



Рис.3 Профіль (а) та мікрофотографія (б) канавки після ХПД з наступним БАТР:  
1 — азотований шар; 2 — основа

**Висновки та перспективи.** Висунута, теоретично обґрунтована і експериментально підтверджена гіпотеза про позитивний вплив ХПД, яке передує БАТР, на товщину азотованого шару, яка зростає у випадку застосування для деформаційного зміщення лінійного індентування на 50 — 90%. Отримані результати дозволяють рекомендувати для інтенсифікації безводневого азотування у тліочому розряді попередню обробку поверхонь деталей одним із методів холодного пластичного деформування. Перспективи подальших досліджень БАТР, попередньо інтенсифікованого ХПД, полягають: у отриманні більш глибоких і широких наукових та практичних результатів з ефекту термоциклування поверхневого азотованого шару короткими крутими імпульсами плазми частотою порядка 1 Гц, породженої сильнострумним тліочим розрядом; у залученні лазерних технологій до азотування; у вивченні можливості отримання триплексного поверхневого шару, що поєднував би модифікування ХПД та БАТР з наступним нанесенням вакуумного покриття типу TiN товщиною 2–5 мкм.

### Література

1. Азотирование и карбонитрирование / Р.Чаттерджи-Фишер, Ф.-В.Эйзел, Р.Хофман и др. Пер. с нем.; Под ред. А.В.Супова.—М.:Металлургия. 1990.—280 с.
2. Дяченко С.С. Фізичні основи міцності та пластичності металів.—Харків: Вид-во Харківського національного автомобільно-дорожнього університету, 2003.—226 с.
3. Алексеев В.В. Інтенсифікація безводневого азотування у тліочому розряді холодним пластичним деформуванням // Підвищення надійності машин і обладнання: тези доп. IV Всеукраїнської наук.-практ. конф. студентів та аспірантів.—Кіровоград: КНТУ, 2010.— С.39-41.
4. Посоєтенко Е.К., Алексеев В.В., Рутковський А.В. Відновлення колінчастих валів двигунів внутрішнього згорання іонно-імпульсним азотуванням // Вісн. Сумськ. держ. ун-ту: Серія технічні науки (машинобудування).—Суми, 2005.— №11.— С.119-122

УДК 621.793.7

## ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ МІКРОПЛАЗМОВОГО НАПИЛЕННЯ НА КОЕФІЦІЄНТ ВИКОРИСТАННЯ МАТЕРІАЛУ ПРИ НАПИЛЕННІ БІОКЕРАМІЧНОГО ПОКРИТТЯ

Кандидат технічних наук Войнарович С.Г.

Проведені дослідження та встановлені рівні впливу на коефіцієнт використання матеріалу таких параметрів мікроплазмового напилювання, як сила струму, витрати плазмоутворюючого газу, дистанція напилювання та витрати порошку при нанесенні біокерамічного покриття з гідроксиапатиту.

A research was carried out in order to establish level of influence of microplasma spraying parameters (amperage, plasma gas flow rate, spray distance and powder rate) on material usage coefficient during hydroxyapatite-based bioceramic coating deposition.

**Постановка проблеми.** Металеві імплантати з покриттям з гідроксиапатиту (ГА) отримують сьогодні все більш широке поширення, тому що об'єднують механічну міцність металевої основи з біологічними особливостями покриття. Покриття з гідроксиапатиту на металевих імплантатах має потрійний позитивний ефект: підвищення швидкості формування кісткової тканини, можливість утворення зв'язку з кісткою (остеоінтеграція) і зниження утворення продуктів корозії металу. Таким чином, дані покриття дозволяють значно скоротити тривалість імплантації ендопротеза, забезпечують надійний зв'язок з кісткою і збільшують термін служби імплантатів.

**Аналіз останніх досліджень та постановка завдання.** До числа технологій газотермічного напилення, які представляють інтерес для використання при нанесенні біокерамічних покрівель, слід віднести мікроплазмове напилення [1]. Одним з основних показників процесу нанесення покрівель газотермічними методами, в тому числі і методом мікроплазмового напилення, є коефіцієнт використання матеріалу (КВМ). КВМ представляє собою відношення маси покриття, що було напилене до маси порошку, поданого в газовий струмінь. Цей показник називають також коефіцієнтом відкладення, ефективністю напилення. Він не тільки характеризує економічність процесу нанесення, але і використовується як параметр оптимізації, оскільки його максимальне значення в багатьох випадках збігається з найкращими показниками якості покриття.

Мета роботи — дослідити ступінь впливу на КВМ таких параметрів процесу мікроплазмового напилення як: сила струму, витрата плазмоутворюючого газу, дистанція, витрата порошку.

**Викладення основного матеріалу.** З використанням методу математичного планування (факторний експеримент з дробовими репліками  $2^{+1}$ ) були проведені дослідження з визначення ступеня впливу на КВМ таких параметрів процесу мікроплазмового напилення як: сила струму ( $I$ , А), витрата плазмоутворюючого газу ( $G_{пл}$ , л/хв), дистанція ( $H$ , мм), витрата порошку ( $P_{пор}$ , г/хв). Для визначення КВМ використовувалися плоскі зразки діаметром 20 мм і товщиною 1 мм зі сталі. Попередньо визначалася маса кожного зразка без покриття. Потім проводили напилення порошку протягом 15 с на режимах згідно плану експерименту. Напилення проводили при нерухомому положенні плазмотрона, після чого вимірювали масу зразка з покриттям. Зважування зразка проводили на аналітичних вагах ВЛР-200 з точністю до  $10^{-5}$  г.

Маса покриття ( $m_{нокр}$ ) визначалася як різниця маси зразка після напилення і маси зразка до напилення. Маса поданого порошку ( $m_{пор}$ ) визначалася перед кожним експериментом зважуванням кількості порошку, що подається дозатором за 15 с. КВМ визначали з виразу:

$$KBM = \frac{m_{нокр}}{m_{пор}}$$

Напилення проводили на установці мікроплазмового напилення МПН-004. Як матеріал для напилення використовували порошок гідроксіапатиту «KERGAP» з розміром частинок 40 ... 63 мкм. Інтервали варіювання і значення досліджуваних параметрів процесу мікроплазмового нанесення покрівель приведені в табл.1.

Таблиця 1.

Рівні варіювання	Чинники			
	$I$ , А	$G_{пл}$ , л/хв	$H$ , мм	$P_{пор}$ , г/хв
Верхній рівень +	45	2,0	160	1,2
Нижній рівень -	35	1,0	80	0,4
Основний рівень 0	40	1,5	120	0,8
Інтервал варіювання	5	0,5	40	0,4

Значення параметрів та результати експерименту по визначенню КВМ при плазмовому напиленні порошка ГА на пластину наведені в табл. 2

Таблиця 2.

№ режима	I, A	G <sub>пл</sub> , л/хв.	H, мм	P <sub>пор</sub> , г/хв.	KBM, %	KBM, % Розрахунковий
1	45	2	160	1,2	54	58
2	45	2	80	0,4	64	71
3	45	1	160	0,4	69	69
4	45	1	80	1,2	89	89
5	35	2	160	0,4	29	29
6	35	2	80	1,2	48	48
7	35	1	160	1,2	40	47
8	35	1	80	0,4	56	60
9	40	1,5	120	0,8	60	59

Розраховане рівняння регресії для KBM має наступний вигляд:

$$KBM\% = 2,575I - 0,246 G_{pl} - 0,203H + 4,06 P_{por} - 0,825$$

Порівняння розрахункових (з вищепередного рівняння регресії) і експериментальних результатів показують їх добру збіжність, що свідчить про адекватність використаної моделі (табл. 2.). Аналіз рівняння регресії дозволив оцінити вплив кожного параметра на величину KBM. Так з аналізу рівняння видно, що у разі збільшення сили струму KBM підвищується за рахунок підвищення температури плазмового струменя і більш інтенсивного нагріву частинок порошку. При даних значеннях параметрів мікроплазмового напилення величина сили струму спричиняє найбільш сильний вплив на величину KBM.

Збільшення витрати газу призводить до зниження KBM. Це пояснюється тим, що збільшення витрат газу призводить не тільки до зниження температури струменя, а значить, знижується і температура нагріву частинок, але і до зростання швидкості струменя. Збільшення швидкості струменя призводить до збільшення швидкості частинок матеріалу, що напилюється, це в свою чергу, скорочує час їх перебування у високотемпературній зоні плазмового струменя і також веде до недостатнього їх нагрівання. При збільшенні дистанції напилення зниження KBM відбувається із-за часткового остигання частинок, які напилюються, при підльоті їх до основи.

Витрата порошку в умовах мікроплазмового напилення також здійснює деякий вплив на ступінь нагрівання частинок, а значить і на KBM. Із закону збереження імпульсу випливає, що розгін дисперсних частинок в плазмовому струмені повинен супроводжуватись зниженням його швидкості і тим помітніше, чим більше вагове завантаження струменя. Так, дослідження струменя аргону з введеними в нього частками карбіда вольфраму показали, що швидкість газу з підвищенням завантаження струменя помітно зменшилася [3]. Таким чином, збільшення витрати порошку мабуть призводить до зниження швидкості струменя, тим самим, збільшуєчи час нагрівання частинок в плазмовому струмені, а значить і ступінь їх проплавлення. Зі збільшенням кількості порошку, що вводиться в струмінь, KBM буде збільшуватися до тих пір, поки запас енергії струменя дозволяє нагрівати порошок, що надходить, до температури плавлення матеріалу порошку. Потім почне відбуватися переохолодження плазми і настане такий момент, коли кількість розплавлених частинок порошку почне зменшуватися, а значить і знижуватися величина KBM.

Порівнюючи отримані результати із значеннями KBM для плазмового напилення серійними плазмотронами більшої потужності, встановлено, що у разі мікроплазмового напилення втрати напилюваного матеріалу менше. Так за літературними даними при плазмовому напиленні ГА (потужність плазмотрона в одному випадку становила 26 ... 29 кВт, в другому 30 ... 36 кВт, плазмоутворюючий газ Ar + H<sub>2</sub>) максимальні значення KBM при напиленні на пластину відповідно складали 50 і 62% [2, 4], тоді як при мікроплазмовому напиленні максимальне значення KBM досягло 89% (табл. 2.).

#### Висновки.

- У результаті проведених досліджень для коефіцієнта використання порошку була визначена лінійна регресійна модель і встановлено ступінь впливу на нього таких параметрів процесу МПН як: сила струму, витрата плазмоутворюючого газу, дистанція, витрата порошку.

2. Експериментально встановлено, що у разі мікроплазмового напилення порошку ГА величина КВМ досягає 89%, що в 1,5 ... 1,8 рази вище значень КВМ, наведених у літературі для плазмового напилення серійними плазмотронами високої потужності.

### **Література**

1. Борисов Ю.С., Бобрик В.Г., Войнарович С.Г., Дубок В.А., Ульянчик Н.В. Микроплазменное напыление биокерамических покрытий. // Автоматическая сварка № 12, 2000 г.- С.63-67
2. Ильющенко А.Ф., Ивашико В.С., Оковитый В.А., Шевцов А.И. и др. Исследование и оптимизация режимов нанесения покрытия из ГАП на титан и его композиции // Порошковая металлургия. (Минск). — Вып. 21. — 1998 г. С. 52-54
3. Цветков Ю.В., Панфилов С.А. Низкотемпературная плазма в процессах восстановления // М: Наука.- 1980.- 360 с.
4. Poulmaire D., Ducos M., Setti Y. Development of Dental Implants in Titanium with HA Coatings // 2-nd Plasma-Technik-Symposium Lucerne, Switzerland, June 5 — 7, 1991 P.191-202.