

О.М. Михайлов*, В.В. Головатинська, А.М. Петров, М.Г. Петров

* *Донецький національний технічний університет,
Луганська філія кафедри технології машинобудування ДонНТУ,
г. Донецьк, г. Луганськ, Україна.*

ФОРМУВАННЯ ДЕТОНАЦІЙНИМ НАПИЛЕННЯМ ПІДШАРІВ МІЖ ПІДКЛАДКОЮ І ПОКРИТТЯМ ДЕТАЛІ

© Михайлов О.М., Головатинська В.В., Петров А.М., Петров М.Г., 2013

У статті розглядається доцільність використання функціонально-орієнтованого прошарку покриття між поверхнею та покриттям деталі з метою підвищення фізико-механічних характеристик нанесеного робочого шару за рахунок оптимізації умов контакту між робочим шаром та поверхнею деталі.

There is considered a suitability of functional-oriented covering layer usage between surface and detail coating for the purpose to increase covered working layer physical-mechanical properties owing to optimization of working layers contact conditions.

Key words: detonation coating, functional-oriented covering, micro solidity, powder materials.

Постановка проблеми. Прогресивною технологією нанесення покриттів, що використовується для зміцнення деталей або їх відновлення, є детонаційне напилення порошку (ДНП) [1, 2]. Застосування цього способу дає можливість наносити покриття різного призначення на зовнішні і внутрішні поверхні деталей з металів, кераміки або полімерів для забезпечення широкого спектру фізико-хімічних властивостей цих поверхонь. Покриття наносяться з різних порошкових матеріалів на основі металів і їх оксидів або карбідів, а також полімерів.

Якість зчеплення покриття з підкладкою деталі залежить від ряду факторів і параметрів процесу, в тому числі, від співвідношення твердості підкладки деталі і твердості напилюваних порошкових матеріалів, що впливають на умови формування структури і властивостей нанесених покриттів. Наприклад, при напиленні порошків з високою твердістю (твердого сплаву ВСНГ -88 або оксидів, типу Al_2O_3 , TiO_2) на поверхню деталі (підкладку) з високою твердістю, властивості покриття істотно знижуються через зменшення адгезії покриттів [1]. У цьому випадку підвищення адгезії покриттів може бути забезпечено за рахунок формування на напиленої поверхні деталі проміжного шару (підшару) з матеріалів, що мають більш низьку твердість і більш високу пластичність, наприклад, міді та її сплавів. Наявність у такому підшарі окремих ділянок з різною твердістю також може бути використано для нормалізації напружень в зонах взаємодії, відповідно, підкладка - підшар, підшар - покриття. За своєю технологічною сутністю такий підшар буде являти собою функціонально-орієнтований підшар (ФОП).

Технічні можливості способу ДНП дозволяють отримувати функціонально-орієнтовані детонаційні покриття (ФОДП), що мають більш широкий експлуатаційний спектр по відношенню до детонаційних покриттів, поверхневий шар яких сформовано з однорідних матеріалів [3, 4, 5]. При технологічній реалізації нанесення ФОДП з порошкових матеріалів з різною твердістю також може мати місце доцільність нанесення ФОП з ділянками, що мають різну твердість, що дасть можливість оптимізувати співвідношення твердості відповідних ділянок ФОП і твердості порошкових матеріалів, використовуваних для формування ФОДП.

Для напилення підшару на підкладку з високою твердістю може бути використаний електролітичний мідний порошок по ГОСТ 4960-2009. Однак властивості такого порошку можуть не задовольнити вимоги до зміни твердості окремих ділянок ФОП при нанесенні ФОДП. Тому становить інтерес застосування для отримання ФОП мідного порошку, що має більш широкий спектр фізико-механічних характеристик, включаючи оптимізацію форми частинок порошку в процесі його виготовлення, наприклад, отриманий переробкою брухту провідників струму [6]. Це дозволить розширити діапазон фізико-механічних властивостей ділянок ФОП при технологічній реалізації його нанесення детонаційним напиленням.

Аналіз останніх досліджень. У процесі детонаційного напилення відбувається імпульсний нагрів і розгін частинок напилюваного порошкового матеріалу високошвидкісним і високотемпературним потоком продуктів детонації, що утворюється із заданою циклічністю у відкритому з одного боку стовбурі установки детонаційного нанесення покриттів в результаті згоряння суміші робочих газів [1, 2]. При зіткненні частинок порошку про підкладку, а в подальшому у верхню частину покриття, в результаті термомеханічних процесів відбувається пошарове формування покриття за рахунок оплавлення, спікання і зчеплення напилюваних частинок порошку спочатку з підкладкою і між собою, а потім з верхньою частиною формованого покриття і між собою.

При напиленні в зоні контакту виникають імпульсні тиски, що перевищують 100×10^8 Па [7]. У результаті в напилюваному матеріалі відбувається значна пластична деформація, підвищується міцність і твердість, виникають залишкові напруження, що створюють значний вплив на властивості покриття [8]. Формування структури і властивостей покриття являє собою складний процес. Твердість покриттів і величина залишкових напружень в них істотно залежить від умов напилення порошкових матеріалів, твердості матеріалу, на якому формується покриття, і фізико-механічних характеристик напилюваного порошку, що включає твердість його частинок.

Властивості детонаційних покриттів визначаються великим числом факторів. У тому числі, вони залежать від товщини покриття, величини імпульсу тиску, що виникає в зоні зіткнення часток і оброблюваної поверхні деталі або ділянки покриття, який визначається фізичними властивостями контактних матеріалів і швидкістю зіткнення, що змінюється також і від глибини завантаження порошку [1, 2]. Збільшення глибини завантаження порошку, залежно від маси його частинок, впливає на швидкість напилюваного порошку, а також на час перебування цих частинок в потоці продуктів детонації і відповідну інтенсифікацію їх нагріву, що, у свою чергу, впливає на характер пластичної деформації частинок і локальну температуру в зоні формування відповідної ділянки покриття.

На формування покриття також впливають фізико-хімічні властивості порошку, включаючи форму і розмір часток. Форма і розмір часток порошку визначають парусність цих частинок, що впливає на швидкість їх руху частинок в потоці продуктів детонації, що, в цілому, призводить до зміни параметрів температури і тиску в зоні контакту цих часток з підкладкою або формованого покриття. Зазвичай застосовують порошки із середнім діаметром $10 \div 50$ мкм. На властивості покриття впливає монодисперсність порошоків. Застосування порошоків з великим розкидом розмірів часток погіршує умови формування покриття і його фізико-механічні властивості [2].

Відома технологія одержання порошку міді з брухту мідних провідників струму, що складається з операцій: гідрогеномісткий відпал при температурі $700 \div 750^\circ \text{C}$, дроблення на волокна, аеросепарація для видалення залишків ізоляції, подрібнення очищених волокон в порошок у млині, відновлювальний відпал у тому ж середовищі при температурі $350 \div 400^\circ \text{C}$, розсів на фракції [6]. У воднемісткому середовищі відновлюються оксиди міді, ізоляція розкладається і обвуглюється, а мідь стає крихкою в результаті розвитку «водневої хвороби» [9]. Після відпалу і дроблення частинки ізоляції легко відділяються від поверхні волокон, і видаляються аеросепарацією. Очищені волокна довжиною $0,5 \div 30$ мм розмелюють в порошок і, для зняття наклепу, відпалюють в захисно-відновному середовищі. Регулюючи час обробки волокон у млині можна отримати порошок з різним розміром частинок. Недолік порошку, отриманого за даною технологією, полягає у високому

вмісті водню, який може бути видалений шляхом вакуумної обробки порошку з одночасним нагріванням. У технічній літературі немає інформації про властивості покриттів з порошку міді, отриманого з брухту мідних провідників струму.

Формулювання мети. Метою даної роботи є апробація технологічного прийому нанесення ФОП детонаційним напиленням з різною твердістю ділянок на основі мідного порошку, отриманого з брухту мідних провідників струму.

Результати досліджень. Порошок міді для нанесення ФОП отримували з брухту провідників струму за відомою технологією [6]. Для зниження вмісту водню в отриманому порошковому матеріалі його відпалювали у вакуумі при температурі $350 \div 370$ °C і тиску 10^{-1} Па. При таких характеристиках відпалу відбувається видалення водню з частинок порошку і зняття в них напружень. Підвищення температури вище зазначеної призводить до спікання частинок порошку і утворення губки, яку необхідно розмелювати. При більш низьких температурах не забезпечується інтенсивне видалення водню. Якість дегазації порошку знижується при тиску менше 10^{-1} Па.

Для оцінки впливу відпалу у вакуумі порошку до відпалу та після відпалу пресували циліндричні зразки діаметром 20 мм і висотою 15 мм, які спікаються в середовищі синтез-газу по режиму, рекомендованого в роботі [10]. Контроль розмірів і густини зразків показав, що при початковій густині зразків $7,32 \text{ г/см}^3$ зразки, не піддані відпалу, виросли на 4,15 %, тоді як відпалюють зразки мали усадку 11,9 %, що свідчить про низький вміст водню.

Після відпалу порошок розсіювали на 3- і фракції, орієнтуючись на ГОСТ 28377-89, з розмірами частинок, мкм : 15 - 45; 20 - 63 ; 100 - 140, і визначали форму частинок порошку за ГОСТ 25849-83. Для порівняння на порошок фракції 100 - 140 мкм, що серійно випускається промисловістю, мідному електролітичному порошку марки ПМС -В ГОСТ 4960 - 2009 проводили вимірювання мікротвердості. Результати досліджень наведено в табл. 1.

Таблиця 1.

Властивості мідних порошоків

Розмір часток, мкм	Форма частинок	Мікротвердість, МПа
Електролітичний ПМС-В ГОСТ 4960-75	Дендритна	200÷412
З брухту провідників струму, фракція 100 – 140	Близька до сферичної, частина осколкова 215 ÷ 389	215÷389
З брухту провідників струму, фракція 20 – 63	Осколкова, частина округла	-
З брухту провідників струму, фракція 15 – 45	Осколкова	-

Розкид результатів вимірювання мікротвердості пояснюється наявністю внутрішніх пір в частинках і крайовими ефектами в разі потрапляння часток щодо невеликої товщини. Вимірювання мікротвердості частинок з розмірами менше 63 мкм не проводили у зв'язку з відсутністю можливості таких вимірювань.

Зовнішній вигляд частинок мідного порошку, отриманого з брухту провідників струму, зображений на рис. 1.

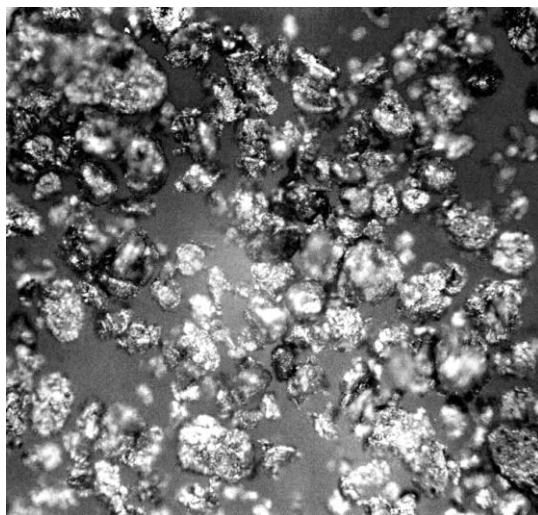


Рис. 1. Зовнішній вигляд частинок порошку міді, отриманого з відходів брухту провідників струму, $\times 90$

Покриття наносили на установці DEPLA -5 з використанням насадки квадратного перетину, встановленої на відкритому кінці ствола детонаційної установки. Обрана схема нанесення ділянок ФОР показана на рис. 2. Товщина шарів ФОР у всіх випадках становила 100 ± 15 мкм. Глибину завантаження задавали різною для ділянок 1 (L1 - 500 мм), і для ділянок 2 (L2 - 800 мм), залишаючи при цьому інші параметри режимів нанесення покриття без змін. Для напilenня зразків послідовно використовували порошок міді з розмірами частинок, мкм : 15 - 45; 20 - 63 ; 100 - 140. Покриття наносили на однотипні зразки прямокутної форми із сталі 45 з розмірами квадратних осередків 18×18 мм під ділянки 1 і 2.

1	2	1	2	1
2	1	2	1	2
1	2	1	2	1
2	1	2	1	2

Рис. 2. Схема нанесення ділянок покриття.
Глибина завантаження, мм: L1 – 500, L2 – 800.

Мікротвердість на зразках ділянок покриття визначали на приладі ПМТ-3 у відповідності з ГОСТ 9450-76. На кожній ділянці робили по 50 вимірювань, розраховували середнє значення величини мікротвердості за формулою (1) і середньоквадратичне відхилення мікротвердості за формулою (2), що дозволяє оцінити розкид даних відносно їх середнього. Розподіл значень вважали нормальним.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \quad (1)$$

$$\sigma_x = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}}{n}, \quad (2)$$

де n - кількість дослідів.

Визначення мікротвердості і розрахунок середньоквадратичного відхилення мікротвердості показали наступне. В результаті напилення мікротвердість міді підвищується. При середній мікротвердості мідного порошку в початковому стані 302 МПа після напилення при глибині завантаження L2 - 800 мм і розмірі частинок 20 - 63 мкм її величина досягає 821 МПа, що свідчить про значну деформацію частинок порошку і зростання внутрішніх напружень в нанесеному покритті [11]. Максимальну мікротвердість при обох глибинах завантаження мали шари ФОП, нанесені з використанням частинок порошку міді фракції 20 - 63 мкм, мінімальну - при напиленні порошку з фракцією 15 - 45 мкм (табл. 2 ; рис. 3). При всіх розмірах часток порошку велику твердість мали ділянки покриття, отримані при більшій глибині завантаження.

Таблиця 2.

Вплив розмірів часток і глибини завантажень мікротвердість нанесених шарів

Розмір часток порошку у фракції, мкм	Глибина загрузки – L1 (500 мм)		Глибина загрузки – L2 (800 мм)	
	$\bar{x}$,	σ_x	$\bar{x}$,	σ_x
15 – 45	453	22	484	19
20 – 63	787	20	821	15
100 – 140	601	26	689	18

Формування структури і властивостей покриття відбувається в результаті удару нагрітих частинок порошку об поверхню підкладки або формованого шару покриття, і, в тому числі, залежать від релаксаційного характеру процесу деформації частинок порошкового матеріалу. У цілому, властивості детонаційних покриттів визначаються сукупність багатьох факторів, з числа яких можна виділити масу і температуру нагрівання напилюваних частинок і їх швидкість у момент удару об напилювану поверхню [1, 2]. З підвищенням швидкості напилюваних частинок порошку в момент зіткнення в зоні формування шару покриття зростає температура і тиск, що призводить до збільшення деформаційних властивостей частинок, і, залежно від твердості оброблюваної поверхні, до підвищення міцності і твердості формованого шару. Крім цього, більш висока температура нагріву частинок порошку підвищує їх здатність до пластичної деформації, в результаті чого при формуванні покриття зростає його щільність і, як наслідок, збільшується твердість покриття. З іншого боку, при перегріві частинок вище оптимальної температури, твердість може знижуватися, а при недостатньому нагріванні (нижче температури рекристалізації) знижується пластична деформація, в результаті чого також знижується твердість покриття. Високотемпературний нагрів частинок порошку сприяє утворенню оксидної плівки між частинками, що підвищує твердість формованого покриття [12].

Отримані дані пояснюються тим, що в сукупності мали місце параметри процесу детонаційного напилення та фізико-механічних властивостей порошкового матеріалу і підкладки, гранулометричним складом порошку. Зокрема, частки порошку фракції 15 - 45 мкм при напиленні мають велику температуру нагрівання і більш високу швидкість польоту, по відношенню до частинок порошку фракції 20 - 63 мкм і фракції 100 - 140 мкм, але мають недостатню масу, тому характеристики твердості покриттів, нанесених порошком фракції 20 - 63 мкм і фракції 100 - 140 мкм, більш високі. Характеристики твердості покриття, нанесеного порошком фракції 100 - 140 мкм, мають менші значення, ніж аналогічні покриття для порошку фракції 20 - 63 мкм. Це пояснюється тим, що частинки порошку великих розмірів через свою масу нагріваються на більш низьку температуру і мають меншу швидкість польоту. Менша швидкість польоту і температура нагріву таких частинок погіршує деформаційні процеси у останніх при їх зіткненні з поверхнею, на якій формується покриття.

Співвідношення характеристик швидкості, температури нагріву, маси частинок та інших складових факторів, визначають кінцеві фізико - механічні параметри відповідних ділянок покриття. На зміну величини твердості покриття для порошку будь-яких розмірів, як показали результати дослідження, істотно впливає глибина завантаження порошку.

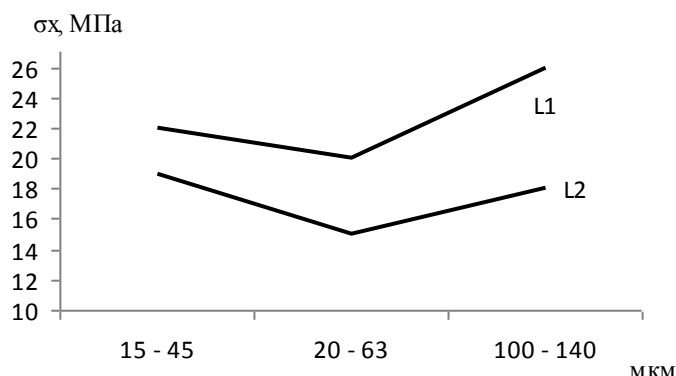


Рис.3. Вплив розміру частинок і глибини завантажень мікротвердість ділянок покриття. Глибина завантаження, мм: L1 – 500, L2 – 800.

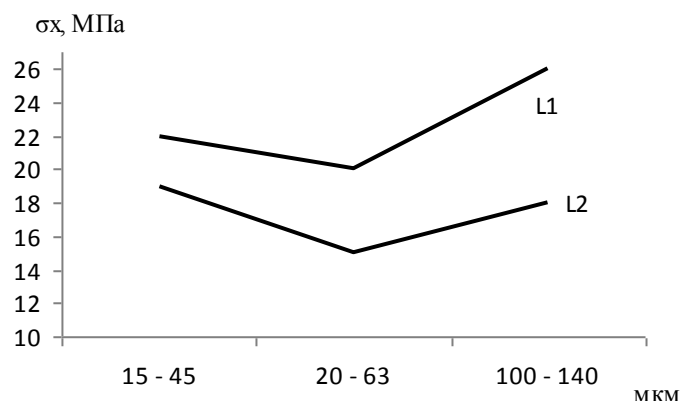


Рис.4. Середньоквадратичне відхилення мікротвердості на ділянках покриття залежно від глибини завантаження, мм, L1 – 500, L2 – 800.

Найменший розкид мікротвердості мали ділянки покриття, отримані з мідного порошку з розмірами частинок 15 - 45 мкм (табл. 2, рис. 4). Це пов'язано з більшою однорідністю розмірів часток в цій фракції. Найбільший розкид мікротвердості мали ділянки покриття, отримані з мідного порошку з розмірами частинок 100 - 140 мкм. Такі результати можна пояснити чинником меншою однорідністю розмірів часток у цій фракції у порівнянні з однорідністю розмірів часток фракції порошку 15 - 45 мкм.

ВИСНОВКИ. Управління параметрами процесу формування детонаційних покриттів в процесі напilenня порошкового матеріалу дозволяє регулювати твердість окремих ділянок ФОП в широких межах, що в якості технологічного прийому може бути використано для оптимізації фізико-механічних умов формування відповідних ділянок ФОДП.

Для вивчення і використання функціональності фізико-механічних характеристик ФОП залежно від зміни різних параметрів детонаційного напilenня необхідний ширший комплекс досліджень.

1. Бартенев С.С. Детонационные покрытия в машиностроении / Бартенев С.С., Федько Ю.П., Григоров А.И. – Л.: Машиностроение, 1982. – 216 с.
2. Михайлов А.Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий. – Донецк: ДонНТУ, 2009. – 346 с.
3. Исследование особенностей функционально-ориентированных детонационно-газовых покрытий / Михайлов А.Н., Петров А.М., Головятинская В.В., Петров М.Г. // Международный сборник научных трудов. Прогрессивные технологии и системы машиностроения, выпуск 1,2 (45). – Донецк: ДонНТУ, 2013. – С. 181-186.
4. Технологические перспективы нанесения металлополимерных покрытий / Михайлов А.Н., Петров А.М., Головятинская В.В., Петров М.Г. // Международный сборник научных трудов. Прогрессивные технологии и системы машиностроения, выпуск 1,2 (46). – Донецк: ДонНТУ, 2013. – С. 206-211.
5. Функционально-ориентированные детонационные покрытия / Михайлов А.Н., Петров М.Г., Головятинская В.В., Белошапка Д.В. // Практика и перспективы развития партнерства в сфере высшей школы: Материалы четырнадцатого международного научно-практического семинара. – Донецк: ДонНТУ, ЮФУ, 2013, Т.3. – С. 143-147.
6. Спосіб одержання порошку міді: Пат. №64966 А Україна, МПК 7 B22 F9/02. С.С. Раєв, Л.О. Рябічева, А.Т. Циркін, Ю.М. Никитін (Україна), - №200304283; Заявлено 01.04.03; Опубл.15.03.04; Бюл. - № 3 – 6 с.
7. Поляк М.С. Технология упрочнения: в 2 т. / Поляк М.С. – М.: Л.В.М. «СКРИПТ». Машиностроение, 1995, т. 1 – 832 с, т. 2 – 688 с.
8. Проблема технологических остаточных напряжений в повышении качества детонационных покрытий / М.А. Фараджаллах, В.Е. Панарин, С.С. Бысь. // Технічні науки. Вісник Хмельницького національного університету №2 '2011.- С.14 – 16.
9. Водородная болезнь спеченной меди / Дымченко В.А., Попович А.П. // Порошковая металлургия.- 1983.- № 5.- С. 25-28.
10. Цыркин А.Т. Исследование влияния некоторых факторов на процесс спекания порошковой меди / Цыркин А.Т., Плахотная С.П. // Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні: 3б. Наук. Пр. – Луганськ: Вид-цтво СНУ, 2006. С. 113-117.
11. Дель Г.Д. Определение напряжений в пластической области по распределению твердости / Дель Г.Д. - М.: Машиностроение, 1971.- 199 с.
12. Новиков И.И. Теория термической обработки металлов / Новиков И.И. - М.: Металлургия, 1986. -480 с.