УДК 621.793.7

О.М. Михайлов*, В.В. Головятинська, А.М. Петров, М.Г. Петров
* Донецький національний технічний університет,
Луганська філія кафедри технології машинобудування ДонНТУ

ФОРМУВАННЯ ДЕТОНАЦІЙНИМ НАПИЛЕННЯМ ПІДШАРІВ МІЖ ПІДКЛАДКОЮ І ПОКРИТТЯМ ДЕТАЛІ

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

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.

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 спектра 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 багатьох чинників і параметрів процесу, зокрема 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 Al2O3, TiO2) на поверхню деталі (підкладку) з високою твердістю властивості покриття істотно знижуються через зменшення адгезії покриттів [1]. У цьому разі підвищення адгезії покриттів може бути забезпечене за рахунок формування на напиленій поверхні деталі проміжного шару (підшару) з матеріалів, що мають нижчу твердість і вищу пластичність, наприклад, міді та її сплавів. Наявність у такому підшарі окремих ділянок з різною твердістю також може бути використана для нормалізації напружень у зонах взаємодії відповідно підкладка – підшар, підшар – покриття. За своєю технологічною сутністю такий підшар являтиме собою функціонально-орієнтований підшар (ФОП).

Технічні можливості способу ДНП дають можливість отримувати функціонально-орієнтовані детонаційні покриття (ФОДП), що мають ширший експлуатаційний спектр по відношенню до детонаційних покриттів, поверхневий шар яких сформований з однорідних матеріалів [3–5]. За технологічної реалізації нанесення ФОДП з порошкових матеріалів з різною твердістю також може існувати доцільність нанесення ФОП з ділянками, які мають різну твердість, що дасть можливість оптимізувати співвідношення твердості відповідних ділянок ФОП і твердості порошкових матеріалів, що використовуються для формування ФОДП.

Для напилення підшару на підкладку з високою твердістю може бути використаний електролітичний мідний порошок за ГОСТ 4960-2009. Однак властивості такого порошку можуть не задовольнити вимоги щодо зміни твердості окремих ділянок ФОП під час нанесення ФОДП. Тому цікавим є застосування для отримання ФОП мідного порошку, що має ширший спектр фізико-механічних характеристик, включаючи оптимізацію форми частинок порошку у процесі його

виготовлення, наприклад, отриманий переробкою брухту провідників струму [6]. Це дасть змогу розширити діапазон фізико-механічних властивостей ділянок ФОП за технологічної реалізації його нанесення детонаційним напиленням.

Аналіз останніх досліджень. У процесі детонаційного напилення відбувається імпульсне нагрівання 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 у результаті згоряння суміші робочих газів [1, 2]. Під час зіткнення 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 сформованого покриття і між собою.

При напиленні у зоні контакту виникають імпульсні тиски, що перевищують 100×108 Па [7]. У результаті у напилюваному матеріалі відбувається значна пластична деформація, підвищується міцність і твердість, виникають залишкові напруження, що створюють великий вплив на властивості покриття [8]. Формування структури і властивостей покриття являє собою складний процес. Твердість покриттів і величина залишкових напружень у 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 багатьма чинниками. Зокрема вони залежать від товщини покриття, величини імпульсу тиску, що виникає в зоні зіткнення частинок і оброблюваної поверхні деталі або ділянки покриття, який визначається фізичними властивостями контактних матеріалів і швидкістю зіткнення, що змінюється, а 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 у потоці продуктів детонації і відповідну інтенсифікацію їх нагрівання, що, своєю чергою, впливає на характер пластичної деформації частинок і локальну температуру у зоні формування відповідної ділянки покриття.

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

Відома технологія одержання порошку міді з брухту мідних провідників струму, що складається з операцій: гідрогеноміcткий відпал за температури 700 ÷ 750° С, дроблення на волокна, аеросепарація для видалення залишків ізоляції, подрібнення очищених волокон у порошок у млині, відновлювальний відпал у тому самому середовищі за температури 350 ÷ 400° С, розсіювання 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 завдовжки 0,5 ÷ 30 мм розмелюють в порошок і для зняття наклепу відпалюють у захисно-відновному середовищі. Регулюючи час оброблення волокон у млині, можна отримати порошок з різним розміром частинок. Недолік порошку, отриманого за цією технологією, полягає у високому вмісті водню, який може бути видалений вакуумним обробленням порошку з одночасним нагріванням. У технічній літературі немає інформації про властивості покриттів з порошку міді, отриманого з брухту мідних провідників струму.

Формулювання мети. Мета роботи – апробувати технологічний прийом 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 за температури 350 ÷ 370 °С і тиску – 10^{-1} Па. За таких характеристик відпалу відбувається видалення водню з частинок порошку і зняття у них напружень. Підвищення температури вище від зазначеної призводить до спікання частинок порошку і утворення губки, яку необхідно розмелювати. За нижчих температур не забезпечується інтенсивне видалення водню. Якість дегазації порошку знижується за тиску, меншого за 10^{-1} Па.

Для оцінки впливу відпалу у вакуумі порошку до відпалу та після відпалу пресували циліндричні зразки діаметром 20 мм і заввишки 15 мм, які спікаються у середовищі синтез-газу за режимом, рекомендованим у [10]. Контроль розмірів і густини зразків показав, що за початкової густини зразків 7,32 г/см^3 зразки, не піддані відпалу, виросли на 4,15 %, тоді як відпалені зразки мали усадку 11,9 %, що свідчить про низький вміст водню.

Після відпалу порошок розсіювали на три 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 порошку фракції 100 – 140 мкм, що серійно випускається промисловістю, мідному електролітичному порошку марки ПМС-В за ГОСТ 4960 - 2009 проводили вимірювання мікротвердості. Результати досліджень наведено у табл. 1.

Таблиця 1

Властивості мідних порошків

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

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

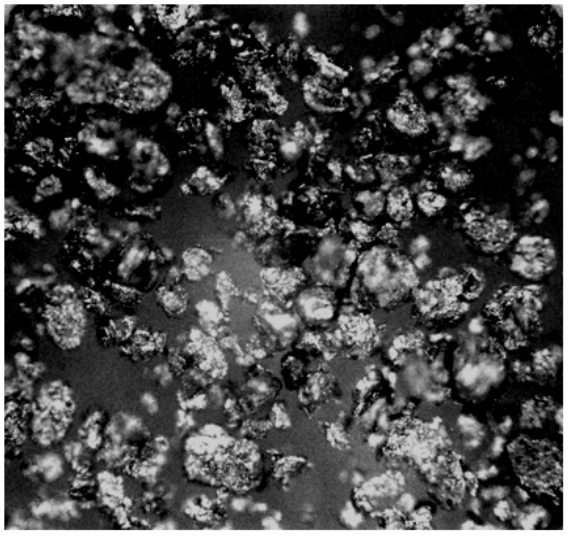

Рис. 1. Зовнішній вигляд частинок порошку міді, отриманого з відходів брухту провідників струму, ×90

Розкид результатів вимірювання мікротвердості пояснюється наявністю внутрішніх пор у частинках і крайовими ефектами у разі потрапляння частинок невеликої товщини. Вимірювання мікротвердості частинок з розмірами, меншими за 63 мкм, не проводили через відсутність можливості таких вимірювань.

Покриття наносили на установці DEPLA -5 з використанням насадки квадратного перетину, встановленої на відкритому кінці ствола детонаційної установки. Вибрану схему нанесення ділянок ФОП показано на рис. 2. Товщина шарів ФОП в усіх 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 напилення 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.

Мікротвердість на зразках ділянок покриття визначали на приладі ПМТ-3 відповідно до ГОСТ 9450-76. На кожній дільниці робили по 50 вимірювань, розраховували середнє значення величини мікротвердості за (1) і средньоквадратичне відхилення мікротвердості – за (2), що дає змогу оцінити розкид даних стосовно їх середнього значення. Розподіл значень вважали нормальним:

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

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

де n – кількість дослідів.

Визначення мікротвердості і розрахунок середньоквадратичного відхилення мікротвердості показали, що в результаті напилення мікротвердість міді підвищується. За середньої мікротвердості мідного порошку у початковому стані – 302 Мпа, після напилення за глибини завантаження L2 – 800 мм і розміру частинок – 20 – 63 мкм її величина досягає 821 МПа, що свідчить про значну деформацію частинок порошку і зростання внутрішніх напружень у нанесеному покритті [11]. Максимальну мікротвердість за обох глибин завантаження мали шари ФОП, нанесені з використанням частинок порошку міді фракції 20 – 63 мкм, мінімальну – за напилення порошку з фракцією 15–45 мкм (табл. 2; рис. 3). За усіх розмірів частинок порошку більшу твердість мали ділянки покриття, отримані за більшої глибини завантаження.

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

Формування структури і властивостей покриття відбувається у результаті удару нагрітих частинок порошку об поверхню підкладки або формованого шару покриття, що залежать від релаксаційного характеру процесу деформації частинок порошкового матеріалу. Загалом властивості детонаційних покриттів визначаються сукупністю багатьох чинників, з 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 у 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 того, вища температура нагрівання частинок порошку підвищує їхню здатність до пластичної деформації, в результаті чого під час формування покриття зростає його щільність і, як наслідок, збільшується твердість покриття. З іншого боку, за перегріву частинок вище від оптимальної температури твердість може знижуватися, а за недостатнього нагрівання (нижче від температури рекристалізації) знижується пластична деформація, в результаті чого також знижується твердість покриття. Високотемпературне нагрівання частинок порошку сприяє утворенню оксидної плівки між частинками, що підвищує твердість формованого покриття [12].

Таблиця 2

Вплив розмірів частинок і глибини завантажень на мікротвердість нанесених шарів

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

Отримані дані пояснюються тим, що в сукупності існували параметри процесу детонаційного напилення та фізико-механічних властивостей порошкового матеріалу і підкладки за гранулометричного складу порошку. Зокрема, частки порошку фракції 15–45 мкм під час напилення мають високу температуру нагрівання і вищу швидкість польоту по відношенню до частинок порошку фракції 20 – 63 мкм і 100–140 мкм, але мають недостатню масу, тому характеристики твердості покриттів, нанесених порошком фракції 20 – 63 мкм і фракції 100 – 140 мкм, вищі. 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 за нижчої температури і мають меншу швидкість польоту. Менша швидкість польоту і температура нагрівання таких частинок погіршує деформаційні процеси в останніх під час їх зіткнення з поверхнею, на якій формується покриття.

Співвідношення характеристик швидкості, температури нагрівання, маси частинок та інших складових чинників 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.

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 частинок у цій фракції. Найбільший розкид мікротвердості мали ділянки покриття, отримані з мідного порошку з розмірами частинок 100 – 140 мкм. Такі результати можна пояснити меншою однорідністю розмірів частинок у цій фракції порівняно з однорідністю розмірів частинок фракції порошку 15 – 45 мкм.

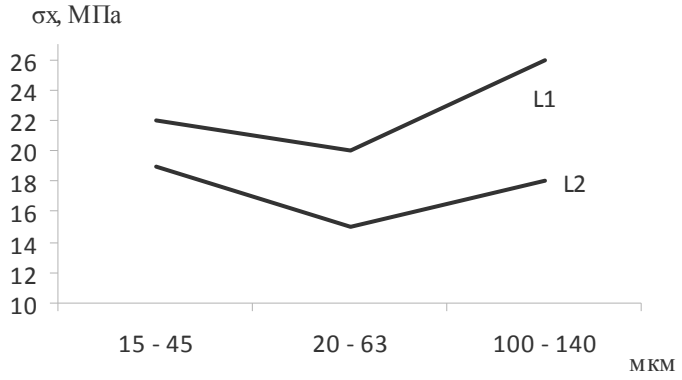

Рис. 3. Вплив розміру частинок і глибини завантажень на мікротвердість ділянок покриття. Глибина завантаження, мм: L1 – 500, L2 – 800

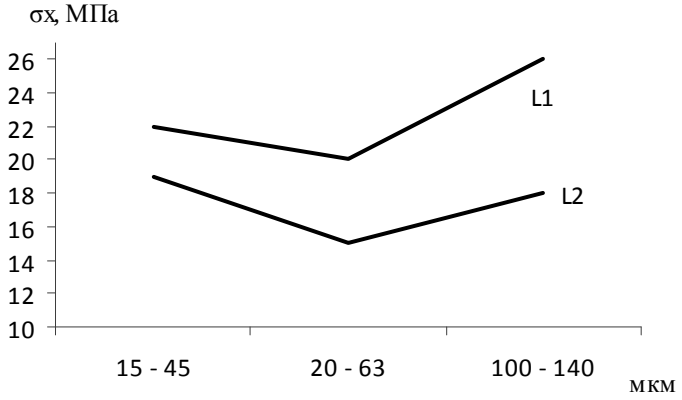

Рис. 4. Середньоквадратичне відхилення мікротвердості на ділянках покриття залежно від глибини завантаження, мм: L1 – 500, L2 – 800

Висновки. Регулювання параметрами процесу формування детонаційних покриттів у процесі напилення порошкового матеріалу дає змогу управляти твердістю окремих ділянок ФОП у широких межах, що як технологічний прийом може бути використаний для оптимізації фізико-механічних умов формування відповідних ділянок ФОДП.

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

1. Бартенев С.С. Детонационные покрытия в машиностроении / С.С. Бартенев, Ю.П. Федько, А.И. Григоров. – 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 / А.Н. Михайлов, А.М. Петров, В.В. Головятинская, М.Г. Петров // Междунар. сб. науч. тр. "Прогрессивные технологии и системы машиностроения". – Донецк: ДонНТУ, 2013. – Вып. 1,2 (45). – С. 181–186. 4. Технологические перспективы нанесения металлополимерных покрытий / А.Н. Михайлов, А.М. Петров, В.В. Головятинская, М.Г. Петров // Междунар. сб. науч. тр. "Прогрессивные технологии и системы машиностроения" – Донецк: ДонНТУ, 2013. – Вып. 1,2 (46). – С. 206–211. 5. Функционально-ориентированные детонационные покрытия / А.Н. Михайлов, М.Г. Петров, В.В. Головятинская, Д.В. Белошапка // Практика и перспективы развития партнерства в сфере высшей школы: Матер. 14-го Междунар. науч.-практ. 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. Нікітін (Україна). – №200304283; Заявлено 01.04.03;

Опубл. 15.03.04; Бюл. – № 3. – 6 с. 7. Поляк М.С. Технология упрочнения: в 2 т. / М.С. Поляк. – 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 // Вісник Хмельницького національного університету: "Технічні науки". – 2011. – №2. – С.14 – 16. 9. Водородная болезнь спеченной меди / В.А. Дымченко, А.П. Попович // Порошковая металлургия. – 1983. – № 5. – С. 25–28. 10. Цыркин А.Т. Исследование влияния некоторых факторов на процесс спекания порошковой меди / А.Т. Цыркин, С.П. Плахотная // Ресурсозберігаючі технології виробництва та оброблення тиском матеріалів у машинобудуванні: зб. наук. пр. – Луганськ: Вид-во СНУ, 2006. – С. 113–117. 11. Дель Г.Д. Определение напряжений в пластической области по распределению твердости / Г.Д. Дель. – М.: Машиностроение, 1971. – 199 с. 12. Новиков И.И. Теория термической обработки металлов / И.И. Новиков. – М.: Металлургия, 1986. – 480 с.

УДК 621.81.001.66(075.8)

М.І. Пилипець, В.В. Васильків
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

ОСОБЛИВОСТІ ПРОЕКТУВАННЯ ТА ВИГОТОВЛЕННЯ ШИРОКОСМУГОВИХ ВАЛЬЦЬОВАНИХ ГВИНТОВИХ ЗАГОТОВОК

© Пилипець М.І., Васильків В.В., 2013

Запропоновано методику розрахунку конструктивних параметрів неперервно-секторних заготовок, які використовуються для виготовлення широкосмугових гвинтових заготовок методом вальцювання. Наведено результати дослідження впливу геометричних параметрів неперервно-секторних заготовок, температури їх нагрівання, змащувальних матеріалів та параметрів інструментів на енергосилові показники процесу формоутворення та конструктивні параметри гвинтових заготовок.

Ключові слова: гвинтова заготовка, вальцювання, неперервно-секторна заготовка.

Method for calculating the design parameters of sector-continuous blanks used for the manufacture of wideband screw blanks by rolling was proposed. The results of the investigation of the influence of geometrical parameters of sector-continuous blanks, temperature of heating, lubricants and tool options for energy-power characteristics of the process of shaping and design parameters of screw flights were described.

Key words: screw flight, rolling, sector-continuous blank.

У сучасних транспортно-технологічних системах широко використовують деталі типу шнеків, які одержують із вальцьованих широкосмугових гвинтових заготовок (ШГЗ). Виготовлення таких заготовок відзначається значною різноманітністю технологічних операцій, схем та способів формоутворення з листового і сортового прокату. Однак оримання спіралей з коефіцієнтом нерівномірності витягування понад 3,0…3,2 фактично неможливе. Це зумовлено втратою стійкості широких смуг у процесі їх асиметричного обтискання між валиками. Одним із раціональних способів отримання ГЗ зі значним коефіцієнтом нерівномірності витягування і відповідно з малим діаметром внутрішньої крайки витка є вальцювання смуг, у яких з боку внутрішньої крайки витка виконані трикутні вирізи. Дослідженням