

Особливості застосування газотермічного нанесення відновлювальних покриттів  
С.А. Астахов, В.В. Артемчук

В статті розглянуті особливості технологій нанесення газотермічних відновлювальних покриттів. Проведено порівняльний аналіз основних методів газотермічного напылення за деякими показниками, а також наведено приклади використання сучасних напылюваних матеріалів. Показано вплив деяких технологічних факторів на показники якості процесів газотермічного напылення.

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. Показано влияние некоторых технологических факторов на показатели качества процессов газотермического напыления.

**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, напыленням, 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 особливу 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 напылення (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 напылення для відновлення деталей. Для особливо відповідальних деталей першоступеневе 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 напылення [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 напылюваному матеріалу.

В даній роботі проведено аналіз теоретичних і практичних результатів досліджень для визначення можливості застосування технологій газотермічного напылення в умовах ремонтного виробництва залізниці.

**Метою** даної роботи є проведення порівняльного аналізу основних методів газотермічного напылення 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 різноманітним використанням матеріалів. Тому в даній роботі наведені результати досліджень, як інших авторів, так і власні.

**Виклад основного матеріалу.** Згідно прийнятої класифікації газотермічне напылення поділяють на основні чотири способи: електродугову металізацію, газополум'яний, плазмовий та детонаційний. Інші способи є різновидами вказаних, наприклад, застосування надзвукової швидкості транспортуючих газів, напылення 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 даній час важко однозначно віддати перевагу якому-небудь з методів, тим більше, що результат багато в чому залежить від параметрів напылення.

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 розпичовання 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), напылених на оптимальних режимах (за ствердженням автора [5]) різними способами: надзвукової електродугової металізації, плазмово-дугового напылення; типової електродугової металізації.

Таблиця 1 – Залежність властивостей покриттів від методу напылення [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

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 напиленого 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 аргоном, майже немає оксидів. Вищий вміст оксидів спостерігається в покритті, напиленому 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 напиленні за допомогою нейтральних газів. Аналогічні закономірності виявляють також і в збільшенні кількості пор і вмісту в покритті кисню.

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

Серед великої кількості чинників, що визначають структуру та властивості напилених покриттів можна виділити декілька головних. При способі електродугової металізації електричні параметри дуги залежать головним чином від характеристик матеріалу, що розплавляється. 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 розплавляється, 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 напилення порошоків є газополум'яний, плазмовий та детонаційний, а також їх варіації: надзвуковий газополум'яний («Джет-куут»), надзвуковий плазмовий і плазмове напилення в динамічному вакуумі.

Важливою складовою технологічного процесу напилення покриттів є створення умов для обмеження протікання фізико-хімічної взаємодії. Для цього необхідно зменшувати температури джерела тепла до 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-куут". 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, високі швидкості, проте не виключає вплив кисню.

У роботі [3] розглянуті переваги методу «Джет-куут». 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-куут». Розглянуто спосіб напилення «Джет-куут» 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. Плазموутворюючий 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 електросварювання імені Є.О. Патона на базі установки плазмового напилення «Київ-7» створено устаткування для надзвукового легко-газового плазмового напилення «КІІВ-С». Установа надзвукового плазмового напилення «КІІВ-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 струменя 3000 м/с, а швидкість часток – до 600 м/с. При надзвуковому повітряногазовому напиленні питома 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 «КІІВ-С», має твердість HV<sub>300</sub> 1150...1300 і шорсткість (після шліфовки алмазним інструментом) Ra = 0,05 мкм.

Співробітниками ІІМ НАН України розроблена установка "Струмін" для високошвидкісного газополум'яного наплення. Її основою є газструменевий пристрій – генератор надзвукового струменя продуктів згорання палива (водню, метану, пропан-бутана та ін.) в кисні [10].

Проблемою плазмового та й інших способів наплення є складність збереження початкового складу плазмового струменя при напленні 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 наплених покриттях різного роду хімічних і структурних змін [2].

Основні механізми взаємодії наплених 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 наплення припускає вищі, ніж для методу «Джет-коут», температури, великі швидкості наплення і наявність (у разі повітряно-газового методу) у плазموутворюючій 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 розвинутися.

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

Таблиця 2 – Умови наплення і властивості плазмових надзвукових покриттів [11]

Наплений матеріал	Робочий газ	Швидкість руху, м/с		Властивості покриття				
		струменю	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

Вплив компонентів газової суміші та електричної потужності плазмотрона наведено в роботі [4]; розглянуті такі способи наплення: плазмове наплення в динамічному вакуумі із застосуванням суміші аргон-гелій (VPS He); плазмове наплення в динамічному вакуумі із застосуванням суміші аргон-водень з низьким вмістом водню (VPS h2); плазмове наплення в динамічному вакуумі із застосуванням суміші аргон+водень (VPS H2); плазмове наплення на повітрі із застосуванням суміші аргон-гелій (Ars He); плазмове наплення на повітрі із застосуванням суміші аргон-водень (Ars H2). Показано, що змінюючи співвідношення цих компонентів, значення електричної потужності, що подається на плазмотрон, і витрату плазموутворюючого газу, можна ефективно керувати плазмовим струменем, змінюючи її швидкість, протяжність, тепловміст і склад середовища.

Розглянемо плазмове наплення порошків групи заліза. Наплення проводили дозвукове та надзвукове, матеріал для наплення 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 - аргону-водневої суміші) та 32...33 МПа (при використанні суміші повітря з пропан-бутаном) [12].

Надзвукове плазмове наплення 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 наплення у міру зміни швидкості і температури частинок спостерігалися відмінності в ступені аморфізації, хімічному складі, зокрема вмісті кисню, пористості та мікроструктурі покриттів в цілому, що зумовило 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 наплення	Фазовий склад	Мікротвердість, МПа	Ступінь аморфізації, %	Міцність зчеплення, МПа
Плазмовий (аргон+водень)	α-Fe+AФ+Fe <sub>2</sub> B	2700-5500 (α-Fe) 5500-12500 (АФ)	65	18-28
Плазмовий (воздух+пропан-бутан)	α-Fe+AФ+Fe <sub>2</sub> B	4200-7100 (α-Fe) 7500-9900 (АФ)	70	32-33
Надзвуковий	α-Fe+AФ+Fe <sub>2</sub> B+γ-	3000-6600	75	62-67

плазмовий (воздух+метан)	Fe	( $\alpha$ -Fe) 7800-8200 (АФ)		
-----------------------------	----	--------------------------------------	--	--

Різновидом плазмового наплення є плазмово-дугове. Даний метод дозволяє отримувати якісні, щільні покриття. В ІЕЗ ім. С.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. Плазмово-дугове наплення вигідно відрізняється від звичайного плазмового системою охолодження паливника, тобто вода для охолодження не використовується, а у якості охолоджувального середовища застосовують стиснене повітря. Також даний вид плазмового наплення забезпечує більш стабільний процес при напленні суцільними дротами, є більш простим та дешевим у порівнянні зі звичайними установками плазмового наплення. Позитивним також є винесення дуги за межі паливника плазмотрону (рис. 1). Розроблена конструкція дозволяє збільшити робочий цикл електроду до заміни. Недоліком даної конструкції є складність варіювання напильованими матеріалами, тобто при необхідності отримання шаруватого або градієнтного покриття необхідно витрачати час на заміну дротів. Також дана система чутлива до якості порошкових дротів.

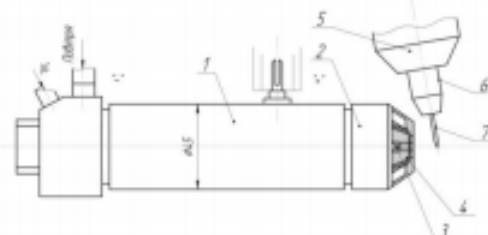


Рис. 1 – Плазмотрон плазмово-дугової установки УН-126:  
1 – корпус; 2 – гайка; 3 – електрод; 4 – сопло; 5 – тримач; 6 – наконечник; 7 - дріт

Детонаційне наплення 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 перезагрівання матеріалу. Найважливішою перевагою детонаційного наплення є високі адгезійні та когезійні властивості. Також покриття при даному способі наплення має малу пористість. Крім того, при напленні можна відносно легко регулювати температуру та швидкість напильованих 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 наплення 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 напильованої 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 напильованого 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 напильовану пляму 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 наплення (табл. 4).

Таблиця 4 – Основні характеристики процесів газо термічного наплення

Метод наплення	Температура струї, °C	Склад плазми або продуктів згорання	Розхід газу, м³/год	Швидкість витoku струї, м/с	Швидкість часток, м/с	Максимальна продуктивність кг/год	Температура часток, °C	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	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	300-500	50-150	3-5	1800-2000	до 50

дозвуковий [14]			O <sub>2</sub> -2,2					
Газополум'яний дротоний дозвуковий [15]	2800	N <sub>2</sub> , Co, CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O	7-10	300-500	180			
Газополум'яний надзвуковий [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 напilenня [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

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 напilenються 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 дровів для електродугового напilenня; склад детонаційної суміші, частота імпульсів, дистанція напilenня, витрата і склад плазموутворюючого газу, швидкість переміщення плазмотрона 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.

**Висновки.** На даний час існує чимало напрямків розвитку газотермічного напilenня. Дослідники, впливаючи на різні вхідні фактори, отримують покриття з різними властивостями. Аналіз технологій ГТН показав, що однозначно обрати той або інший спосіб напilenня для потреб ремонтного виробництва залізниць неможливо, оскільки необхідно проводити багатofакторну оцінку методів напilenня. Тому при виборі методу напilenня та відповідного обладнання, необхідна чітка постановка задачі. Необхідно означити, які деталі будуть підлягати відновленню напilenням, 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 делу (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 напilenня, можливе виникнення ситуації, коли заради отримання певних властивостей покриттів необхідно обрати технологію з більш високою вартістю процесу. Попередньо, ремонтним виробництвам залізниць можна рекомендувати для відновлення відповідальних деталей використовувати надзвукове плазмове, детонаційне та плазмово-дугове напilenня. При наявності іншого обладнання ГТН в ремонтному виробництві можна рекомендувати провести його модернізацію.

#### Література:

1. Дружинин Л.К., Лизина 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. Milewski W., Sartowski M. Some properties of coatings ARC- spread in nitrogen or argon atmosphere // Adv-in Thermal spraying: Proc. of the ITSC'86 (Montreal, sept. 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 tungstene 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. Кулривнов 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.