

ВПЛИВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ОБРОБКИ В ІСКРОВИХ РОЗРЯДАХ НА ПОКАЗНИКИ ГАЗОТЕРМІЧНИХ ПОКРИТТІВ

В.В. Кустов, І.О. Шуляр, А.К. Смаглюк, П.І. Войтенко

ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15; тел. (0342) 727184;

e-mail: public@nimg.edu.ua

Досліджено процес обробки газотермічних покриттів методом віброелектроіскрового легування. Наведено результати порівняльних експериментів щодо оцінки впливу таких технологічних параметрів процесу обробки, як тривалість обробки, напруга початку розряду та ємність конденсаторної батареї на зміну ваги та показники поверхні зразків із суцільного матеріалу та з напиленим покриттям, а саме: розмірів, шорсткості поверхні та міцності зчеплення з основою. Встановлено, що ці характеристики для зразків з напиленим покриттям є дещо менші, ніж для зразків із суцільного матеріалу.

Ключові слова: напилене покриття, композиційне покриття, віброелектроіскрове легування, розмір, вага, шорсткість поверхні, міцність зчеплення з основою.

Исследован процесс обработки газотермических покрытий методом виброэлектроискрового легирования. Приведены результаты сравнительных экспериментов по оценке влияния таких технологических параметров процесса обработки, как продолжительность обработки, напряжение начала разряда и емкость конденсаторной батареи на изменение веса и показатели поверхности образцов из цельного материала и с напыленным покрытием, а именно: размеров, шероховатости поверхности и прочности сцепления с основанием. Установлено, что эти характеристики для образцов с напыленным покрытием несколько меньше, чем для образцов из сплошного материала.

Ключевые слова: напыленное покрытие, композиционное покрытие, виброэлектроискровое легирование, размер, вес, шероховатость поверхности, прочность сцепления с основанием.

In this paper the processing of thermal coatings by the vibro spark alloying is investigated. The results of comparative experiments are provided in order to evaluate the effect of technological processing parameters such as the processing time, initial voltage and capacity of the capacitor bank on the weight change and samples surface parameters of solid material and the spray coating, namely: the change in weight, size, surface roughness and adhesion to the substrate. It was established that these characteristics for the spray coating samples are slightly lower than for solid material samples.

Keywords: spray coating, composite coating, vibration spark alloying, size, weight, surface roughness, adhesion to the substrate.

Для сучасного машинобудування характерне застосування функціонально-орієнтованих технологій [1], принципи яких використовуються на різних стадіях виготовлення продукції, починаючи від отримання заготовок, виготовлення деталей та їх зміцнення і до складання виробів. Важливим напрямком використання цих технологій є процеси створення захисних покриттів і, зокрема, отриманих методами газотермічного напилення [2].

Захисні покриття, які отримують методами газотермічного напилення (ГТН), і зокрема електродуговою металізацією [3], знаходять досить широке застосування з метою покращення властивостей робочих поверхонь деталей машин як при виготовленні, так і при відновленні під час ремонту. В сучасних умовах постійно зростаючих вимог до якісних характеристик поверхні виробів [3] (в тому числі виробів із покриттям) підвищуються відповідно і вимоги до якості цих покриттів, що, як свідчить практичний досвід, не завжди відповідають за рівнем своїх властивостей високим експлуатаційним вимогам.

Існує ряд технологій для покращення якісних показників покриттів, нанесених методами ГТН [4]. До них слід віднести термообробку [5], пластичне деформування [6], просочування хімічними розчинами [7], дифузійну металіза-

цію [8] та ін. Ці види обробки газотермічних покриттів надають останнім високу твердість, зносостійкість, корозійну та термостійкість, розширюють можливі сфери їх застосування. Поряд з вказаними традиційними методами в останній час все більше поширення в даній сфері знаходять електрофізичні методи обробки газотермічних покриттів, такі як лазерне легування [9], анодно-механічна обробка [10] та електроімпульсне зміцнення [11, 12].

Слід, однак, відзначити, що більшість із вказаних технологій покращують окремі захисні властивості покриттів. Наприклад, пластичним деформуванням поверхні покриття досягають зменшення його пористості; термообробкою досягають структурних змін матеріалу покриття, або підвищують міцність зчеплення його з основою; просоченням хімічним розчином збільшують щільність напилених шарів. В той же час деталі із захисними покриттями працюють, як правило, в середовищах, де крім домінуючого чинника, для захисту від шкідливої дії якого призначено обробку покриття, існують ще ряд несприятливих чинників, які, хоча і меншою мірою, все ж негативно впливають на роботоздатність шарів покриття.

Електроіскрова обробка використовується для зміцнення суцільних металів [13, 14], однак у літературі практично відсутні дані про електро-

Таблиця 1 – Технологічний маршрут формування композиційних напилених покриттів з використанням віброелектроіскрової обробки

Назва операції	Технологічне обладнання
Підготовка поверхні деталі для напилення покриття	Установка для дробоструминної обробки
Напилення покриття на робочі поверхні деталі	Установка для електродугового напилення
Механічна обробка напиленого покриття	Токарний верстат, шліфувальний верстат
Віброелектроіскрова обробка напиленого покриття	Установка для ВЕІЛ
Контроль	Мікрометр, індикатор, профілометр-профілограф, інструментальний мікроскоп, аналітична вага

іскрову обробку напилених покриттів, що стримує їх більш широке застосування в техніці.

Виходячи з цього, **метою даної роботи** є розроблення технології електроіскрового легування напилених покриттів та дослідження впливу технологічних параметрів на властивості поверхні деталі з покриттям.

Для вирішення поставленої мети досліджень нами розроблено комбінований спосіб, який ґрунтується на обробці газотермічних покриттів в іскрових розрядах методом електроіскрового легування. Легування дасть змогу підвищити міцність зчеплення з основою, тобто покращить одну із основних характеристик покриття, що визначає його роботоздатність. Така обробка зменшує пористість основного покриття, підсилюючи тим самим, його корозійну стійкість, а шляхом підбору відповідних легуючих матеріалів цей метод дозволяє формувати антифрикційні та зносостійкі шари. Однак, успішне практичне використання даного методу для обробки газотермічних покриттів пов'язане з певними труднощами, які викликаються тим, що процес електроіскрового легування (ЕІЛ) характеризується значною кількістю технологічних параметрів, а загальноприйнята теорія формування цим методом поверхневих шарів відсутня. Оскільки ще не створено узагальнену модель електроіскрового легування, що не дозволило розробити нормативи технологічних режимів, які необхідні для досягнення конкретних результатів, для створення технології електроіскрового легування йдуть, як правило, експериментальним шляхом. Це вимагає проведення відповідних експериментальних досліджень при розробці нових напрямків використання зазначеного методу зокрема обраного нами для обробки газотермічних покриттів в іскрових розрядах. Тому перед нами в цьому дослідженні було поставлено завдання винайти і дослідити спосіб подальшої обробки напиленого покриття, який би комплексно вирішував задачу якісного захисту покритої поверхні виробу, підвищуючи його надійність та довговічність.

Для електроіскрової обробки газотермічних покриттів було використано спосіб віброелектроіскрового легування (ВЕІЛ) [15], який реалізується наступним чином: оброблювана деталь – катод – занурюється у середовище гранул – електродів, розміщених у віброуючому струмопровідному контейнері – аноді. Через

утворений таким чином ланцюг пропускають імпульси електричного струму. Внаслідок контактування гранул з поверхнею оброблюваної деталі, виникають іскрові розряди, під дією яких відбувається спрямоване перенесення матеріалу гранул на поверхню зміцнюваної деталі. При цьому на останній формується шар композиційного покриття, утвореного з матеріалів напилених частинок покриття та гранул. Створення таких покриттів проводилося за розробленою нами технологією, основні операції якої наведено в таблиці 1.

В основу запропонованої технології ВЕІЛ було покладено принципи, закономірності, які пов'язують технологічні параметри процесу з характеристиками отримуваних шарів. При цьому вивчали технологічні фактори, які впливають на кількість і якість перенесеного матеріалу з аноду на катод, на будову мікрорельєфу покриття, на послідовність його формування, що дозволило в подальшому визначитися з оптимальними режимами обробки.

Відпрацювання технології проводили на дослідних зразках циліндричної та плоскої форми різних розмірів. Матеріал зразків – сталь 45 ГОСТ 1050-88 або сталь 40Х ГОСТ 4543-71. Матеріал напилюваних покриттів із дровів діаметром 2 мм приймали ідентичним до матеріалу суцільних зразків. Режими електродугового напилення з використанням електродугового металізатора: струм дуги $I = 70 \text{ А}$, швидкість подачі дровів $V = 0,7 - 1 \text{ м/хв.}$, напруга на дузі $U = 26 - 38 \text{ В}$, тиск розпилюючого повітря $P = 0,5 - 0,55 \text{ МПа}$. Розробку технології почали з вибору матеріалу легуючих гранул – електродів. На підставі результатів попередніх досліджень було обрано гранули твердих сплавів Т15К6 і ВК8 як такі, що забезпечують мінімальні витрати в поєднанні із високою продуктивністю процесу електроіскрового легування при досягненні високоякісних властивостей сформованих поверхневих шарів за такими показниками, як міцність зчеплення з основою, шорсткість, твердість, зносостійкість та ін. Досліди проводили на розробленій нами лабораторній установці, яка дозволяє змінювати напругу початку розряду в межах від 12 до 220 В, ємність конденсаторної батареї – від 1 до 320 мкФ. Під час формування покриттів інші технологічні параметри мали такі значення: частота імпульсів технологічного струму $f = 100 \text{ Гц}$; амплітуда коливань контейнера

$A=2,2 \cdot 10^{-3}$ м; частота обертання зразка $n=0,4 \text{ с}^{-1}$; частота коливань контейнера $F=25$ Гц.

На даному етапі роботи вивчали показники, що характеризують інтенсивність віброелектроіскрового легування напиленого покриття у порівнянні з суцільною сталлю вказаними вище марками твердого сплаву, а саме: зміна ваги ΔG та діаметра ΔD (товщина покриття) зразків після обробки та показники, що визначають якість композиційного покриття: шорсткість, міцність зчеплення з основою.

В результаті проведених попередніх методичних експериментів було встановлено, що на дані показники найбільш суттєво впливають технологічні параметри, вибір яких проводився з дотриманням вимог їх незалежності, однозначності, керованості, відсутності лінійних кореляційних зв'язків, а саме: тривалість обробки ВЕІЛ – τ , хв.; напруга початку розряду – U , В; ємність конденсаторної батареї – C , мкФ; частота імпульсів технологічного струму – f , Гц; амплітуда коливань контейнера з гранулами – A , м; частота коливань контейнера – F , Гц.

З аналізу апріорної інформації встановлено, що віброіскрове легування доцільно проводити за мінімально допустимих частот обертання зразка, які не перевищують 2 с^{-1} , керуючись оптимальними показниками покриттів та іншими технологічними чинниками. Частота імпульсів, як технологічний фактор, впливає на зміну маси і діаметра зразків у взаємодії з напругою початку розряду і частотою коливання контейнера. Зміна амплітуди коливань не суттєво впливає на контрольовані показники покриття. Враховуючи це, а також відносно складність регулювання даного технологічного чинника, доцільно проводити обробку виробів за фіксованих значень амплітуди, отримуючи задані властивості композиційного покриття варіюванням інших факторів.

Таким чином, на даному етапі досліджень отримання покриттів з необхідними показниками здійснювалося нами тільки регулюванням напруги початку розряду U , ємності конденсаторної батареї C джерела технологічного струму та тривалості процесу віброелектроіскрового легування τ .

Характер зміни контрольованих показників покриття – ΔG , ΔD і R_a залежно від виду електродного матеріалу, напруги початку розряду, ємності конденсаторної батареї було досліджено в серії експериментів.

Вимірювання основних характеристик зразків, оброблених віброелектроіскровим легуванням, виконувалися за допомогою таких вимірювальних засобів:

– зміну маси зразків після ВЕІЛ визначали на аналітичних вагах ВЛР-200г 2 класу ГОСТ 19491-74, точність зважування – $\pm 0,05$ мг;

– лінійні розміри зразків вимірювали мікрометром МК 0... 25 ГОСТ 6507-60 з ціною поділки 0,01 мм, а також для цих цілей в окремих випадках використовувався малий інстру-

ментальний мікроскоп МИМ-1 з точністю $\pm 0,01$ мм;

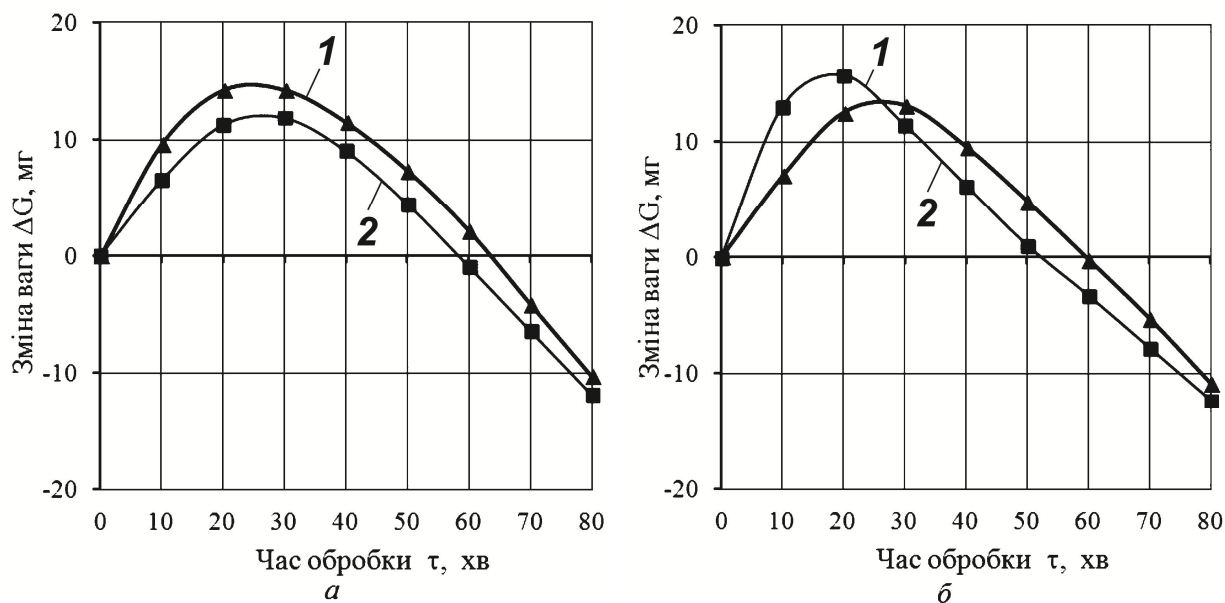
– вимірювання шорсткості проводили на профілограф-профілометрі моделі Р-201 заводу «Калібр».

Вихідна шорсткість циліндричної поверхні суцільних і напилених зразків R_a знаходиться у межах 0,32 ... 0,63 мкм (ГОСТ 2789-73) перед проведенням ВЕІЛ.

Як показали результати проведених досліджень, найбільш складним є визначення тривалості обробки в іскрових розрядах. Такий висновок підтверджується даними попередніх робіт [14] і пояснюється суттєвою нелінійністю зміни маси зразків, товщини легованого шару та шорсткості його поверхні від тривалості віброелектроіскрового легування. Характер зміни цих параметрів дослідних зразків, оброблених в середовищі гранул твердих сплавів Т15К6 та ВК8, графічно зображено на рис. 1, 2, 3. Аналіз отриманих кривих показав, що на початку процесу обробки відбувається зростання ваги, діаметра та шорсткості зразків. У подальшому збільшення тривалості обробки призводить до зменшення ваги зразків (рис. 1). Зменшуються також параметри ΔD (рис. 2) і R_a (рис. 3), однак після деякого часу вони стабілізуються.

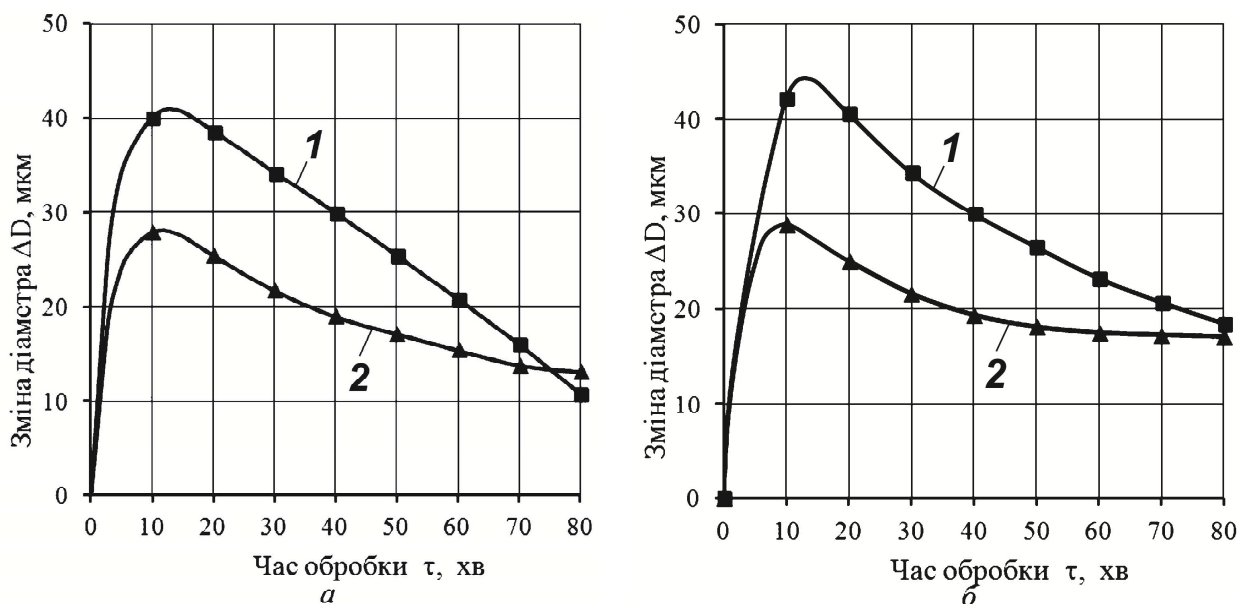
Слід також зазначити, що зростання шорсткості та діаметра зразків відбувається більш інтенсивно, ніж ваговий їх приріст. Це пояснюється активною участю матеріалу зразків у процесі формування покриття, оскільки в цей період шорсткість поверхні зразка формується внаслідок як перенесення на неї матеріалу гранул, так і в результаті ерозійних процесів в основному матеріалі. Зростання маси зразків при одночасному зменшенні їх діаметра та стабілізації шорсткості свідчить про початок руйнування верхівок мікронерівностей, причиною якого є багаторазова механічна і термічна дія гранул та розрядів між ними та поверхнею покриття, а також заповнення западин нерівностей поверхневого рельєфу їх матеріалом. При подальшому збільшенні часу ВЕІЛ процес зміни діаметра зразків та їх маси, а також шорсткості поверхні знаходиться в стані динамічної рівноваги із домінуванням процесу руйнування поверхневих шарів зразків іскровими розрядами.

Якщо розглянути зміну вказаних параметрів конкретно до різних матеріалів для легування покриттів, то слід відзначити, що менша інтенсивність деєрозії та «динамічна шорсткість» іскрової обробки гранулами Т15К6 пояснюється меншою ерозійною стійкістю карбіду титану в порівнянні з карбідом вольфраму. Суттєвий вплив на характеристики сформованого покриття має показник крихкості. Для карбіду титана він в 3,2 рази більший, ніж для карбіду вольфраму [16]. Тому більш легко відділяючись від гранул, частинки твердого сплаву Т15К6 компенсують зменшення маси зразків внаслідок руйнування, і загальна інтенсивність руйнування зменшується; виступи мікронерівностей крихко руйнуються внаслідок силового контакту з гранулами.



1 – суцільний сталевий зразок; 2 – зразок із напиленим сталевим покриттям

Рисунок 1 – Вплив часу ВЕІ обробки в середовищі гранул твердого сплаву Т15К6 (а) і ВК8 (б) на зміну ваги зразка



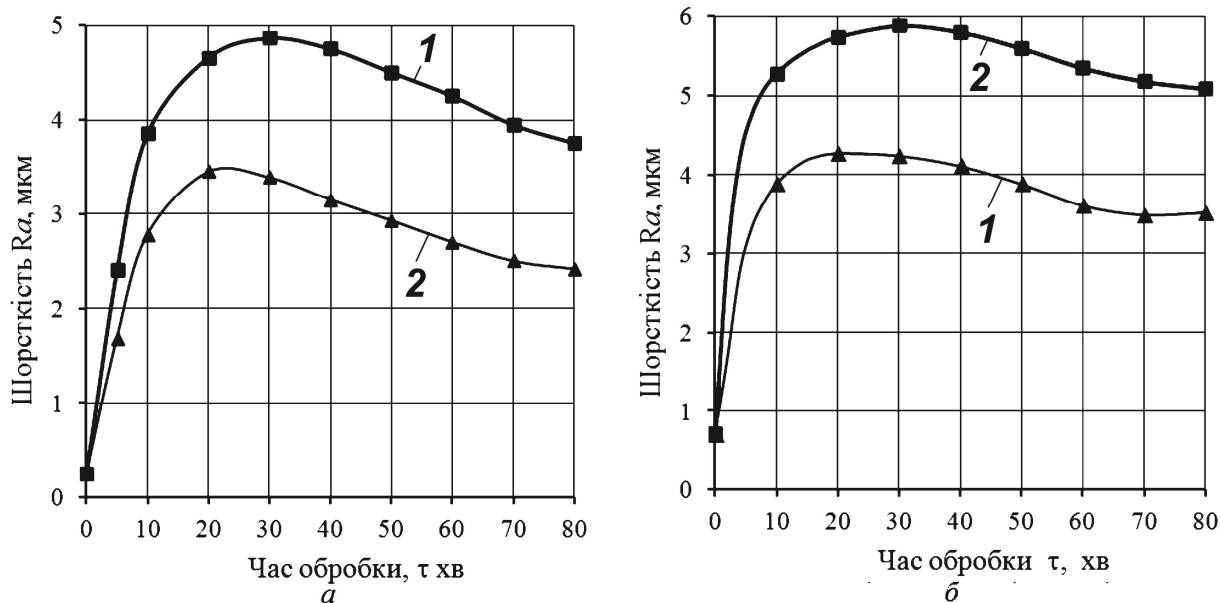
1 – суцільний сталевий зразок; 2 – зразок із напиленим сталевим покриттям

Рисунок 2 – Зміна діаметра зразка від часу ВЕІ обробки в середовищі гранул твердого сплаву Т15К6 (а) і ВК8 (б)

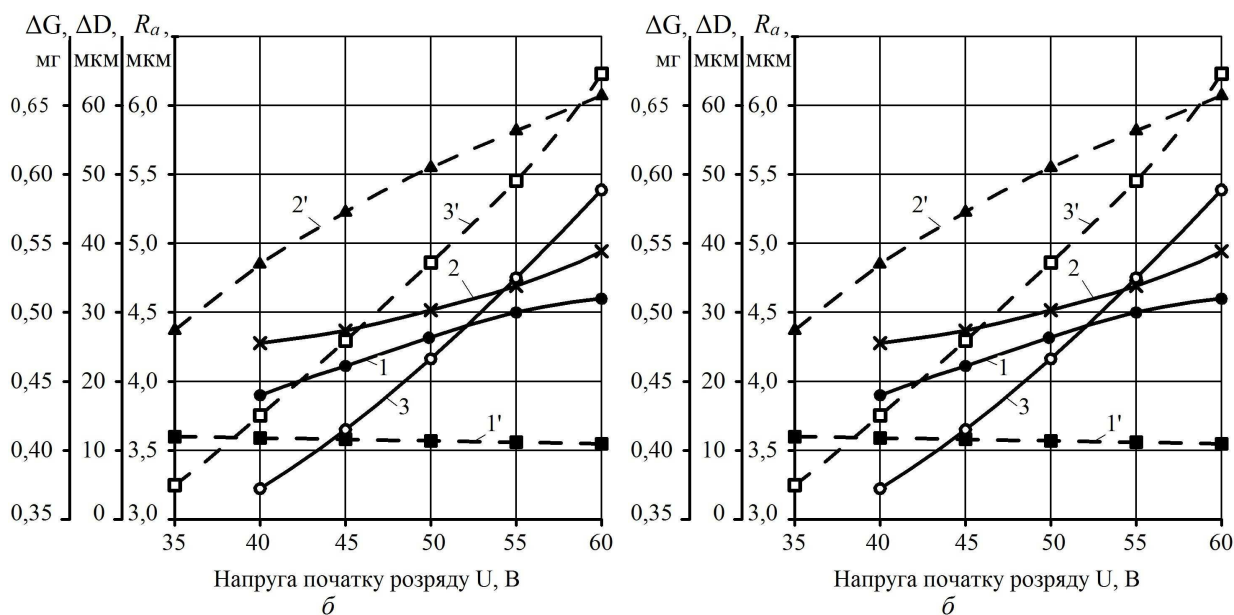
Встановлено, що збільшення напруги заряду накопичувальної ємності батареї призводить до зростання енергії розряду і, відповідно, до збільшення маси ΔG і діаметра зразка ΔD , а також шорсткості R_a поверхні покриття при обробці в середовищі гранул твердого сплаву Т15К6 (рис. 4, а). Збільшення напруги початку розряду з 30 В до 60 В призводить до збільшення маси зразків, зокрема із суцільного матеріалу – з $0,17 \cdot 10^{-6}$ кг до $0,30 \cdot 10^{-6}$ кг, з напиленим покриттям – з $0,15 \cdot 10^{-6}$ до $0,34 \cdot 10^{-6}$; збільшує діаметр зразків, зокрема з суцільного матеріалу – з $0,24 \cdot 10^{-6}$ м до $0,46 \cdot 10^{-6}$ м, з напиленим

покриттям – з $0,25 \cdot 10^{-6}$ м до $0,31 \cdot 10^{-6}$ м; змінює шорсткість зразків: з суцільного матеріалу R_a від 2,5 мкм до 4,6 мкм, з напиленим покриттям R_a від 2,4 мкм до 4,0 мкм відповідно.

При віброелектроіскровій обробці гранулами твердого сплаву ВК8 характер зміни діаметра і шорсткості зразка було отримано аналогічний, як і при застосуванні Т15К6, а зміна маси зразка при зміні напруги знаходиться в межах похибки експерименту (рис. 4, б). Збільшення напруги початку розряду з 30 В до 60 В збільшує масу зразків, зокрема з суцільного матеріалу – з $0,44 \cdot 10^{-6}$ кг до $0,51 \cdot 10^{-6}$ кг; з



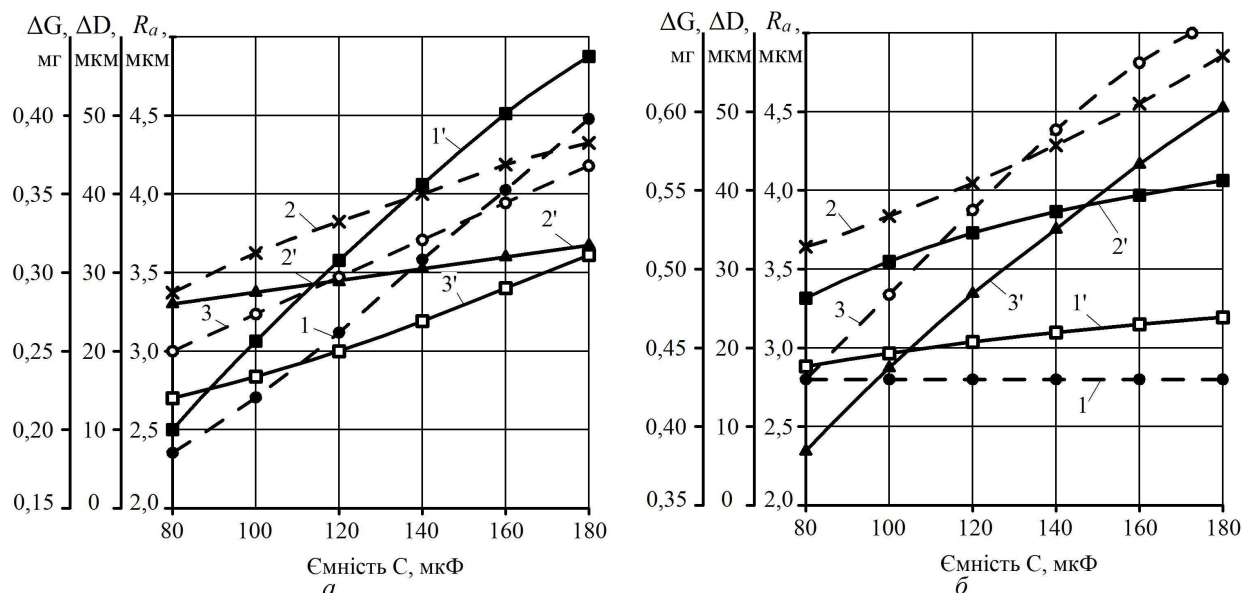
1 – суцільний сталевий зразок; 2 – зразок із напиленим сталевим покриттям
Рисунок 3 – Залежність шорсткості поверхні зразка від часу ВЕІ обробки в середовищі гранул твердого сплаву Т15К6 (а) і ВК8 (б)



1, 2, 3 – суцільний матеріал зразка; 1', 2', 3' – напилене на зразок покриття
Рисунок 4 – Зміна ваги ΔG (1, 1'), зміна діаметра ΔD (2, 2') та шорсткості R_a (3, 3') залежно від величини напруги початку розряду при ВЕІ обробці в середовищі гранул твердого сплаву Т15К6 (а) і ВК8 (б)

напиленим покриттям не змінюється; збільшує діаметр зразків, зокрема з суцільного матеріалу – від $0,26 \cdot 10^{-6}$ м до $0,39 \cdot 10^{-6}$ м, з напиленим покриттям – з $0,27 \cdot 10^{-6}$ м до $0,61 \cdot 10^{-6}$ м; змінює шорсткість для з суцільного матеріалу R_a – від 3,2 мкм до 5,4 мкм; з напиленим покриттям R_a – від 3,3 мкм до 6,3 мкм. Ймовірна причина цього в більшій ерозійній стійкості карбиду вольфраму у порівнянні з карбідом титану. Свій внесок у збільшення маси зразків при ВЕІ сплавом Т15К6 робить такий параметр карбиду титану TiC , як крихкість.

Якщо порівнювати досліджувані характеристики зразків із компактного матеріалу та з напиленого покриття, то слід відзначити подібний характер їх зміни. Однак їх числові значення для напилених покриттів будуть меншими, що можна пояснити наявністю в покриттях достатньо великої кількості окислів, підвищеною твердістю, шаруватістю, пористою структурою відповідно. Всі ці фактори призводять до зниження рівня вказаних параметрів – ΔG , ΔD , R_a .



1, 2, 3 – суцільний матеріал зразка; 1', 2', 3' –напилене покриття на зразок
Рисунок 5 – Зміна ваги ΔG (1, 1'), зміна діаметра ΔD (2, 2') та шорсткості R_a (3, 3') залежно від величини ємності конденсаторної батареї при ВЕІ обробці в середовищі гранул твердого сплаву Т15К6 (а) і ВК8 (б)

Тенденція до зміни маси, діаметра зразків та їх шорсткості при збільшенні ємності конденсаторної батареї аналогічна зміні цих показників при зростанні напруги початку розряду (рис. 5). Значить, регулюючи ці параметри можна керувати величиною енергії розряду конденсатора W_p :

$$W_p = CU^\beta,$$

де W_p – енергія розряду конденсатора;
 C – ємність конденсаторної батареї;
 U – напруга заряду конденсаторної батареї;

β – показник степеня.

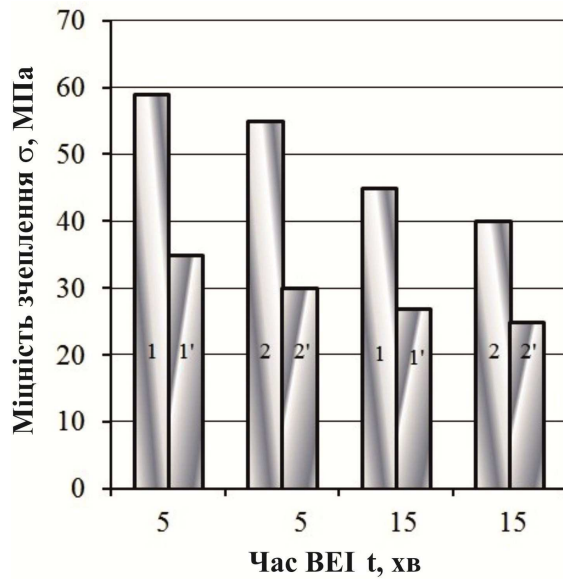
Зміна ємності конденсаторної батареї від 80 мкФ до 180 мкФ при ВЕІ Т15К6 призводить до зміни маси зразків: для суцільного матеріалу – з $0,18 \cdot 10^{-6}$ кг до $0,40 \cdot 10^{-6}$ кг, з напиленим покриттям – з $0,20 \cdot 10^{-6}$ кг до $0,48 \cdot 10^{-6}$ кг; зміни діаметра зразків, зокрема з суцільного матеріалу – з $0,28 \cdot 10^{-6}$ м до $0,47 \cdot 10^{-6}$ м, з напиленим покриттям – з $0,26 \cdot 10^{-6}$ м до $0,32 \cdot 10^{-6}$ м; змінює шорсткість: з суцільного матеріалу R_a від 3,0 мкм до 4,2 мкм, з напиленим покриттям R_a від 2,7 мкм до 3,6 мкм відповідно. Зміна ємності конденсаторної батареї від 80 до 180 мкФ при ВЕІ ВК8 призводить до зміни маси зразків: для суцільного матеріалу практично незмінна; з напиленим покриттям – з $0,44 \cdot 10^{-6}$ кг до $0,47 \cdot 10^{-6}$ кг; до зміни діаметра зразків, зокрема з суцільного матеріалу – з $0,32 \cdot 10^{-6}$ м до $0,58 \cdot 10^{-6}$ м, з напиленим покриттям – з $0,26 \cdot 10^{-6}$ м до $0,40 \cdot 10^{-6}$ м; до зміни шорсткості з суцільного матеріалу – від 2,8 мкм до 5,0 мкм, з напиленим покриттям – від 2,3 мкм до 4,5 мкм відповідно. Характерно, що зі зміною напруги в 1,5 рази і ємності в 2 рази маса зразків, оброб-

лених гранулами Т15К6, змінюється приблизно в 2 рази, що свідчить про значення показника степені $\beta > 1$, а також підтверджує вплив енергії розрядів на величину ерозії електродних матеріалів. Приблизна рівність величин відносної зміни ΔD і R_a як при легуванні Т15К6, так і ВК8 підтверджує значний внесок матеріалу основи зразка у формування мікронерівностей поверхневого шару внаслідок його ерозії.

Аналізуючи отримані графічні залежності (рис. 1–5), слід також відзначити, що зміна розмірів і шорсткості вільних поверхонь, оброблених ВЕІ, має задовільні характеристики і, якщо не існує додаткових вимог до стану та точності деталей, то не потрібно проводити подальшу механічну обробку. У випадку використання віброелектроіскрового легування для відновлення точних посадкових розмірів деталі виникає необхідність проведення механічної обробки легованої поверхні різанням, і отримані вище експериментальні дані мають важливе значення для аналітичного розрахунку припусків.

За результатами виконаних досліджень було оптимізовано технологічні параметри ВЕІ напилених покриттів. Використовуючи отримані параметри, ми провели також досліді, за результатами яких встановлено залежність міцності зчеплення армованих шарів з основою (на відривання), за відомою методикою, від тривалості процесу обробки їх іскровими розрядами. Було встановлено, що числові значення вказаної величини, одержані обробкою в гранулах твердих сплавів Т15К6 і ВК8, близькі за величиною для обох шарів (рис. 6). При цьому характерне зменшення міцності зчеплення при збільшенні тривалості іскрового легування як напиленого, так і суцільного матеріалу основи. Таку залежність можна пояснити зростанням внутрішніх напружень у міру збільшення часу

процесу обробки. Даний фактор призводить до виникнення мікротріщин та послаблення перерізу сформованого шару.



1, 2 – на зразках з компактного матеріалу;
1', 2' – на зразках з напиленого матеріалу

Рисунок 6 – Міцність зчеплення з основою шарів, отриманих ВЕІ обробкою твердими сплавами Т15К6 (1) та ВК8 (2) за різного часу обробки

Слід також відзначити, що отримані результати можна застосовувати лише для якісного аналізу з таких причин: гетерогенності шару, значної його різновтовщинності в різних перерізах, неможливості визначення площі перерізу з переважним когезійним характером відриву покриття. Однак, навіть занижені величини міцності зчеплення шару покриття, обробленого іскровими розрядами, з основою суттєво перевищують аналогічні показники, отримані для звичайних покриттів, нанесених методами газотермічного напилення: електродугового, газополуменевого та плазмового для яких не застосовували ВЕІЛ.

Висновки

Розроблено технологічний процес створення композиційних покриттів із застосуванням методів газотермічного напилення та віброелектроіскрового легування.

Показано, що найбільш суттєвими факторами в керуванні технологічним процесом формування композиційних покриттів є тривалість процесу віброіскрового легування, напруга початку розряду і ємність конденсаторної батареї.

Встановлено, що максимальна інтенсивність формування покриття має місце впродовж перших 10 – 20 хвилин віброіскрового легування, після чого процес переносу уповільнюється, що характеризується зменшенням маси зразків, а також стабілізацією величин діаметра зразка та шорсткості поверхні.

В подальших дослідженнях планується вивчення характеристик шарів, сформованих ВЕІЛ на зразках із вищою початковою шорсткістю, що дозволить зменшити обсяг підготовчої механічної обробки зразків.

Література

- 1 Михайлов А.Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий машиностроения / А.Н. Михайлов. – Донецк: ДонНТУ, 2009. – 346 с.
- 2 Харламов Ю.О. Обработка деталей при восстановлении и упрочнении: навч. посібник / Ю.О. Харламов, С.А. Клименко, М.А. Будаг'янц, Л. Г. Полонський. – Луганськ: СНУ ім. В. Даля, 2007. – 500 с.
- 3 Электродуговое восстановление та захисні покриття / [В. І. Похмурський, М. М. Студент, В. М. Довгунік. Г. В. Похмурська. І. Й. Сидорак]. – Львів: НАН України. Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка, 2005. – 190 с.
- 4 Рыжов Э. В. Технологическое обеспечение качества деталей с покрытиями / Э. В. Рыжов, С. А. Клименко, О. Г. Гуцаленко. – К.: Наук. Думка, 1994. – 181 с.
- 5 Тимохова О. М. Исследование восстановления деталей машин методами напиления и термической обработки / О. М. Тимохова // Сб. науч. тр.: материалы науч.-техн. конф. (13–15 апр. 2010 г.). - Ухта, 2010. Ч. 2. - С. 116–118.
- 6 Структурные изменения в поверхностном слое газотермических покрытий при ультразвуковой обработке стальными шариками / Ю. С. Борисов, А.Г. Ильенко, А. Л. Гайдаренко и др.] // Порошковая металлургия. – 1992. – № 2. – С. 23–28.
- 7 Соколова Т. В. Уплотнение плазменных покрытий методом пропитки // Жаростойкие покрытия для защиты конструкционных материалов / Т. В. Соколова, С. С. Бартеков, А. В. Кийко. – Л.: Наука, 1977. – С. 161–168.
- 8 Диффузионная металлизация плазменных покрытий / Г. В. Земсков, А. А. Коган, А. А. Слободянюк, А. А. Синьковский // Защитные покрытия на металлах. – 1980. – № 14. – С. 69–71.
- 9 Власов В. М. Работоспособность упрочнённых трущихся поверхностей / В. М. Власов. – М.: Машиностроение, 1987. – 304 с.
- 10 Металлизация распылением / [Н. В. Катц, Е. В. Антошин, Д. Г. Вадивасов, Г. Д. Вольперт, Л. М. Камионский]. – М.: Академия, 2006. – 192 с.
- 11 Электроимпульсная обработка плазменных напыленных покрытий / В. В. Скворцов, Б. Н. Журкин, В. И. Высоцкая // Электрофиз. методы и технол. воздействия на структуру и свойства мет. матер.: Всес. шк.-семина., сент., 1990. – Л., 1990. – С. 135–136.
- 12 Перспективы применения потоков заряженных частиц в инженерии поверхности / [Ю. Д. Ягодкин, К. М. Пастухов, С. А. Мубояджян и др.]. // МиТОМ. – 1999. – № 7. – С. 36–41.

13 Шепетов В. В. Електроіскрове легування для підвищення триботехнічних характеристик деталей авіаційної техніки / В. В. Шепетов, А. Г. Довгаль, Л. В. Бурдушенко // Вісник НАУ. – 2004. – № 1. – С. 83–87

14 Верхотуров А. Д. Технология электроискрового легирования металлических поверхностей / А. Д. Верхотуров, И. М. Муха. – К.: Техніка. 1981. – 186 с.

15 Пат. 67165 Україна, МПК D 05 D 3/14. Спосіб підготовки поверхні деталей перед газотермічним напильненням покриттів / В. В. Кустов, Л. Я. Роп'як, А. К. Смаглюк; u201107081; заявл. 06.06.11; опубл. 10.02.12, Бюл. № 3.

16 Самсонов Г.В. Карбиды вольфрама / Г. В. Самсонов, В. К. Витрянюк, Ф. И. Чаплыгин. – К.: Наукова думка, 1974. – 175 с.

*Стаття надійшла до редакційної колегії
12.03.14*

*Рекомендована до друку
професором **Петриною Ю.Д.**
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)
професором **Гурей І.В.**
(Національний університет,
«Львівська політехніка», м. Львів)*