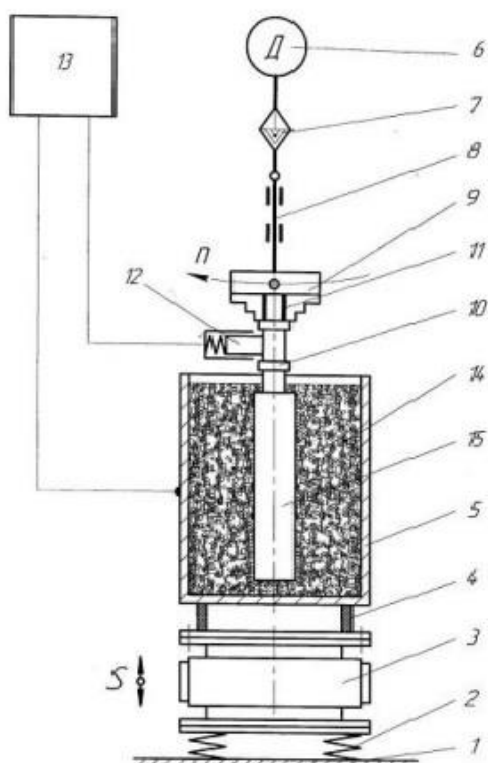


Рисунок 1 – Схема установки для віброелектроіскрової обробки поверхонь деталей перед газотермічним напильненням покриттів [21]

Установка для віброелектроіскрової обробки складається зі станини 1, пружинної підвіски 2, вібратора 3, електроізолюючих опор 4, металевий контейнер-електрод 5, привідного електродвигуна 6, органа налаштування частоти обертання 7 шпинделя 8, трикулачкового самоцентруючого патрона 9, оправки 10, електроізоляційної втулки 11, струмопідводу 12, джерела живлення 13 та електропровідні частинки 14, у середовищі яких знаходиться деталь 15.

Процес підготовки поверхні деталі перед напильненням покриттів здійснюється таким чином. Деталь 15 нерухомо кріпиться на оправці 10, яку встановлюють через електроізоляційну втулку 11 в трикулачковому самоцентрівному патроні 9, змонтованому на шпинделі 8. Оправка 10, яка має струмовідвід (на кресленні не показаний) для подачі напруги на деталь 15, що кріпиться на ній, підключається до негативного полюса джерела живлення 13 (наприклад, імпульсного генератора) через ковзаючий струмовідвід 12, а металевий контейнер-електрод 5 – до позитивного. Електропровідні частинки (гранули) 14 завантажують у внутрішню порожнину металевий контейнер-електрод 5, встановленого на вібруючій пружинній підвісці 2. Джерелом вібрацій служить вібратор 13, який може бути різного типу, наприклад, електромагнітний, електромеханічний, пневматичний тощо.

Після увімкнення вібратора 3, який приводить у коливальний рух контейнер-електрод 5 з частотою від 30 до 60 Гц, деталі 15 циліндричної форми надають обертання від привідного електродвигуна 6. Швидкість обертання деталі 15 регулюють за допомогою органа налаштування частоти обертання 7, який забезпечує надання шпинделю 8 кількості обертів від 40 до 70 хв⁻¹. Під час обробки деталі 15 плоскої форми зазвичай обертовий рух відсутній. Деталь 15 є фактично зануреною у середовище вібруючих електропровідних частинок 14, які утворюють «киплячий шар». Завдяки цьому відпадає необхідність регулювати тиск електродів (вібруючих електропровідних частинок) на поверхню деталі 15. Далі вмикають джерело живлення 13. У результаті виникнення при цьому іскрових розрядів між електропровідними частинками 14 і поверхнею деталі 15 здійснюється спрямоване перенесення (наплавлення) матеріалу з вібруючих частинок на оброблювану поверхню цієї деталі, що підлягає підготовці перед напильненням покриттів.

Після віброелектроіскрової обробки на поверхні формується міцно з'єднаний шар, утво-

Таблиця 1 – Хімічний склад сталі 35 (масові %)

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu	As	Fe
0.32-0.40	0.17-0.37	0.30-0.60	до 0.30	до 0.04	до 0.035	до 0.25	до 0.30	до 0.08	Решта

рений із матеріалу електропровідних частинок і металу деталі 15, та має добре розвинуту шорсткість, яка й забезпечує високу міцність зчеплення напилених покриттів зі сталеву основою. Запропонований спосіб підготовки поверхні характеризується підвищеною продуктивністю, дозволяє проводити одночасно обробку всієї поверхні декількох деталей різної форми, в тому числі й складної, (наприклад, з ексцентричними поверхнями) без додаткових переустановок. Описані в праці [22] теоретичні підходи щодо вибору складу металевих сполук доцільно використовувати для раціонального вибору композиції гранул для віброелектроіскрової підготовки поверхонь деталей. Простота запропонованого способу забезпечує можливість широкої механізації та автоматизації технологічного обладнання. Слід відзначити, що розроблений технологічний процес віброелектроіскрової обробки є також екологічно чистим.

У праці проведено порівняльні дослідження впливу на міцність зчеплення покриттів з основою, які були напилені електродуговим металізатором на попередньо підготовлену поверхню, оброблену запропонованим віброелектроіскровим способом підготовки поверхні та традиційними методами – нарізанням рваної нарізі і хімічним травленням.

Нарізання рваної нарізі проводилось в цих і наступних дослідах на циліндричних зразках із вуглецевої сталі 35 (ДСТУ 7809:2015), хімічний склад якої наведено в табл. 1.

Обробку зразків діаметром 25 мм проводили на токарно-гвинторізному верстаті моделі 16K20Ф3 за традиційною технологією. Як інструмент використовували різьбонарізний різець, оснащений твердосплавною ріжучою пластиною із твердого сплаву (ВК6), з переднім кутом рівним нуль градусів. Вказаний різець був закріплений у різцетримачі верстата зі зміщенням його вершини відносно осі обертання шпинделя на 3 мм та вильотом 125 мм. Швидкість різання становила 10 м/хв. Основні параметри нарізі такі: крок $P=0,5$ мм; висота профілю $H=0,14$ мм. Завдяки створенню розвиненої шорсткості поверхні забезпечувалась досить висока міцність зчеплення з нею напиленого шару покриття. До недоліків цього методу, як згадувалось вище, відноситься зниження втомної міцності матеріалу основи на 20 – 30 %; об-

меженість застосування для загартованих і твердих матеріалів, нестабільності процесу різання, а також невисока технологічність процесу нарізування рваної нарізі для плоских поверхонь деталей.

Під час реалізації хімічного методу було досліджено процес травлення зразків у розчинах азотної кислоти (ГОСТ 4461–77) різної концентрації (7 %, 15 % та 40 %). Результати досліджень показали, що при цьому отримується глибоко уражений рельєф поверхні з великою кількістю гострих виступів (через електрохімічну неоднорідність сталі), які сприяють міцній адгезії (зчепленню) покриття з основою. Однак, на практиці цей показник був нижчим, ніж у випадку застосування попереднього способу підготовки поверхні. Це пояснюється, насамперед, наявністю на поверхні обробленої сталі залишків продуктів реакції, утворених внаслідок взаємодії травильного розчину з компонентами цієї сталі, оскільки повне їх видалення потребує додаткових операцій та спряжене зі значними труднощами.

Для нанесення підшарів електроіскровою обробкою застосовувався спосіб і установка, описані вище [21]. Сформований даною обробкою підшар міцно з'єднаний з основою і має розвинену шорстку поверхню, висота нерівностей якої може регулюватися технологічними режимами процесу в межах від 0,05 мм до 0,5 мм. Матеріалом частинок електродів для попередньої обробки поверхні зразків зі сталі 35 слугували нікель і нержавіюча сталь у вигляді гранул або нарізі з величиною діаметра Феррета від 0,5 до 3,0 мм. Час обробки зазвичай складав від 20 до 30 хв. При цьому в металевому контейнер-електроді можна одночасно обробляти декілька зразків або деталей. Результати проведених методичних дослідів показали, що під час попередньої електроіскрової обробки вуглецевої сталі 35 (електроіскровому легуванні) нікелем і нержавіючою сталлю не встановлено суттєвої різниці у величинах міцності зчеплення напиленого покриття з основою. Тому в подальшому при проведенні дослідів на великій кількості зразків з міркувань економічності як матеріал частинок електродів використовували нержавіючу сталь марки 12X18H10T (ГОСТ 5632–72), а не гостродефіцитний нікель.

Таблиця 2 – Режими електрометалізації

Матеріал покриття (дротів)	Робоча напруга U, В	Струм дуги I, А	Тиск розпиленого повітря, атм.	Дистанція напилення L, мм
Нержавіюча сталь	34	60 – 70	5	100
Алюміній	38	30	5	70 – 90
Цинк	22	30	5	70 – 90

Таблиця 3 – Міцність зчеплення покриттів залежно від способу підготовки поверхні

Матеріал, що напилюється	Міцність зчеплення, МПа		
	Нарізування рваної нарізі	Хімічна підготовка	Нанесення підшарів віброелектроіскровою обробкою
Нержавіюча сталь	21,0	5,8	12,3
Алюміній	16,5	4,2	9,8
Цинк	11,6	2,5	8,5

На підготовлені зазначеними вище методами зразки покриття напилювали методом електродугового напилення (електродуговою металізацією), який характеризується використанням високопродуктивного нескладного за конструкцією технологічного обладнання з широкими можливостями вдосконалення [23, 24]. Для цього використовували експериментальну установку, яка включає такі основні вузли: джерело живлення, електродуговий металізаційний апарат ЕМ–6, встановлений на супорті токарно-гвинторізного верстату ТВ16; компресор; систему витяжної вентиляції. Як матеріал для нанесення покриттів на поверхню сталевих зразків використовували дроти діаметром 2 мм з нержавіючої сталі 12Х18Н10Т, алюмінію та цинку.

Міцність зчеплення покриттів з основою визначали за відомим методом зрізу. Діаметр циліндричних зразків становив 25 мм, довжина зразків – 35 мм, довжина пояса напиленого покриття – 10 мм. Товщина покриття – 1,5 мм. Навантаження проводили на гідравлічному пресі із зусиллям 20 тонн.

Виконані в роботі експерименти дали змогу встановити вплив на міцність зчеплення покриттів із основою способу попередньої підготовки поверхні, а також вплив режимів роботи електрометалізаційного апарату – наприклад, тиску розпилюючого повітря, відстані від апарата до поверхні зразка (дистанції напилення), сила струму на дузі (швидкості подачі дротів), напрузі ні дузі.

Аналіз результатів досліджень показав залежності, які не протирічать даним раніше виконаних робіт:

- із збільшенням тиску повітря міцність зчеплення зростає, оскільки при цьому збіль-

шується кінетична енергія частинок матеріалу, що розпилюється;

- із зростанням дистанції напилення (L=100-120 мм) міцність зчеплення покриття з основою зростає. Подальше підвищення даного параметра призводить до зниження міцності зчеплення;

- збільшення сили струму дуги (при електрометалізації – відповідне збільшення швидкості подачі дротів електродів) призводить до зменшення значень міцності зчеплення, що пояснюється зростанням розмірів розпалюваних частинок, а відповідно і зниженням їх кінетичної енергії за рахунок зменшення швидкості польоту частинок;

- зростання напруги на дузі проти оптимальних значень, які обираються в залежності від фізико-механічних властивостей матеріалу, який напилюють, стає причиною зниження міцності зчеплення покриття з основою через збільшення розмірів частинок.

В наших дослідах (із врахуванням вищевикладеного) при нанесенні захисних покриттів із різних матеріалів оптимальні режими електродугової металізації наведені в табл. 2.

Вказані режими електродугового напилення застосовувались і при проведенні порівняльних дослідів з визначення впливу попередньої підготовки поверхні оброблюваних зразків. Результати вимірювання міцності зчеплення напилених покриттів з основою залежав від метода попередньої підготовки поверхні, застосованих в проведених дослідженнях наведено в табл. 3.

Значення величин міцності зчеплення в таблиці наведені усереднені за результатами випробовування трьох – п'яти зразках для кож-

ного виду підготовки поверхні та матеріалу покриття, що напильється.

Отримані величини міцності зчеплення напилених покриттів з основою при використанні віброелектроіскрової обробки дещо менші, ніж у випадку створення на оброблюваній поверхні деталі рваної нарізі. Однак, технологічно простіше здійснити віброелектроіскрову обробку плоских деталей і деталей складної конфігурації, а також підготовлених загартованих поверхонь. Можливість нанесення підшарів з регульованою в досить широкому діапазоні шорсткості та практично з будь-якого струмопровідного матеріалу додатково підвищує перспективність застосування цього методу як методу попередньої підготовки оброблюваних поверхонь для формування електрометалізаційних покриттів.

У праці [25] наведено результати дослідження впливу режимів електроіскрової обробки на властивості напилених покриттів і продемонстровано можливість використання цієї обробки не тільки для підготовки поверхні сталевих деталей перед газотермічним напильненням покриттів, але й для покращення якості цих покриттів.

Висновки

В результаті проведених технологічних досліджень:

- розроблено та виготовлено установку для віброелектроіскрової підготовки поверхні деталі перед напильненням покриттів та встановлено технологічні режими її роботи;

- проведено порівняльні дослідження способу віброелектроіскрового і традиційних методів підготовки, а саме: нарізання рваної нарізі, а також і хімічного травлення, з точки зору забезпечення ними міцності зчеплення напилених покриттів зі сталеву основою. Встановлено, що найкращі результати одержані при попередній обробці поверхні методом нарізання рваної нарізі;

- попри відносно менші значення міцності зчеплення напилених покриттів з основою (одержані на даному етапі досліджень) спосіб віброелектроіскрової підготовки слід вважати перспективним, з огляду на його універсальність, технологічність та продуктивність;

- визначено характер впливу технологічних параметрів процесу електродугового напильнення (тиску розпилюючого повітря, дистанції напильнення, сили струму дуги та напруги на ній) на міцність зчеплення напилених металевих покриттів (нержавіюча сталь, алюміній, цинк) зі сталеву основою.

Дослідження фінансувалося Міністерством освіти і науки України за грантами на виконання проєктів 0122U002082 та 0123U101858.

Література

1. Towards hybridization of ultra-high molecular weight polyethylene composites by thermally sprayed alumina: Feasibility and bond strength assessment / R. Bensaada et al. *Materials and Design*. 2023. Vol. 227. art. no. 111779. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2023.111779>.

2. Thiem P. G., Chorny A., Smirnov I. V., Krüger M. Comparison of microstructure and adhesion strength of plasma, flame and high velocity oxy-fuel sprayed coatings from an iron aluminide powder. *Surface and Coatings Technology*. 2017. Vol. 324, No 5. P. 498 – 508. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.06.016>.

3. Pawlowski L. The science and engineering of thermal spray coatings. Hoboken, USA: John Wiley & Sons, 2008. 656 p. <https://doi.org/10.1002/9780470754085>.

4. Сокур Т. Д., Попіль Ю. С., Корж В. М. Огляд сучасного стану і перспектив розвитку газотермічних способів нанесення покриття. *Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут», Серія Машинобудування*. 2011. Том 2, № 61. С. 168–171. URL: <https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/4961/3/168.1.pdf> (дата звернення: 07.11.2023).

5. CFD Enhanced Thermal Spray Process for Coating of Cylinder Bores of Car Engines / B. Schilder et al. *Journal of Thermal Spray Technology*. 2020. Vol. 29, No 4. P. 546–559. <https://doi.org/10.1007/s11666-020-01011-y>.

6. Luzan S. A., Gorbachevskaya O. M., Bisha V. M. Analiz sposobov podgotovki poverhnosti detaley mashin dlya napyleniya gazotermicheskikh pokryitiy. *Mehanika ta mashinobuduvannya*. 2012. No 1. P. 124–128. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/17455> (data zvernennya: 07.11.2023).

7. Oukach S., Pateyron B., Pawłowski L. Physical and chemical phenomena occurring between solid ceramics and liquid metals and alloys at laser and plasma composite coatings formation: A review. *Surface Science Reports*. 2019. Vol. 74, No 3. P. 213–241. <https://doi.org/10.1016/j.surfrep.2019.06.001>.

8. Ряховский А. В., Косенко В. В., Власенко В. Н. Особенности оценки прочности сцепления детонационных покрытий. *Системы озброєння і військова техніка*. 2012. № 3 (31).

- С. 215–217. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/soivt_2012_3_54 (дата звернення: 07.11.2023).
9. Dolgov N. A., Buketov N. I., Zubretska N. A. On the problem of modeling adhesive strength of protective coating depending on the content and conditions of formation of composition. *Strength of Materials*. 2012. Vol. 44, No 2. P. 212–217. <https://doi.org/10.1007/s11223-012-9374-5>.
10. Тамаргазин А. А., Лопата Л. А., Брюсило Ю. В., Довжук С. А. Влияние факторов процесса электродугового напыления на структурообразование и свойства покрытий. *Техніка в сільськогосподарському виробництві. Галузеве машинобудування і автоматизація*. 2010. Вип. 23. С. 287–297. URL: <https://mapiea.kntu.kr.ua/pdf/23/54.pdf> (дата звернення: 07.11.2023).
11. Essential Factors Influencing the Bonding Strength of Cold-Sprayed Aluminum Coatings on Ceramic Substrates / R. Drehmann et al. *Journal of Thermal Spray Technology*. 2018. Vol. 27, No 3. P. 446–455. <https://doi.org/10.1007/s11666-018-0688-0>.
12. Осипов С. А., Лебедев В. Г., Усов А. В. Нанесение плазменных покрытий на металло-керамические материалы. *Труды Одесского политехнического университета*. 2006. Вып. 1 (25). С. 39–31. URL: <https://pratsi.op.edu.ua/app/webroot/articles/1312547825.pdf> (дата звернення: 07.11.2023).
13. Белоус В. А., Лунев В. М., Павлов В. С., Турчина А. К. Количественное определение прочности сцепления тонких металлических пленок со стеклом. *Вопросы атомной науки и техники*. 2006. № 4. С. 221–223. URL: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/80336> (дата звернення: 07.11.2023).
14. Dolgov N. A., Smirnov I. V., Besov A. V. Sintered metals and alloys: Studying the elastic properties and adhesive strength of plasma-sprayed double-layer coatings during tensile tests. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2015. Vol. 54, No (1–2), art. no. A006. P. 40–46. <https://doi.org/10.1007/s11106-015-9677-8>.
15. Design of a Two-Layer Al–Al₂O₃ Coating with an Oxide Layer Formed by the Plasma Electrolytic Oxidation of Al for the Corrosion and Wear Protections of Steel / L. Ropyak et al. *Progress in Physics of Metals*. 2023. Vol. 24, No 2. P. 319–365. <https://doi.org/10.15407/ufm.24.02.319>.
16. Optimization of Plasma Electrolytic Oxidation Technological Parameters of Deformed Aluminum Alloy D16T in Flowing Electrolyte / L. Ropyak et al. *Ceramics*. 2023. Vol. 6, No 1. P. 146–167. <https://doi.org/10.3390/ceramics6010010>.
17. Гвоздецький В. М. Електродугові відновні і захисні покриття з порошкових дрітків: За матеріалами наукового повідомлення на засіданні Президії НАН України 13 грудня 2017 року. *Вісник НАН України*. 2018. № 3. С. 79–84. <https://doi.org/10.15407/visn2018.03.079>.
18. Enhancement of the adhesion of wire arc sprayed coatings on carbon fiber-reinforced plastic by surface laser structuring / K. Gustke et al. *Coatings*. 2021. Vol. 11, No 4. art. no. 467. <https://doi.org/10.3390/coatings11040467>.
19. Dolgov M. A., Zubretska N. A., Buketov A. V., Stukhlyak P. D. Use of the method of mathematical experiment planning for evaluating adhesive strength of protective coatings modified by energy fields. *Strength of Materials*. 2012. Vol. 44, No 1. P. 81–86.
20. Influence of dovetail microstructures on adhesive tensile strength and morphology of thermally sprayed metal coatings / H. Liborius et al. *Procedia CIRP*. 2018. Vol. 71. P. 299–304. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.05.024>.
21. Пат. на корисну модель 67165 Україна: МПК6 B05D3/14. Спосіб підготовки поверхні деталей перед газотермічним напиленням покриттів: / В. В. Кустов, Л. Я. Роп'як, А. К. Смаглюк. № u201107081; заявл. 06.06.11; опубл. 10.02.12, Бюл. № 3/2012. 3 с. URL: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/690854/> (дата звернення: 07.11.2023).
22. Prysyzhnyuk P., Di Tommaso D. The thermodynamic and mechanical properties of Earth-abundant metal ternary boride Mo₂(Fe,Mn)B₂ solid solutions for impact- and wear-resistant alloys. *Materials Advances*. 2023. Vol. 4, No 17. P. 3822–3838. <https://doi.org/10.1039/d3ma00313b>.
23. Кустов В. В., Маковійчук М. В., Роп'як Л. Я. Дослідження руху та нагрівання частинок порошку в процесі напилення композиційних покриттів електродуговим методом. *Наукові нотатки*. 2014. № 44. С. 154–163. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nn_2014_44_26 (дата звернення: 07.11.2023).
24. Разработка электродуговых покрытий для восстановления штоков гидроцилиндров горнодобывающего оборудования с использованием порошковых проволок / Т. Р. Ступницкий та ін. *Автоматическая сварка*. 2017. № 4 (763). С. 48–53. <https://doi.org/10.15407/as2017.04.09>.
25. Вплив технологічних параметрів обробки в іскрових розрядах на показники газотермічних покриттів / В. В. Кустов та ін. *Нафтогазова енергетика*. 2014. № 1. С. 135–142. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nge_2014_1_18 (дата звернення: 07.11.2023).

References

1. Towards hybridization of ultra-high molecular weight polyethylene composites by thermally sprayed alumina: Feasibility and bond strength assessment / R. Bensaada et al. *Materials and Design*. 2023. Vol. 227. art. no. 111779. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2023.111779>.
2. Thiem P. G., Chornyi A., Smirnov I. V., Krüger M. Comparison of microstructure and adhesion strength of plasma, flame and high velocity oxy-fuel sprayed coatings from an iron aluminide powder. *Surface and Coatings Technology*. 2017. Vol. 324, No 5. P. 498 – 508. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.06.016>.
3. Pawlowski L. The science and engineering of thermal spray coatings. Hoboken, USA: John Wiley & Sons, 2008. 656 p. <https://doi.org/10.1002/9780470754085>.
4. Sokur T. D., Popil Yu. S., Korzh V. M. Ohliad suchasnoho stanu i perspektyv rozvytku hazotermichnykh sposobiv nanessenia pokryttia. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu Ukrainy «Kyivskiy politekhnichnyi instytut», Seriya Mashynobuduvannia*. 2011. Vol. 2, No 61. P. 168–171. URL: <https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/4961/3/168.1.pdf> (data zvernennia: 07.11.2023). [in Ukrainian]
5. CFD Enhanced Thermal Spray Process for Coating of Cylinder Bores of Car Engines / B. Schilder et al. *Journal of Thermal Spray Technology*. 2020. Vol. 29, No 4. P. 546–559. <https://doi.org/10.1007/s11666-020-01011-y>.
6. Luzan S. A., Gorbachevskaya O. M., Bisha V. M. Analiz sposobov podgotovki poverhnosti detaley mashin dlya napyleniya gazotermicheskikh pokryt'iy. *Mehanika ta mashynobuduvannia*. 2012. No 1. P. 124–128. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Pres/17455> (data zvernennia: 07.11.2023).
7. Oukach S., Pateyron B., Pawłowski L. Physical and chemical phenomena occurring between solid ceramics and liquid metals and alloys at laser and plasma composite coatings formation: A review. *Surface Science Reports*. 2019. Vol. 74, No 3. P. 213–241. <https://doi.org/10.1016/j.surfrep.2019.06.001>.
8. Riakhovskiy A. V., Kosenko V. V., Vlasenko V. N. Osobennosti otsenky prochnosti stsepleniya detonatsionalnykh pokryt'iy. *Systemy ozbroiennia i viiskova tekhnika*. 2012. No 3 (31). P. 215–217. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/soivt_2012_3_54 (data zvernennia: 07.11.2023). [in Ukrainian]
9. Dolgov N. A., Buketov N. I., Zubretskaya N. A. On the problem of modeling adhesive strength of protective coating depending on the content and conditions of formation of composition. *Strength of Materials*. 2012. Vol. 44, No 2. P. 212–217. <https://doi.org/10.1007/s11223-012-9374-5>.
10. Tamarhazyn A. A., Lopata L. A., Briusylo Yu. V., Dovzhuk S. A. Vliyanye faktorov protsessy elektroduhovoho napyleniya na strukturo-obrazovanye y svoistva pokryt'iy. *Tekhnika v silskohospodarskomu vyrobnytstvi. Haluzeve mashynobuduvannia i avtomatyzatsiia*. 2010. Vol. 23. P. 287–297. URL: <https://mapiea.kntu.kr.ua/pdf/23/54.pdf> (data zvernennia: 07.11.2023). [in Ukrainian]
11. Essential Factors Influencing the Bonding Strength of Cold-Sprayed Aluminum Coatings on Ceramic Substrates / R. Drehmann et al. *Journal of Thermal Spray Technology*. 2018. Vol. 27, No 3. P. 446–455. <https://doi.org/10.1007/s11666-018-0688-0>.
12. Osipov C. A., Lebedev V. G., Usov A. V. Nanosenie plazmennykh pokryt'iy na metallo-keramicheskie materialy. *Trudy Odesskogo politekhnicheskogo universiteta*. 2006. Vol. 1 (25). P. 39–31. URL: <https://pratsi.op.edu.ua/app/webroot/articles/1312547825.pdf> (data zvernennia: 07.11.2023). [in Russian]
13. Belous V. A., Lunev V. M., Pavlov V. S., Turchina A. K. Kolichestvennoe opredelenie prochnosti stsepleniya tonkikh metallicheskh plenok so steklom. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki*. 2006. No 4. P. 221–223. URL: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/80336> (data zvernennia: 07.11.2023). [in Russian]
14. Dolgov N. A., Smirnov I. V., Besov A. V. Sintered metals and alloys: Studying the elastic properties and adhesive strength of plasma-sprayed double-layer coatings during tensile tests. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2015. Vol. 54, No (1–2), art. no. A006. P. 40–46. <https://doi.org/10.1007/s11106-015-9677-8>.
15. Design of a Two-Layer Al–Al₂O₃ Coating with an Oxide Layer Formed by the Plasma Electrolytic Oxidation of Al for the Corrosion and Wear Protections of Steel / L. Ropyak et al. *Progress in Physics of Metals*. 2023. Vol. 24, No 2. P. 319–365. <https://doi.org/10.15407/ufm.24.02.319>.
16. Optimization of Plasma Electrolytic Oxidation Technological Parameters of Deformed Aluminum Alloy D16T in Flowing Electrolyte / L. Ropyak et al. *Ceramics*. 2023. Vol. 6, No 1. P. 146–167. <https://doi.org/10.3390/ceramics6010010>.
17. Hvozdet'skiy V. M. Elektroduhovi vidnovni i zakhysni pokryttia z poroshkovykh drotiv: Za materialamy naukovoho povidomlennia na zasidanni Prezydii NAN Ukrainy 13 hrudnia

2017 roku. *Visnyk NAN Ukrainy*. 2018. № 3. P. 79–84. <https://doi.org/10.15407/visn2018.03.079>. [in Ukrainian]

18. Enhancement of the adhesion of wire arc sprayed coatings on carbon fiber-reinforced plastic by surface laser structuring / K. Gustke et al. *Coatings*. 2021. Vol. 11, No 4. art. no. 467. <https://doi.org/10.3390/coatings11040467>.

19. Dolgov M. A., Zubretska N. A., Bukevov A. V., Stukhlyak P. D. Use of the method of mathematical experiment planning for evaluating adhesive strength of protective coatings modified by energy fields. *Strength of Materials*. 2012. Vol. 44, No 1. P. 81–86.

20. Influence of dovetail microstructures on adhesive tensile strength and morphology of thermally sprayed metal coatings / H. Liborius et al. *Procedia CIRP*. 2018. Vol. 71. P. 299–304. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.05.024>.

21. Pat. na korysnu model 67165 Ukraina: MPK6 V05D3/14. Sposib pidhotovky poverkhni detalei pred hazotermichnym napyleniam pokryttiv / V. V. Kustov, L. Ya. Ropiak, A. K. Smahliuk. № u201107081; zaiavl. 06.06.11; opubl. 10.02.12, Biul. No 3/2012. 3 p. URL: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/690854/> (data zvernennya: 07.11.2023). [in Ukrainian]

22. Prysyzhnyuk P., Di Tommaso D. The thermodynamic and mechanical properties of Earth-abundant metal ternary boride $\text{Mo}_2(\text{Fe},\text{Mn})\text{B}_2$ solid solutions for impact- and wear-resistant alloys. *Materials Advances*. 2023. Vol. 4, No 17. P. 3822–3838. <https://doi.org/10.1039/d3ma00313b>.

23. Kustov V. V., Makoviichuk M. V., Ropiak L. Ya. Doslidzhennia rukhu ta nahrivannia chastynok poroshku v protsesi napylenia kompozytsiinykh pokryttiv elektroduhovym metodom. *Naukovi notatky*. 2014. No 44. P. 154–163. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nn_2014_44_26 (data zvernennya: 07.11.2023). [in Ukrainian]

24. Razrabotka elektrodugovyih pokrytity dlya vosstanovleniya shtokov gidrotsilindrov gornodobyivayushego oborudovaniya s ispolzovaniem poroshkovyih provolok / T. R. Stupnitskiy ta In. *Avtomaticheskaya svarka*. 2017. No 4 (763). P. 48–53. <https://doi.org/10.15407/as2017.04.09>. [in Russian]

25. Kustov V. V., Makoviichuk M. V., Ropiak L. Ya. Doslidzhennia rukhu ta nahrivannia chastynok poroshku v protsesi napylenia kompozytsiinykh pokryttiv elektroduhovym metodom. *Naukovi notatky*. 2014. No 44. S. 154–163. [in Ukrainian]