

ОСОБЛИВОСТІ ТЕХНОЛОГІЙ НАНЕСЕННЯ ГАЗОТЕРМІЧНИХ ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ПОКРИТТІВ

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

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.

Features of technologies of putting the gas-thermal coatings are considered in the article. Some examples of using the modern sprayed materials are presented as well as the comparative analysis of basic methods of gas-thermal spraying is conducted on some indices. The influence of some technologic factors on the quality indices of processes of gas-thermal spraying is demonstrated.

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. Таким чином, для уявлення та вибору технології необхідно проводити їх порівняльний аналіз.

Як відомо, деталі рухомого складу залізниці працюють у важких умовах. Серед деталей, що зношуються багато таких, що мають циліндричну форму. Наприклад, сумарна кількість валиків гальмівної важільної передачі, підвісу редуکتора, гідроамортизаторів, ресорного підвішування, підвісу тягових електричних двигунів для електровозів ЧС-7, ЧС-8 складає 426 од., ВЛ-80 – 272 од., ЧС 2 – 310 од. Враховуючи середню вартість валиків 32 грн, нескладно підрахувати економічну доцільність їх відновлення, якщо вартість відновлення складає не більше 20...40 % від вартості нових деталей.

Серед відновлювальних технологій для нанесення покриттів на зношені валики доцільно використовувати електролітичні методи та методи газотермічного напилення. Розглянемо та порівняємо методи газотермічного напилення (ГТН) більш детально.

Умовно методи газотермічного напилення можна поділити на електродугову металізацію, газополум'яний, плазмовий та детонаційний.

До того ж, перераховані методи доповнюються застосуванням надзвуку. Сучасні методи ГТН покриттів дозволяють здійснювати процес в атмосфері, в середовищі захисного газу, у вакуумі, а також під водою. Практично всі матеріали, що використовують при ГТН, тією чи іншою мірою чутливі до складу середовища, в якому формується покриття [1 – 4].

Для надзвукового плазмового і особливо для детонаційного методу характерна вища дисперсність структури покриття. Надзвукове плазмове покриття відрізняється найбільш високим вмістом аморфної фази та мінімальним вмістом пор і оксидних включень, розташованих по межах частинок, тоді як в детонаційному покритті знаходиться підвищена кількість оксидних частинок і достатньо товстих плівок. Гарне прилягання до основи і висока щільність обумовлюють високу міцність зчеплення (62...67 МПа) надзвукового плазмового покриття з основою (табл. 1).

Дозвукове плазмове покриття відрізняється грубішою структурою, невеликою пористістю і нижчими значеннями міцності зчеплення з основою (18...28 МПа) при використанні як плазмоутворюючого газу аргону-водневої суміші та 32...33 МПа – суміші повітря з пропан-бутаном [5].

Таким чином, при різних методах напилення у міру зміни швидкості й температури частинок спостерігалися відмінності в ступені аморфізації, хімічному складі, зокрема в вмісті кисню, пористості та мікроструктурі покриттів в цілому, що зумовило відмінність їх фізико-механічних і корозійних властивостей.

Характеристика газотермічних покриттів з порошків сплаву Fe-Ni-Cr-Mo-B-Si

Метод напилення	Фазовий склад	Мікротвердість, МПа	Ступінь аморфізації, %	Міцність зчеплення, МПа
Плазмовий (аргон+водень)	$\alpha\text{-Fe}+\text{АФ}+\text{Fe}_2\text{B}$	2700...5500 ($\alpha\text{-Fe}$) 5500...12500 (АФ)	65	18...28
Плазмовий (повітря+пропан-бутан)	$\alpha\text{-Fe}+\text{АФ}+\text{Fe}_2\text{B}$	4200...7100 ($\alpha\text{-Fe}$) 7500...9900 (АФ)	70	32...33
Надзвуковий плазмовий (повітря+метан)	$\alpha\text{-Fe}+\text{АФ}+\text{Fe}_2\text{B}+\gamma\text{-Fe}$	3000...6600 ($\alpha\text{-Fe}$) 7800...8200 (АФ)	75	62...67
Детонаційний (кисень+пропан-бутан)	$\alpha\text{-Fe}+\text{АФ}+\gamma\text{-Fe}+\text{FeO}$	2600...4900 ($\alpha\text{-Fe}$) 4400...9300 (АФ)	60	-

Примітка: масова доля елементів сплаву така: 5 % Ni, 18 % Cr, 5,5 % Mo, 4,5 % B, 6,5 % Si; АФ – аморфна фаза.

Вплив методу напилення на структуру і властивості захисних покриттів найяскравіше виявляється при використанні порошків складного складу, наприклад карбідів з металевою зв'язкою, до яких відноситься відома система WC-Co.

Основними методами ГТН порошків WC-Co є газополум'яний, плазмовий, детонаційний, надзвуковий плазмовий, надзвуковий газополум'яний («Джет-коут») і плазмове напилення в динамічному вакуумі.

З погляду обмеження протікання фізико-хімічної взаємодії при напиленні покриттів, до технологічного процесу слід пред'явити такі вимоги: зниження температури джерела тепла до мінімально необхідного для нагріву частинок; зменшення часу перебування частинки в плазмі або полум'ї, тобто збільшення швидкості руху частинок; проведення процесу в середовищі, що не має окислювальної здатності.

Найменш відповідними в цьому сенсі є методи газополум'яного і плазмового напилення на повітрі. Детонаційному напиленню притаманні високі швидкості переміщення частинок, проте наявність кисню в газовій суміші приводить до протікання окислювальних процесів. Плазмове напилення в динамічному вакуумі виключає процеси окислення, але знижений тиск при високих температурах може стимулювати процес декарбідизації.

Метод надзвукового газополум'яного напилення забезпечує порівняно низькі температури, високі швидкості, проте не виключає вплив кисню. Надзвукове плазмове напилення припускає вищі, ніж для методу «Джет-коут», температури, великі швидкості напилення і наявність (у разі повітряно-газового 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 істотно розвинути.

В даний час важко однозначно віддати перевагу якому-небудь з методів, тим більше, що результат багато в чому залежить від оптимізації параметрів напилення.

Переваги методу «Джет-коут» розглянуті у роботі [3]. Зазначено, що даний метод забезпечує збереження в покритті WC, а фази W_2C та $\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$ виявлені в невеликих кількостях. Механічні властивості покриттів 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, а також відсутність вираженої шаруватої структури покриттів. Отриманий ефект пояснюється низькою робочою температурою (до 3000 °C) і великими (до 500 м/с) швидкостями руху частинок.

Відзначена також висока якість покриттів WC-Co, отриманих методом «Джет-коут». Покриття відрізняються високою щільністю, твердістю, міцністю зчеплення з основою і 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.

У роботі [4] також наводяться переваги методу «Джет-коут». Розглянуті такі способи напилення: «Джет-коут» із застосуванням суміші «кисень-пропан» (J-K Pr); плазмове напилення в динамічному вакуумі із застосуванням суміші «аргон-гелій» (VPS He); плазмове напилення в динамічному вакуумі із застосуванням суміші «аргон-водень» з низьким змістом водню (VPS h2); плазмове напилення в динамічному вакуумі із застосуванням суміші «аргон+водень» (VPS H2); плазмове напилення на повітрі із за-

стосуванням суміші «аргон-гелій» (Aps He); плазмове напилення на повітрі із застосуванням суміші «аргон-водень» (Aps H2).

Змінюючи співвідношення цих компонентів, значення електричної потужності, що подається на плазмотрон, і витрату плазмоутворюючого газу, можна ефективно керувати плазмовим струменем, змінюючи його швидкість, протяжність, тепловміст і склад середовища.

У роботі [5] описано апаратуру і технологію металізації електродуги, при якій розпилювання дротів здійснюється під впливом надзвукового потоку гарячих продуктів згоряння природного газу (7...15 %) з повітрям.

Проведено порівняння властивостей (табл. 2) покриттів (склад дроту не наведений), напилених на оптимальних режимах різними способами: надзвукової електродугової металізації, плазмово-дугового напилення; типової електродугової металізації.

Таблиця 2

Залежність властивостей покриттів від методу напилення

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

Забезпечення при надзвуковій електродуговій металізації високої стабільності горіння дуги завдяки орієнтації уздовж газового потоку, а отже, процесу передачі теплоти в плавкі електроди, інтенсивний розгін і дроблення частинок розплавленого металу, їх захист від окислення у польоті і зниження кількості матеріалу, що випарувався, дозволили істотно поліпшити властивості напиленого покриття.

При виборі режиму повинні враховуватися техніко-економічні показники процесу. Економічність процесу оцінюють коефіцієнтом використання матеріалу (КВМ), ефективністю використання енергії, а також продуктивністю [6].

На процес ГТН покриттів, на його якість безпосередньо або побічно впливає безліч чинників. За оцінками різних дослідників, їх кількість коливається від 20 до 60. У цих умовах важливим є, з одного боку, вибір параметрів процесу формування покриття, а з іншого – виділення із загальної маси найбільш істотних в

даному випадку лімітуючих чинників.

Останнім часом для оптимізації технологічного режиму ГТН все більш широке поширення набуває метод математичного планування експерименту. Вибір вхідних параметрів варіювання залежить від вимог до покриття і методу напилення. Наприклад, це можуть бути потужність електричної дуги, тиск і витрата стислого повітря, зазор між електродами, діаметр дротів для розпилювання електродуги; склад детонаційної суміші, частота імпульсів, дистанція напилення (при детонаційному методі); потужність, витрата і склад плазмоутворюючого газу, дистанція напилення, швидкість переміщення плазмотрона (при плазмовому методі).

Як функції відгуку (контрольованих параметрів) зазвичай розглядають міцність зчеплення покриття з основою, зносостійкість, твердість, пористість та інші характеристики залежно від функціонального призначення покриття. Одним з найбільш універсальних показників оптимально-

го режиму може бути КВМ, оскільки він характеризує найбільш раціональний рівень теплової і кінетичної енергії частинок.

В результаті застосування методів кореляційного аналізу багаточинника проводиться ранжування вибраних параметрів за їх значущістю, і на цій основі здійснюється оптимізація процесу ГТН без проведення великого обсягу експериментальних досліджень.

Аналіз існуючого обсягу експериментальних даних дозволяє встановити ступінь впливу окремих параметрів на структуру і властивості покриттів.

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 [7]. Проте надмірне збільшення потужності викликає значний нагрів 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. У свою чергу, тем-

пература сталевих частинок при металізації електродуги залежить від розмірів, проте вона не перевищує температури плавлення заліза.

Заміна повітря аргоном при дугової металізації сприяє поліпшенню властивостей покриттів і підвищенню міцності зчеплення.

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

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

У табл. 3 наведено результати досліджень впливу технологічних параметрів напилення на динамічні характеристики надзвукового плазмового струменя, швидкість руху частинок матеріалу, що напилюється, і властивості отримуваних при цьому покриттів [8].

Таблиця 3

Умови напилення і властивості плазмових надзвукових покриттів

Напилений матеріал	Робочий газ	Швидкість, м/с		Властивості покриття				
		струменю	частки	Густина, г/см ³	Твердість		Шорсткість, мкм	Міцність зчеплення, МПа
					HRC	HV ₃₀₀		
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 ₃ C ₂ -NiCr	Ar+He	2900	400...500	6,4	51	500...550	4,4...5,7	62,0...69,0

Розвитком цих методів стало газополум'яне надзвукове напилення «Джет-коут». Досвід застосування установок такого типу дав можливість збільшити швидкості частинок до 300...350 м/с (замість 60...120 м/с в звичайних газополум'яних установках) і різко підвищити якість покриттів, що досягали рівня, притаманного детонаційному напиленню.

Нові перспективи розвитку технології газотермічного напилення відкриває використання

надзвукових струменів плазми продуктів згоряння вуглеводневих газів з повітрям [9]. Співробітниками Інституту газу і Інституту електрозварювання Національної академії наук України на базі установки плазмового напилення «Київ-7» створено устаткування для надзвукового легкогазового плазмового напилення «Київ-С». Установка складається з надзвукового плазмотрона, джерела живлення, пульта управління і порошкового дозатора. Плазмо-

трон генерує слабконедорозширений струмінь плазми продуктів згоряння із ступенем недорозширення 1,1...3,0. Максимальна швидкість складає 3000 м/с при числі Маха ~ 2 . Питома витрата енергії (кВт-год на 1 кг напиленого матеріалу) при надзвуковому повітряногазовому напиленні в 1,5...2,0 разів нижча, ніж у разі азотного або аргонового надзвукового плазмового струменя, і в 5...10 разів менша, ніж при надзвуковому газополум'яному методі.

Покриття з порошку WC-12Co з розмірами частинок 10...45 мкм, отримане на установці «КИВ-С», має твердість HV_{300} 1150...1300 і шорсткість (після шліфівки алмазним інструментом) $Ra = 0,05$ мкм.

Співробітниками ІІМ НАН України розроблено установку «Струмінь» для високошвидкісного газополум'яного напилення. Її основою є газоструменевий пристрій (ГСУ) – генератор надзвукового струменя продуктів згоряння палива (водню, метану, пропан-бутану та ін.) в кисні [10].

Збереження початкового складу плазмового струменя при напиленні на повітрі обмежене малою відстанню. Згідно [2], незалежно від сили робочого струму з віддаленням від плазмотрона вміст повітря в струмені зростає, і на відстані приблизно 50 мм його кількість досягає 55...65 %, а на відстані 50...100 мм – більше 90 %. Це приводить до виникнення в напилених покриттях різного роду хімічних і структурних змін.

Серед основних механізмів взаємодії напилених частинок з газами можна виділити чотири: адсорбція газів на поверхні частинок; хімічна взаємодія з утворенням оксидних або нітридних плівок; розчинення газів в рідкій фазі частинок; дифузійні процеси і механічне переміщення конвективними потоками в об'єм частинок продуктів поверхневої взаємодії [1].

Ефект впливу середовища на структуру і властивості покриттів може бути найчіткіше виявлений при використанні одного і того ж методу нанесення й устаткування. У роботі [2] описано структуру покриттів із сталі, отриманих в камері методом металізації електродуги із застосуванням у якості робочих газів аргону, азоту і повітря, а поза камерою – азотом. У структурі покриттів із сталі, нанесених аргоном в камері з аргоном, майже немає оксидів. Вищий вміст оксидів спостерігається в покритті, напиленому в камері з використанням азоту в якості робочого газу та середовища, а найбільша кількість оксидів виявлена в покритті, нанесеному за допомогою азоту поза камерою. Покриття, нанесене поза камерою з використан-

ням стислого повітря, має явно відмінну від інших структуру. У ній помітно не тільки велику кількість оксидів, але спостерігається також розділення на окремі шари, 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, які напилені за допомогою аргону, що, на думку авторів [2], пов'язано з чистотою використовуваних газів (застосовувалися гази технічної чистоти, а не хімічно чисті). Що стосується азоту, той самий високий вміст цього газу відмічений в покриттях, напилених за допомогою стислого повітря.

Так, при газополум'яному напиленні корунду отримують покриття, що складається практично з $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$, при плазмовому – багатофазне покриття, що містить за об'ємом 5...10 % $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, решта $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$. В результаті термообробки при температурі вище 1180 °С вміст α -фази в плазмовому покритті збільшується до 100 %. При плазмовому напиленні $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ на охолоджувану основу в покритті формується до 10 % α -фази та 90 % γ -фази; якщо основа не охолоджується, то вміст α -фази збільшується до 50...60 % [6].

Результати досліджень, наведених в літературних джерелах [9, 11 – 16], дозволяють провести порівняльний аналіз основних методів газотермічного напилення (табл. 4).

Структура покриттів, отримана різними методами ГТН, крім ряду загальних ознак має і істотні відмінності, пов'язані з технологічними особливостями процесів.

Основна причина полягає в тому, що методи різняться за абсолютними значеннями і співвідношеннями кінетичної та теплової енергії, що передається матеріалу, що напилюється.

По мірі збільшення швидкості руху частинок зменшується пористість, зростають міцність зчеплення, мікротвердість і міцність на розрив. Відмінність між параметрами характеристик газополум'яних і детонаційних покриттів перевищує 2...3 рази.

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

Таблиця 4

Основні характеристики процесів газотермічного наплення

Метод наплення	Температура струменя, °С	Склад плазми або продуктів згорання	Розхід газу, м ³ /год	Швидкість витоку струменя, м/с	Швидкість часток, м/с	Максимальна продуктивність, кг/год	Температура часток, °С	Міцність зчеплення, МПа
Електродуговий	5500	N ₂ , O ₂	В 60...150		120...240	20...45	2000...2600	до 50
Газополум'яний порошковий дозвуковий	2500	N ₂ , CO, CO ₂ , H ₂ O	C ₂ H ₂ -1,7; O ₂ -2,2	300...500	50...150	3...5	1800...2000	до 50
Газополум'яний дроговий дозвуковий	2800	N ₂ , Co, CO ₂ , H ₂ O	7...10	300...500	180			
Газополум'яний надзвуковий	3100	N ₂ , Co, CO ₂ , H ₂ O	16...45	1500	до 800	2,2	1500	
Плазмово-дуговий дозвуковий	10000...15000		2,4	100	120...400	10...16	2500	25...60
Плазмово-вакуумний	8300	Ar, He	8,4	-	420...480, 240...610	10		
Назвукове повітряно-газове плазмове наплення	3250...6250	CO, CO ₂ , N ₂ , H ₂ O	10...40	до 3000	до 600	20...50	-	60...120
Плазмово-детонаційний	1700...29700		C ₃ H ₈ -2,0, O ₂ -4,0	600...8000		6...8		
Детонаційний	3200	CO, CO ₂ , H ₂ O	C ₃ H ₈ -1...1,5, O ₂ -2,0...4,0	1200...1500	до 1000	2...5	2300	до 200

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Получение покрытий и порошков высокотемпературным распылением металлических и керамических материалов в контролируемой атмосфере [Текст] / Л. К. Дружинин [и др.] – В кн.: Получение покрытий высокотемпературным распылением. – М.: Атомиздат, 1975. – С. 194-209.
2. Milewsski, W. Some properties of coatings ARC-spread in nitrogen of argon atmosphere [Text] / W. Milewsski, M. Sartowski // 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. Properties and characterization of coatings made using «Jet-Cote» thermal spraying technique [Text] / K. V. Rao, D. A. Somrvill, D. A. Lee // Adv. in Thermal Spraying: Proc. of the ITSC'86 (Montreal, Sept. 8-12, 1986). – New York: Pergamon Press, 1986. – P. 873-882.
4. Mazaris, P. Structures de revetements de carbure de tungtene obtenus par differents procedes de projection [Text] / P. Mazaris, D. Manesse, C. Lepovet // Sandage et techniques. – 1987. – V. 41, № 1-2. – P. 36-42.
5. Петров, С. В. Восстановление металлизацией тяжело нагруженных дизельных коленвалов [Текст] / С. В. Петров, А. Г. Сааков, А. М. Бояджян // Автоматическая сварка. – 1999. – № 8. – С. 43-46.
6. Газотермические покрытия из порошковых материалов [Текст] : справочник / Ю. С. Борисов [и др.] – К.: Наук. думка, 1987. – 544 с.
7. Скорость полета напыляемых частиц при детонационном методе нанесения покрытий [Текст] / Е. А. Астахов [и др.] // Физика и химия обработки материалов. – 1975. – № 4. – С. 58-61.
8. Leongo, F. N. Advanced high-energy plasma sprayed coatings [Text] / F. N. Leongo // Proc. 8th ITSC (Miami, USA, ASM, May 19-23, 1976). – Miami, 1976. – P. 319-331.
9. Борисов, Ю. С. Использование сверхзвуковых струй в технологии газотермического напыления [Текст] / Ю. С. Борисов, Е. В. Петров // Автоматическая сварка. – 1995. – № 1. – С. 41-44.
10. Взаимодействие дисперсных частиц несущим потоком при высокоскоростном газопламенном напылении [Текст] / Ю. И. Евдокименко [и др.] // Порошковая металлургия. – 1996. – № 3/4. – С. 54-60.
11. Черноиванов, В. И. Новые технологические процессы и оборудование для восстановления деталей сельскохозяйственной техники [Текст] / В. И. Черноиванов, В. П. Андреев. – М.: Высш. шк., 1983. – 95 с.
12. Антонов, И. А. Газопламенная обработка металлов / И. А. Антонов. – М.: Машиностроение, 1976. – 262 с.
13. Thorpe, M. L. Thermal spray industry in transition [Text] / M. L. Thorpe // Adv. Mat. and Proc. – 1993. – V. 143, № 5. – P. 50-61.
14. Кудинов, В. В. Теплофизика плазменных покрытий [Текст] / В. В. Кудинов, Е. М. Иванов // Физика и химия плазменных металлургических процессов. – М.: Наука, 1965. – С.103-126.
15. Тюрин, Ю. Н. Совершенствование оборудования и технологии детонационного нанесения покрытий [Текст] / Ю. Н. Тюрин // Автоматическая сварка. – 1999. – № 5. – С. 13-18.
16. Куприянов, И. Л. Газотермические покрытия с повышенной прочностью сцепления [Текст] / И. Л. Куприянов, М. А. Геллер. – Мн.: Наука і тэхніка, 1990. – 176 с.

Надійшла до редколегії 03.06.2010.

Прийнята до друку 16.06.2010.