

УДК 629.4.08

# ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ГАЗОТЕРМІЧНОГО НАНЕСЕННЯ ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ПОКРИТТІВ

**Є. А. Астахов**

Доктор технічних наук,  
провідний науковий співробітник  
Інститут електрозварювання  
ім. Е.О. Патона НАН України  
вул. Боженка, 11, м. Київ, 03680

**В. В. Артемчук**

Кандидат технічних наук, доцент  
Кафедра «Електрорухомих склад залізниць»  
Дніпропетровський національний університет  
залізничного транспорту ім. ак. В. Лазаряна  
вул. Лазаряна, 2, м. Дніпропетровськ, 49010  
Контактний тел.: 067-565-98-03  
E-mail: art\_vv@ukr.net

*В статті розглянуті особливості технологій нанесення газотермічних відновлювальних покриттів. Проведено порівняльний аналіз основних методів газотермічного напилення за деякими показниками, а також наведено приклади використання сучасних напилюваних матеріалів.*

*Ключові слова: відновлення деталей, газотермічне напилення, рухомих склад, ремонтне виробництво*

*В статье рассмотрены особенности технологий нанесения газотермических покрытий. Проведен сравнительный анализ основных методов газотермического напыления по некоторым показателям, а также приведены примеры использования современных напыляемых материалов.*

*Ключевые слова: восстановление деталей, газотермическое напыление, подвижной состав, ремонтное производство*

*Features technologies of causing of thermal method coverage's are considered in the article. The compared analysis of basic methods of covering thermal is conducted on some indexes, and also the examples of the use of modern covering materials are resulted*

*Keywords: restoration parts, thermal spraying, rolling stock, repair manufacture*

## Вступ. Постановка проблеми

Відновлення зношених деталей різних машин і механізмів є складною науковою проблемою, яка вимагає системного підходу. Починаючи з аналізу умов роботи деталей, характеру та виду зношування, необхідно визначити доцільні технології відновлення деталей, наприклад, наплавленням, напиленням, гальванічними або іншими методами. У той же час і серед вище названих технологій може бути декілька варіантів, що потребує обґрунтування при їх виборі.

Як відомо, деталі рухомого складу залізничного транспорту працюють у важких умовах. Серед зношуваних деталей є багато таких, що мають циліндричну форму. Окреме місце займають особливо відповідальні деталі, до яких висувають підвищені вимоги. Зокрема, до таких деталей можна віднести колінчасті вали дизелів, вісі колісних пар, гальмівне обладнання та ін. Тому при відновленні таких деталей необхідно особливо увагу приділяти експлуатаційній надійності покриття. Відомо, що на деякі механічні властивості впливає не тільки безпосередньо матеріал, а і спосіб

нанесення цього покриття. Дійсно, використовуючи різні способи нанесення газотермічного напилення (ГТН), один і той же матеріал буде володіти відмінними властивостями, що є цілком логічним. Таким чином, виникає необхідність вибору способу та режимів нанесення покриттів. В даній роботі розглянуто методи газотермічного напилення для відновлення деталей. Для особливо відповідальних деталей першеступеневе значення набуває міцність зчеплення покриття з основою, тому особливу увагу при аналізі та порівнянні способів ГТН звернено на цей показник.

В літературних джерелах наведені різноманітні дані основних методів газотермічного напилення [1-16]. Показано, що структура покриттів, отримана різними методами ГТН, крім ряду загальних ознак має і суттєві відмінності, пов'язані з технологічними особливостями процесів. Автори доводять, що основна причина полягає в тому, що методи різняться за абсолютними значеннями і співвідношеннями кінетичної і теплової енергії, що передається напилюваному матеріалу.

В даній роботі проведено аналіз теоретичних і практичних результатів досліджень для визначення

можливості застосування технологій газотермічного наплення в умовах ремонтного виробництва залізниці.

**Метою** даної роботи є проведення порівняльного аналізу основних методів газотермічного наплення за деякими показниками для умов залізничного транспорту.

Проблема розв'язання поставленої задачі полягає у тому, що існуюча в літературних джерелах інформація щодо показників ГТН відрізняється. Даний факт можна пов'язувати з різними умовами проведення експериментів та різноманіттям використовуваних матеріалів. Тому в даній роботі наведені результати досліджень, як інших авторів, так і власні.

### Виклад основного матеріалу

Згідно прийнятої класифікації газотермічне наплення поділяють на основні чотири способи: електродугову металізацію, газополум'яний, плазмовий та детонаційний. Інші способи є різновидами вказаних, наприклад, застосування надзвукової швидкості транспортуючих газів, наплення в вакуумі, використання ультразвуку, тощо. Спільною рисою способів ГТН є чутливість до складу середовища, в якому формується покриття [1-4]. При порівняльному аналізі також враховується можливість використання аморфізуючих матеріалів, як перспективних для відновлення деталей. В даний час важко однозначно віддати перевагу якому-небудь з методів, тим більше, що результат багато в чому залежить від параметрів наплення.

На даний момент на ремонтних виробництвах залізниці серед газотермічних способів найбільш поширеним є електродугова металізація. Розглянемо її. У роботі [5] описана апаратура і технологія електродугової металізації, при якій розпилювання дротів здійснюється під впливом надзвукового потоку гарячих продуктів згорання природного газу (7-15 %) з повітрям. Проведено порівняння властивостей (табл. 1) покриттів (склад дроту не приведений), наплених на оптимальних режимах (за ствердженням автора [5]) різними способами: надзвукової електродугової металізації, плазмово-дугового наплення; типової електродугової металізації.

Надзвукова електродугова металізація забезпечує високу стабільність горіння дуги за рахунок орієнтації уздовж газового потоку. При цьому відбувається більш інтенсивний процес передачі теплоти в плавкі електроди, прискорений розгін і дроблення частинок розплавленого металу, їх захист від окислення у польоті, і зниження кількості випареного матеріалу, що дозволило суттєво поліпшити властивості напленого покриття [5].

У роботі [2] описана структура покриттів із сталі, отриманих в камері методом електродугової металізації із застосуванням у якості робочих газів аргону, азоту і повітря. Показано, що у структурі покриттів із сталі, нанесених в камері з аргонном, майже немає оксидів. Вищий вміст оксидів спостерігається в покритті, напленому в камері з використанням азоту в якості робочого газу та повітря, а найбільша кількість оксидів виявлена в покритті, нанесеному за допомогою азоту поза камери. Покриття, нанесене поза камери з використанням стислого повітря, має явно відмінну від інших структуру, в якій помітна велика кількість оксидів, а між частинками видно чіткі межі, які відсутні при напленні за допомогою нейтральних газів. Аналогічні закономірності виявляють також і в збільшенні кількості пор і вмісту в покритті кисню.

У покриттях, наплених за допомогою азоту, виявлений вищий вміст кисню, ніж в тих, що наплені за допомогою аргону, що, на думку авторів [2], пов'язано з чистотою використовуваних газів (застосовувалися гази технічної чистоти, а не хімічно чисті). Заміна повітря аргонном при дугової металізації сприяє поліпшенню властивостей покриттів і підвищенню міцності зчеплення.

Серед великої кількості чинників, що визначають структуру та властивості наплених покриттів можна виділити декілька головних. При способі електродугової металізації електричні параметри дуги залежать головним чином від характеристик матеріалу, що розпилюється. Збільшення потужності апарату збільшує температуру частинок з одночасним зростанням середніх розмірів частинок і, отже, зменшує поверхню їх охолодження [6, 7]. Надмірне збільшення потужності викликає перегрів металу і приводить до його випаровування і значного окислення. Одним з основних чинників, що визначають структуру і властивості покриття, є температура частинок

електродного металу, що розпилюється, яка обумовлюється, як правило, енергетичними параметрами дуги. Температура ж сталевих частинок при електродуговій металізації залежить від розмірів, хоча вона не перевищує температури плавлення заліза.

Основними способами газотермічного наплення порошків є газополум'яний, плазмовий та детонаційний, а також їх варіації: надзвуковий газополум'яний («Джет-коут»), надзвуковий плазмовий і плазмове наплення в динамічному вакуумі.

Важливою складовою технологічного процесу наплення покриттів є створення умов для обмеження протікання фізико-хімічної взаємодії. Для цього необхідно зменшувати температури джерела тепла до

Таблиця 1

Залежність властивостей покриттів від методу наплення [5]

Спосіб нанесення покриття	Пористість, %	Твердість, HRC	Мікротвердість фази, МПа		Міцність зчеплення, МПа
			світла	темна	
Типова електродугова металізація	10...12	22...25	900	11000	35
Надзвукова електродугова металізація	2...3	35...37	1200	16000	65
Плазмово-дугова металізація	6...8	28...30	1000	13000	50

мінімально необхідного для нагріву частинок; зменшувати час перебування частинки в плазмі або полум'ї, тобто збільшувати швидкість руху частинок; проводити процес в середовищі, що не має окислювальної здатності. Найменше відповідними в цьому сенсі є методи газополум'яного і плазмового напилення на повітрі.

При газополум'яному напиленні джерелом теплової енергії є полум'я, що утворилося в результаті горіння сумішей кисень-горючий газ (ацетилен, природний газ, пропан-бутан, водень та ін.).

Одним з провідних напрямів сучасного розвитку цієї технології є використання надзвукових газових струменів при газотермічному напиленні. Підвищення швидкості і кінетичної енергії частинок напилюваного матеріалу дозволяє, з одного боку, поліпшити умови формування структури покриття, а з іншого – обмежити шкідливу дію навколишнього середовища і понизити інтенсивність процесів термічного розкладання матеріалу.

Розвитком цих методів є газополум'яне надзвукове напилення «Джет-коут». Застосування даного методу дає можливість збільшити швидкість частинок до 300...350 м/с (замість 60...120 м/с), підвищивши якість покриттів. Метод надзвукового газополум'яного напилення забезпечує порівняно низькі температури, високу швидкості, проте не виключає вплив кисню.

У роботі [3] розглянуті переваги методу «Джет-коут». Показано, що механічні властивості покриттів (з карбиду вольфраму) в цьому випадку виявилися вищими, ніж при напиленні в плазмі, в динамічному вакуумі або методом детонації. Зокрема йде мова про високі адгезійні та когезійні властивості. Отриманий ефект пояснюється низькою робочою температурою – до 3000 °С і великими – до 500 м/с швидкостями руху частинок. Відзначена також висока якість покриттів WC-Co, отриманих тим же методом. Покриття відрізняються високою міцністю зчеплення з основою, щільністю, твердістю та збереженням значної масової частки (%) WC. На думку авторів, ці результати кращі, ніж при плазмовому напиленні навіть в динамічному вакуумі, а щільність покриттів близька до покриттів отриманих при використанні детонаційного методу [3]. У роботі [4] також приводяться переваги методу «Джет-коут». Розглянуто спосіб напилення «Джет-коут» із застосуванням суміші кисень-пропан (J-K Pr).

Плазмове напилення також є одним із поширених способів ГТН (хоча і менше, ніж електродугова металізація). Як правило більшість установок плазмового напилення призначена для напилення покриттів порошками. Плазмове напилення полягає у розплавленні порошку (або рідше дротів) в струмені іонізованого газу, утвореного плазмотроном. Утворення дуги в пальнику плазмотрону відбувається між електродом (вольфрамовим) та соплом пальника. Плазмоутворюючий газ, проходячи крізь дугу іонізується та з високою температурою (до 15000 °С) і швидкістю витікає з сопла плазмотрона. При цьому швидкість розплавлених частинок доходить до 400 м/с [8]. Продуктивність таких установок досягає 10 кг/год. Основними перевагами плазмового напилення є можливість нанесення покриттів з найширшим спектром матеріалів, малий термічний вплив на основу деталі, отримання шаруватої структури з наперед заданими властивостями.

Нові перспективи розвитку технології газотермічного напилення відкриває використання надзвукових струменів плазми продуктів згорання вуглеводневих газів з повітрям [9]. Співробітниками Інституту газу та Інституту електрозварювання імені Є.О. Патона на базі установки плазмового напилення «Київ-7» створено устаткування для надзвукового легко-газового плазмового напилення «КИЇВ-С». Установка надзвукового плазмового напилення «КИЇВ-С» складається з плазмотрона, джерела живлення, пульта управління та порошкового дозатора. Плазмотрон генерує струмінь плазми продуктів згорання із ступенем недорозширення 1,1...3,0 та з максимальною швидкістю руху газового струменю 3000 м/с, а швидкість часток – до 600 м/с. При надзвуковому повітряногазовому напиленні питомо витрата енергії (кВт·год на 1 кг напиленого матеріалу) в 1,5...2,0 разів нижче, ніж у разі азотного або аргонного надзвукового плазмового струменя та в 5...10 разів менше, ніж при надзвуковому газополум'яному методі. Покриття з порошку WC-12Co з розмірами частинок 10...45 мкм, отримане на установці «КИЇВ-С», має твердість HV<sub>300</sub> 1150...1300 і шорсткість (після шліфувки алмазним інструментом) Ra = 0,05 мкм.

Співробітниками ПМ НАН України розроблена установка «Струм'я» для високошвидкісного газополум'яного напилення. Її основою є газоструменевий пристрій – генератор надзвукового струменя продуктів згорання палива (водню, метану, пропан-бутана та ін.) в кисні [10].

Проблемою плазмового та й інших способів напилення є складність збереження початкового складу плазмового струменя при напиленні на повітрі, яке близьке до вихідного при малій відстані. По мірі віддалення від плазмотрона, Незалежно від сили робочого струму, вміст повітря в струмені зростає, причому встановлено, що на відстані приблизно 50 мм його кількість досягає до 55...65 %, а на відстані 50...100 мм – більше 90 %, що приводить до виникнення в напилених покриттях різного роду хімічних і структурних змін [2].

Основні механізми взаємодії напилених частинок з газами ділять на такі групи: адсорбція газів на поверхні частинок; хімічна взаємодія з утворенням оксидних або нітрідних плівок; розчинення газів в рідкій фазі частинок; дифузійні процеси і механічне перемішування конвективними потоками в об'єм частинок продуктів поверхневої взаємодії [1].

Надзвукове плазмове напилення припускає вищі, ніж для методу «Джет-коут», температури, великі швидкості напилення і наявність (у разі повітряногазового методу) у плазмоутворюючій суміші кисню. У той же час при використанні надзвукових методів у зв'язку з малим часом перебування частинок порошку в полум'ї або плазмі процеси окислення не встигають суттєво розвинути.

У таблиці 2 наведені результати досліджень впливу технологічних параметрів напилення на динамічні характеристики надзвукового плазмового струменя, швидкість руху частинок напилюваного матеріалу і властивості отримуваних при цьому покриттів [11].

Вплив компонентів газової суміші та електричної потужності плазмотрону наведено в роботі [4]; розглянуті такі способи напилення: плазмове напилення в динамічному вакуумі із застосуванням суміші аргон-гелій (VPS He); плазмове напилення в

динамічному вакуумі із застосуванням суміші аргон-водень з низьким вмістом водню (VPS h2); плазмове напилення в динамічному вакуумі із застосуванням суміші аргон+водень (VPS H2); плазмове напилення на повітрі із застосуванням суміші аргон-гелій (Ars He); плазмове напилення на повітрі із застосуванням суміші аргон-водень (Ars H2). Показано, що змінюючи співвідношення цих компонентів, значення електричної потужності, що подається на плазмотрон, і витрати плазмоутворюючого газу, можна ефективно керувати плазмовим струменем, змінюючи її швидкість, протяжність, тепловміст і склад середовища.

Розглянемо плазмове напилення порошків групи заліза. Напилення проводили дозвукове та надзвукове

вело відмінність їх фізико-механічних і корозійних властивостей.

Різновидом плазмового напилення є плазмове-дугове. Даний метод дозволяє отримувати якісні, щільні покриття. В ІЕЗ ім. Є.О. Патона розроблена установка УН-126, в якій плазмовий струмінь захищається стисненим повітряним потоком, який паралельно оточує плазму, обмежуючи її взаємодію з атмосферним повітрям. Плазма продуктів горіння дозволяє змінювати довжину відновлювальної ділянки шляхом зміни співвідношення компонентів плазмоутворюючого газу. Плазмове-дугове напилення вигідно відрізняється від звичайного плазмового системою охолодження пальника, тобто вода для охолодження не використовується, а у якості охолоджувального середовища застосовують стиснене повітря. Також даний вид плазмового напилення забезпечує більш стабільний процес при напиленні суцільними дротами, є більш простим та дешевим у порівнянні зі звичайними установками плазмового напилення. Позитивним також є винесення дуги за межі пальника плазмотрону (рис. 1). Розроблена конструкція дозволяє збільшити робочий цикл електроду до заміни. Недоліком даної конструкції є складність варіювання напилюваними матеріалами, тобто при необхідності отримання шаруватого або градієнтного покриття необхідно витратити час на заміну дротів. Також дана система чутлива до якості порошкових дротів.

Таблиця 2

Умови напилення і властивості плазмових надзвукових покриттів [11]

Напилений матеріал	Робочий газ	Швидкість руху, м/с		Властивості покриття				
		струмено	частки	Густина, г/см <sup>3</sup>	Твердість		Шорсткість, мкм	Міцність зчеплення, МПа
					HRC	HV <sub>300</sub>		
Кобальтовий сплав	Ar	2900	400...500	7,8	36	350...450	6,0...7,0	54,0...58,6
WC-12Co	Ar	2900	400...500	13,8	60	850...950	4,0...5,0	69
WC-17Co	Ar	2900	330...400	11,8	55	750...950	6,0...8,0	69
WC-17Co	Ar	3000	550...650	12,2	55	750...950	2,5...3,0	69
Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> -NiCr	Ar+He	2900	400...500	6,4	51	500...550	4,4...5,7	62,0...69,0

ве, матеріал для напилення Fe<sub>60</sub>-Ni<sub>5</sub>-Cr<sub>18</sub>-Mo<sub>5,5</sub>-B<sub>4,5</sub>-Si<sub>6,5</sub>. Дозвукове плазмове покриття має більш грубу структуру, пористість та невисокі значення міцності зчеплення з основою – до 30 МПа (при використанні плазмоутворюючого газу - аргон-водневої суміші) та 32...33 МПа (при використанні суміші повітря з пропан-бутаном) [12].

Надзвукове плазмове напилення характеризується високою дисперсністю структури покриття. Надзвукове плазмове покриття відрізняється найбільш високим вмістом аморфної фази і мінімальним вмістом пор і оксидних включень, розташованих по межах частинок. Гарне прилягання до основи і висока щільність обумовлюють високу міцність зчеплення (62...67 МПа) надзвукового плазмового покриття з основою (табл. 3) [12]. Таким чином, при різних методах напилення у міру зміни швидкості і температури частинок спостерігалися відмінності в ступені аморфізації, хімічному складі, зокрема вмісті кисню, пористості та мікроструктурі покриттів в цілому, що зумо-

вило відмінність їх фізико-механічних і корозійних властивостей.

Таблиця 3

Характеристика газотермічних покриттів з порошків сплаву Fe<sub>60</sub>-Ni<sub>5</sub>-Cr<sub>18</sub>-Mo<sub>5,5</sub>-B<sub>4,5</sub>-Si<sub>6,5</sub> [12]

Метод напилення	Фазовий склад	Мікротвердість, МПа	Ступінь аморфізації, %	Міцність зчеплення, МПа
Плазмовий (аргон+водень)	a-Fe+AФ+Fe <sub>2</sub> B	2700-5500 (a-Fe) 5500-12500 (AФ)	65	18-28
Плазмовий (воздух+пропан-бутан)	a-Fe+AФ+Fe <sub>2</sub> B	4200-7100 (a-Fe) 7500-9900 (AФ)	70	32-33
Надзвуковий плазмовий (воздух+метан)	a-Fe+AФ+Fe <sub>2</sub> B+g-Fe	3000-6600 (a-Fe) 7800-8200 (AФ)	75	62-67



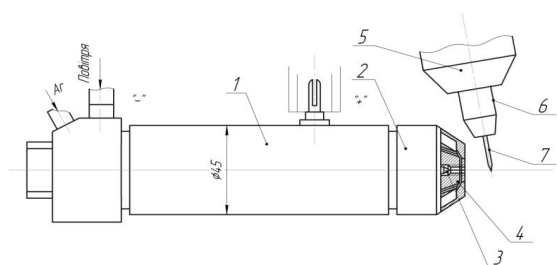


Рис. 1. Плазматрон плазово-дугової установки УН-126:  
1 – корпус; 2 – гайка; 3 – електрод; 4 – сопло; 5 – три-  
мач; 6 – наконечник; 7 – дріт

Детонаційне напilenня володіє найширшими можливостями для отримання самих різноманітних покриттів. Даний метод відрізняється високим значенням міцності зчеплення, низькою пористістю, можливістю одержувати широкоспектральні, у тому числі, шаруваті покриття без втрат часу на перезапралення матеріалу. Найважливішою перевагою детонаційного напilenня є високі адгезійні та когезійні властивості. Також покриття при даному способі напilenня має малу пористість. Крім того, при напilenні можна відносно легко регулювати температуру та швидкість напилування частинок; а термічний вплив на поверхню деталі мінімальний. Також детонаційний метод дозволяє отримувати аморфні та аморфно-кристалічні покриття більш легко у порівнянні з іншими методами, що є досить цікавим для використання при відновленні зношених деталей рухомого складу. Недоліки детонаційного методу відомі: високий рівень шуму (до 140 дБ), що потребує звукоізоляції; дороге та складне обладнання; наявність кисню в газовій суміші приводить до протікання окислювальних процесів. В процесі детонаційного напilenня покриття формуються за рахунок продуктів детонації. На нагрів і прискорення порошкових частинок найбільше впливає ступінь їх взаємодії з продуктами детонації [7]. Продукти детонації разом з частинками порошку формують двофазний потік, який утворює одиничну пляму покриття. При цьому частинки усередині одиничної плями майже однакові по структурі. При ударі частинок об поверхню напилуваної деталі вони додатково активуються. Всередині плями, утвореної за один постріл, відсутні пори та несплошності, частинки після деформації (ступінь деформації складає 10...50) мають форму ламелей [7, 9]. В результаті дії високої швидкості частинок й їх температури, тобто високих значень теплової та кінетичної енергії, а також додаткової активації частинок при ударі, міцність зчеплення частинок між собою висока і теоретично наближається до міцності напилуваного матеріалу (однорідного). Хоча необхідно зауважити, що вплив температури на властивості детонаційного покриття не є однозначним. Підвищення температури частинок підвищує температуру контактної зони, що позитивно впливає на адгезію та когезію. Одночасно з цим знижується тиск в зоні контакту часток з основою, що погіршує міцність зчеплення. Тому вважається, що оптимальним агрегатним станом частинок перед зіткненням є напіврозплавлений стан при відповідній швидкості частинок. Підкреслимо, що для різних матеріалів і робочих середовищ існують свої раціональні співвідношення температур і швидкостей частинок.

Важливість знаходження раціональних режимів процесу можна навести на такому прикладі. Відомо, що при нанесенні покриття детонацією відбувається викид із стовпа продуктів згорання горючого газу та залишків порошку, що не потрапив у до складу основної плями. Дані вторинні елементи пострілу осідають на напилувану поверхню покриття, що погіршує когезійні властивості. Для вирішення даної проблеми необхідно підбирати раціональні режими процесу, наприклад, при яких горюча суміш буде повністю згоряти, а порція порошку не перевищуватиме необхідної для одного циклу.

Узагальнюючи результати досліджень, наведених в літературних джерелах, можна представити порівняльний аналіз основних методів газотермічного напilenня (табл. 4).

Із збільшенням швидкості руху частинок зростають міцність зчеплення, мікротвердість, міцність на розрив, зменшується пористість. Відмінність між параметрами характеристик деяких покриттів сягає 2...3 разів.

Наведені результати, відповідно, визначають матеріали, що напилуються кожним окремим методом, і накладають обмеження на максимальний розмір частинок, здатних формувати покриття з високими показниками міцності зчеплення і когезійної міцності.

При виборі того або іншого способу напilenня та режиму необхідно враховувати техніко-економічні показники процесу. Економічність процесу оцінюють коефіцієнтом використання матеріалу (КВМ), ефективністю використання енергії, а також продуктивністю [6].

Як вже частково зазначалось вище, на процес напilenня покриттів впливає безліч факторів, кількість яких, за літературними даними коливається від 20 до 60. Тому при виборі параметрів технологічного процесу бажано виділити найбільш впливові фактори. Вибір вхідних параметрів варіювання залежить від вимог до покриття і методу напilenня. Наприклад, це можуть бути потужність електричної дуги, тиск і витрата стислого повітря, зазор між електродами, діаметр дротів для електродугового напilenня; склад детонаційної суміші, частота імпульсів, дистанція напilenня, витрата і склад плазмотворюючого газу, швидкість переміщення плазматрона та ін.

У якості вихідних контрольованих параметрів (функції відгуку) обирають ті параметри, які найбільш важливі для виробництва. Як правило, обов'язково контролюють міцність зчеплення покриття з основою, а також важливими є зносостійкість, твердість, пористість, корозійна стійкість та інші характеристики залежно від функціонального призначення покриття. Для визначення раціональних параметрів процесу можна скористатись коефіцієнтом використання матеріалу. Одним з показників раціонального режиму може виступати КВМ, оскільки він характеризує найбільш раціональний рівень теплової і кінетичної енергії частинок.

В результаті застосування методів кореляційного аналізу багаточинника проводиться ранжирування вибраних параметрів по їх значущості, і на цій основі здійснюється оптимізація процесу ГТН без проведення великого об'єму експериментальних досліджень. Аналіз існуючого об'єму експериментальних даних дозволяє встановити ступінь впливу окремих параметрів на структуру і властивості покриттів.

Таблица 4

Основні характеристики процесів газотермічного напилення

Метод напилення	Температура струї, °С	Склад плазми або продуктів згорання	Розхід газу, м <sup>3</sup> /год	Швидкість витоку струї, м/с	Швидкість часток, м/с	Максимальна продуктивність кг/год	Температура часток, °С	Міцність зчеплення МПа
Електродуговий [13]	5500	N <sub>2</sub> , O <sub>2</sub>	В 60-150		120-240	20-45	2000-2600	до 50
Газополум'яний порошковий дозвуківий [14]	2500	N <sub>2</sub> , CO, CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> -1,7 O <sub>2</sub> -2,2	300-500	50-150	3-5	1800-2000	до 50
Газополум'яний дротовий дозвуківий [15]	2800	N <sub>2</sub> , Co, CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O	7-10	300-500	180			
Газополум'яний надзвуківий [9]	3100	N <sub>2</sub> , Co, CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O	16-45	1500	до 800	2,2	1500	
Плазмово-дуговий [13]	10000-15000		2,4	100	120-400	10-16	2500	25-60
Плазмово-вакуумний [15]	8300	Ar, He	8,4	-	420-480 240-610	10		
Надзвукове повітряно-газове плазмове напилення [9]	3250-6250	CO, CO <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O	10-40	до 3000	до 600	20-50	-	60-120
Детонаційний [16]	3200	CO, CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> -1,1,5 O <sub>2</sub> -2,0,4,0	1200-1500	до 1000	2-5	2300	до 200

**Висновки**

На даний час існує чимало напрямків розвитку газотермічного напилення. Дослідники, впливаючи на різні вхідні фактори, отримують покриття з різними властивостями. Аналіз технологій ГТН показав, що однозначно обрати той або інший спосіб напилення для потреб ремонтного виробництва залізниць неможливо, оскільки необхідно проводити багатofакторну оцінку методів напилення. Тому при виборі методу напилення та відповідного обладнання, необхідна чітка постановка задачі. Необхідно означити, які деталі будуть підлягати відновленню напиленням, враховуючи ступінь їх відповідальності, умови експлуатації, характер і механізм зношування; визначити техніко-економічні показники процесу, оцінити надійність процесу; ремонтпридатність обладнання; початкову

вартість обладнання. У якості обмежень при постановці задачі можуть виступати фінансові можливості депо (заводу), наявність приміщень, кваліфікація робітників та ін. Априорно оцінити ту або іншу технологію можна за відомим співвідношенням «ціна – якість», тобто вартість нанесення покриттів – властивості відновленої деталі. Але в деяких випадках при розв'язанні задачі оптимізації вибору способу напилення, можливе виникнення ситуації, коли заради отримання певних властивостей покриттів необхідно обирати технологію з більш високою вартістю процесу. Попередньо, ремонтним виробництвам залізниць можна рекомендувати для відновлення відповідальних деталей використовувати надзвукове плазмове, детонаційне та плазмово-дугове напилення. При наявності іншого обладнання ГТН в ремонтному виробництві можна рекомендувати провести його модернізацію.

Література

1. Дружинин Л.К., Лиэпина Е.Д., Перфилов Л.С. и др. Получение покрытий и порошков высокотемпературным распылением металлических и керамических материалов в контролируемой атмосфере // Получение покрытий высокотемпературным распылением. -М.: Атомиздат, 1975. - С. 194-209.
2. Milewsski W., Sartowski M. Some propertles of coatings ARC- spread in nitrogen of argon atmosphere // Adl-in Thermal spraying: Proc. of the ITSC'86 (Montreal, dept. 8-12, 1986). - New York : Pergamon Press, 1986. - P. 467-475.
3. Rao K.V., Somrville D.A., Lee D.A. Properties and characterization of coatings made using «Jet-Cote» thermal spraying technique // Adv-in Thermal Spraying: Proc. of the ITSS'86 (Montreal. Sept. 8-12, 1986.) - New York: Pergamon Press. 1986. -P. 873-882.

4. Mazaris P., Manesse D., Lepovet C. Structures de revetements de carbure de tungtene obtenus par differents procedes de projection // Sandage Et techniques. - 1987. -v. 41. №1-2. -P.36-42.
5. Петров С.В., Сааков А.Г., Бояджян А.М. Восстановление металлизацией тяжело нагруженных дизельных коленвалов // Автоматическая сварка. - 1999. - №8. - С. 43-46
6. Газотермические покрытия из порошковых материалов / Ю.С. Борисов, Ю.А. Харламов, С.Л. Сидоренко, Е.И. Ардаговская / Справ. -К.: Наукова думка, 1987. - 544 с.
7. Астахов Е.А., Шаривкер С.Ю., Гарда А.П., Краснов А.Н. Скорость полета напыляемых частиц при детонационном методе нанесения покрытий // Физика и химия обработки материалов. -1975. -№4. -С. 58-61.
8. Куприянов И.Л., Геллер М.А. Газотермические покрытия с повышенной прочностью сцепления. - Минск. : «Наука і техника», 1990. - 176 с.
9. Борисов Ю.С., Петров Е.В. Использование сверхзвуковых струй в технологии газотермического напыления // Автоматическая сварка. -1995. -№1. -С. 41-44.
10. Евдокименко Ю.И., Кисель В.М., Кадыров В.Х. и др. Взаимодействие дисперсных частиц несущим потоком при высокоскоростном газопламенном напылении // Порошковая металлургия. - 1996. - №3/4. -С. 54-60.
11. Leongo F.N. Advanced high-energy plasma sprayed coatings // Proc. 8th ITSC (Miami, USA, ASM, May 19-23, 1976). Miami. - 1976. -P. 319-331.
12. Горбань В.Ф. Повышение жаро- и износостойкости деталей способом газотермического напыления покрытий из сплавов на основе хрома // Автоматическая сварка. -2000. -№2. -С. 27-31.
13. Черноиванов В.И., Андреев В.П. Новые технологические процессы и оборудование для восстановления деталей сельскохозяйственной техники. М.: Высшая школа, 1983. -95 с.
14. Антонов И.А. Газопламенная обработка металлов. -М.: Машиностроение, 1976. -262 с.
15. Thorpe M.L. Thermal spray industry in transition // Adv. Mat. and Proc. -1993. V. 143. №5. -P. 50-61.
16. Тюрин Ю.Н. Совершенствование оборудования и технологии детонационного нанесения покрытий // Автоматическая сварка. -1999. -№5. С. 13-18.

**Встановлена наявність одночастотного коливання в резонансній системі з відрізком круглого хвилевода**

**Ключові слова: резонанс, коливання, зонд, хвилевід, дзеркало**

**Установлено существование одночастотного колебания в резонансной системе с отрезком круглого волновода**

**Ключевые слова: резонанс, колебания, зонд, волновод, зеркало**

**Existence of unifrequent fluctuation in resonant system with a piece of a round wave guide is established**

**Keywords: resonance, vibrations, probe, waveguide, mirror**

УДК 614.89:537.868

## ИССЛЕДОВАНИЯ ОТКРЫТОЙ РЕЗОНАНСНОЙ СИСТЕМЫ С ОТРЕЗКОМ КРУГЛОГО ВОЛНОВОДА

**Н. П. Кунденко**

Кандидат технических наук, доцент  
Кафедра "Интегрированные электротехнологии и процессы"\*  
Контактный тел: (057) 712-28-33, 067-743-77-76  
E-mail: n.p.kundenko@inbox.ru

**А. Д. Черенков**

Доктор технических наук, профессор  
Кафедра "Технотроники и теоретической электротехники"\*  
Контактный тел.: (057) 712-42-32  
E-mail: tte\_nniekt@ukr.net  
\*Харьковский национальный технический университет  
сельского хозяйства им. П. Василенко  
ул. Артема, 44, г. Харьков, 61000

### 1. Введение

Для измерения электрофизических параметров веществ наибольшее распространение получили резонансные методы в силу высокой точности получа-

емых результатов. Основная идея всех резонансных методов состоит в наблюдении резонансных кривых колебательного контура, в который помещен образец исследуемого вещества. Изучение резонансных кривых до и после внесения диэлектрика позволяет по