

УДК 621.793:620.197.3(045)

ОСОБЛИВОСТІ ПІДГОТОВКИ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ ДЛЯ НАНЕСЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ПОКРИТТІВ

О. П. Левківський, д-р техн. наук, проф.

Національний транспортний університет

levkovskyy@ukr.net

Розглянуто процеси взаємодії між покриттями та основою залежно від характеристик основи деталі з урахуванням параметрів внутрішнього тертя на границі розподілу.

Ключові слова: покриття; деталь; внутрішнє тертя; наноструктури.

The processes of interaction between the coating and the substrate depending on the characteristics of the detail basis and taking into account the parameters of internal friction at the interface have been considered.

Keywords: coating; detail; internal friction; nanostructures.

Постановка проблеми

Нанесення функціональних покриттів є одним з багатьох завершальних процесів обробки поверхні, що можуть задовольнити вимоги декоративного та функціонального застосування. Воно збільшує час використання деталей машин та покращує експлуатаційні характеристики матеріалів та виробів на їх основі в умовах різного оточення. Нанесення покриттів дає можливість отримати необхідні жаростійкість, зносостійкість, коефіцієнт тертя і інші характеристики, а також скоротити витрату дефіцитних і дорогих металів, що використовуються для підвищення експлуатаційної стійкості деталей.

Нанесення покриття і процеси підготовки поверхні, як правило, серійні операції, для яких підбираються оптимальні режими з метою досягнення бажаних властивостей поверхні, при цьому об'єм покриття і поверхню будь-якої деталі варто завжди розглядати як єдину систему.

Питання розробки конструкції деталі з покриттям, проектування технологічного процесу виготовлення або відновлення такої деталі, а також створення самого покриття певної структури і властивостей повинні бути взаємозалежні. При цьому визначальне значення для рівня працездатності складного покриття має характер зв'язків між окремими компонентами покриття, а також між покриттям і основою деталі. У будь-якому випадку перед нанесенням покриття проводиться попередня підготовка поверхні деталі [1].

Розміри деталей і конструкцій, на яких створюються покриття, вимірюються від часток мікрона до декількох кілометрів. Важливим чинником, що визначає можливість нанесення суцільного покриття по всій поверхні, є форма підкладки.

За складністю форми поверхні, на яких створюється покриття, поділяються на елементарні, ускладнені, складені і складної конфігурації (рис. 1).

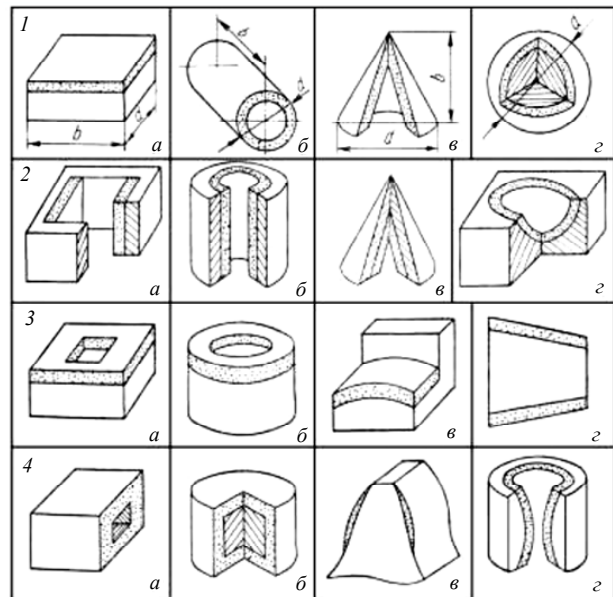


Рис. 1. Класифікація форм поверхні, що покривається

До елементарних відносяться плоскі (рис. 1, а), циліндричні (рис. 1, б), конічні (рис. 1, в) і кулясті (рис. 1, г) поверхні.

Елементарні поверхні, у свою чергу, поділяються на зовнішні (1) і внутрішні (2). До ускладнених належать поверхні, що мають незначне відхилення від елементарної поверхні (3, в, г) або з розривами в елементарній поверхні (3, а, б). Складні поверхні мають дві або більше елементарні поверхні (4, а, б). До поверхонь складної форми відносяться гіперболічні, параболічні і т.п. (4, в), а також ті, які не описуються якою-небудь закономірністю (4, г).

Матеріал основи впливає на вибір способу створення покриття. У свою чергу, матеріал покриття і спосіб його створення впливають на вибір матеріалу основи. Як вихідний матеріал основи використовують метал, кераміку, пластмасу, графіт, тканини і композиційні матеріали.

Для забезпечення умов сумісності компонентів необхідно на границі їх взаємодії досягти міцності зв'язку, близького до когезійної міцності покриття, без істотної деградації вихідних характеристик властивостей компонентів.

Аналіз попередніх досліджень

Підготовка поверхні підкладки, відсутність на ній домішок і чистота реагентів, а також їх склад — найважливіші з чинників.

Остаточна обробка поверхні проводиться перед нанесенням покриття і входить у всі технологічні процеси. При процесах нанесення масивних покриттів, де і матеріалом, що покривається і покриваючий, є досить товсті листи (наприклад, при вибуховому плакуванні), потрібна така обробка їх поверхні, яка забезпечувала б взаємне зчеплення твердих тіл по границі розділу.

Адгезія покриття залежить від міцності зв'язку з підкладкою і від мікроструктури межі розділу. Зв'язок може бути хімічним, вандерваальсовим і (або) електростатичним.

Найсильніший зв'язок — хімічна (енергія зв'язку декілька електронвольт), сили Ван-дер-Ваальса пов'язані з поляризацією, а електростатичний зв'язок зумовлений утворенням подвійного шару (0,1–0,4 еВ). Енергія зв'язку 0,2 еВ повинна забезпечувати міцність адгезії до $5 \cdot 10^8$ Па; порушення адгезії часто відбувається унаслідок появи в покриттях внутрішньої напруги, що перевищують це значення, і розвитку мікроструктури з тріщинами. Для здобуття якісних покриттів на сталі необхідно забезпечити змочування її поверхні [2].

Межі розділу між підкладкою і покриттям класифікуються як різкі, з утворенням проміжних з'єднань (наприклад, інтерметалідів), дифузійні (для утворення яких потрібна взаємна розчинність компонентів), псевдодифузійні, такі, що утворюються при одночасному осадженні декількох елементів. Границі розділу, що є з'єднаннями, можуть бути крихкими, і тому їх товщина має бути мінімальною.

Для створення дифузійних границь використовують нанесення проміжного шару, розчинного в матеріалі підкладки і покриття.

Наявність різких границь розділу ослабляє сили Ван-дер-Ваальса. Якщо щільність зародків покриття на поверхні підкладки мала, то їх бічне зростання призводить до появи пір на границі розділу і погіршення адгезії внаслідок зменшення площі контакту покриття з підкладкою і полегшення поширення тріщин.

Хороша адгезія часто зумовлена взаємною дифузиею компонентів.

Легко окиснювальні метали часто мають хороше зчеплення зі склом і керамікою, і попе-

редне очищення поверхні підкладки розпиляти не потрібне. Внаслідок цього такі метали, як Ti, Cr, Nb, Ta і W, застосовуються як проміжні шари при нанесенні покриттів Si, Ag і Au на скло або кераміку [1].

Формування зони переходу супроводжується, у свою чергу, зміною енергетичного стану поверхневих та глибинних шарів основи.

Процес формування покриття є короткочасним, проте протягом цього часу поверхня основи набуває властивостей, які згодом впливають на поведінку системи при експлуатації.

Аналіз цих явищ показує, що вони роблять істотний, а часом вирішальний внесок у деформацію та руйнування твердих тіл, що перебувають під впливом силових і температурних полів.

Дослідження змін на границі розділу покриття–основа

Система покриття–основа при незмінних зовнішніх умовах знаходиться у стані термодинамічної рівноваги. Якщо змінити зовнішні умови, наприклад, миттєво зменшити величину зовнішнього силового поля (механічного, магнітного, електричного, температурного) чи термодинамічних параметрів температури, тиску чи концентрації, то новій рівновазі відповідатиме деякий інший — релаксаційний стан системи, що відрізняється від вихідного і залежить від величини зміни та характеру силового поля.

Складність реальних механізмів релаксації створює проблеми для їх вивчення як із теоретичної, так і з експериментальної точок зору.

Однак вид релаксаційних процесів залежить також від характеру зміни зовнішніх силових полів. Як правило, виділяють періодичний характер зміни силового поля, коли величина силового поля гармонічно змінюється з часом із деякою частотою $\omega = 2\pi\nu$, де ν — лінійна частота.

Мірою внутрішнього тертя під час дії зовнішніх силових полів можуть бути різні величини. Найчастіше використовуваною характеристикою внутрішнього тертя є величина коефіцієнта поглинання Ψ :

$$\Psi = \frac{\Delta W}{W}, \quad (1)$$

де

$$\Delta W = \frac{2\pi}{\omega} \int (\sigma \varepsilon) dv \quad (2)$$

енергія, що розсіюється за один період у всьому об'ємі зразка,

$$W = \frac{1}{2} \int \sigma_0 \varepsilon_0 dv \quad (3)$$

енергія коливань усього зразка, що відповідає амплітудним значенням σ напруження і ε деформації.

За аналогією з термінами, що використовуються в електродинаміці, вводиться поняття механічної добротності системи, яку визначають як

$$Q = 2\pi \frac{W}{\Delta W} = \frac{2\pi}{\Psi}. \quad (4)$$

Маючи на увазі останню частину співвідношення, багато авторів користуються величиною Q^{-1} , яка обернена добротності, тобто

$$Q^{-1} = \frac{\Delta W}{2\pi W} = \frac{\Psi}{2\pi}. \quad (5)$$

Коефіцієнт поглинання Ψ можна отримати за розгорткою вільних затухаючих коливань зразка. Таким чином

$$\Psi = \int_t^{t+T} \frac{dW}{W}. \quad (6)$$

Нехай W пропорційна квадрату амплітуди деформації $\varepsilon_0^2(t)$, $\varepsilon_0(t)$ — обвідна кривої вільних затухаючих коливань, тоді

$$\Psi = 2 \int \frac{d\varepsilon_0(t)}{\varepsilon_0(t)} = 2 \ln \left[\frac{\varepsilon_0(t)}{\varepsilon_0(t+T)} \right] = 2 \ln \left(\frac{\varepsilon_n}{\varepsilon_{n+1}} \right) = 2\delta, \quad (7)$$

де $\delta = \ln \frac{\varepsilon_n}{\varepsilon_{n+1}}$ — логарифмічний декремент затухання.

Отже, між Ψ та δ існує просте співвідношення:

$$\Psi = 2\delta. \quad (8)$$

Воно справедливе для будь-яких амплітуд деформацій і не залежить від механізму розсіювання енергії. За міру внутрішнього тертя при вимушених коливаннях можна взяти величину

$$B = \frac{\sqrt{3}}{2\pi\Psi}. \quad (9)$$

Тоді

$$Q^{-1} = \frac{\Delta W}{2\pi W} = \frac{\Psi}{2\pi} = \frac{\delta}{\pi} = \frac{B}{\sqrt{3}}. \quad (10)$$

При відносно невеликому поглинанні

$$\operatorname{tg}\varphi = Q^{-1}, \quad (11)$$

де φ — кут зсуву фаз між напруженням та деформацією.

Використовуючи співвідношення (10) та (11), можна порівнювати між собою дані внутрішнього тертя, отримані в різних експериментах на різних частотах, де використані різні міри внутрішнього тертя, і в такий спосіб отримати максимально доступний спектр поглинання пружної енергії для даного матеріалу.

У загальному випадку при зміні внутрішнього тертя напружений стан по перетину зразка нерівномірний і досягає більших значень в його приповерхневих шарах, де сколювальні напруження при крученні максимальні. Внесок у поглинання енергії шарів, прилеглих до поверхні, може виявитися переважаючою порівняно з усім об'ємом матеріалу.

При нагріванні покриття стає більш пластичним і зумовлює підвищений ефект. Як видно з

рис. 2, нанесення покриття приводить до сильного затухання енергії.

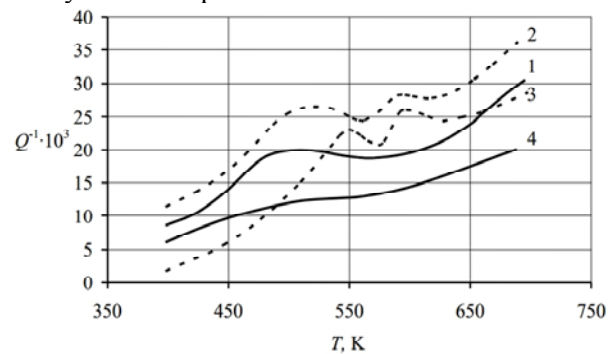


Рис. 2. Температурні залежності внутрішнього тертя зразків заліза (1) з Mo покриттям: 2 — після напильня; 3, 4 — після напильня та відпалу протягом 2 год при 1023 К, 1373 К відповідно

Водночас наявність сторонніх атомів на поверхні основного матеріалу змінює динаміку дислокацій у границі розділу. В цьому випадку створюються сприятливі умови для спрацьовування в поверхневих шарах нових джерел дислокацій через підвищену концентрацію напружень. В остаточному підсумку зростання загасання енергії при вимірюванні температурної залежності внутрішнього тертя заліза з плазмовим молибденовим покриттям можна пов'язати зі зростанням щільності рухливих гвинтових дислокацій, що гетерогенно зароджуються в поверхневих шарах.

Можливими причинами виникнення високотемпературного піка при 883 К є релаксація напружень і зсувоутворення на границі покриття-основа. Матриця (залізо) зазнає лише механічних напружень з сторони шару. При цьому зазначені напруження можуть досягати більших значень залежно від різниці параметрів кристалічних ґраток матриці і покриття. Очевидно, релаксація саме цих напружень на границі шар-матриця і приводить до появи другого, більш високотемпературного піка [2]. Напруження зсуву в певних випадках можуть релаксувати, оскільки міжфазна границя має певну в'язкість. Однак наявність різних фаз у приповерхневих шарах, а також часток покриття обмежує зсувоутворення в зоні контакту. Зовнішні напруження можуть релаксувати тільки частково і на кривій температурної залежності внутрішнього тертя з'являється новий пік поглинання енергії.

Наноструктури в системі покриття-основа

Останнім часом загальну увагу науковців усього світу привертають наноструктури. Оскільки поведінка окремих атомів і електронів наноструктур стає важливою, то на передній план виступають цікаві ефекти, здатні фунда-

ментально змінити властивості нанорозмірних порошкових матеріалів. Таким чином, наявність таких твердих нанорозмірних частинок у металевій матриці покриттів може значно покращити їх механічні і хімічні властивості, розширюючи можливості для їх застосування [3].

Для вдосконалення, наприклад, нікелевих покриттів та для підвищення їх експлуатаційних характеристик при збереженні їх основних переваг (магнітні властивості, висока адгезія, отримання покриттів на деталях складної конфігурації тощо) в Хмельницькому національному університеті МОН України спільно з Інститутом проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України були розроблені нікелеві покриття з додаванням нанорозмірних порошоків нітриду бора та нітридів кремнію і титану [4]. Однак відомо, що нанорозмірні порошки є досить складним об'єктом для використання через свою тенденцію до утворення конгломератів [5]. Тому знайти і зрозуміти загальні закономірності поведінки нанорозмірних композиційних покриттів, дослідити їх зносостійкість та порівняти її з поведінкою металу основи є дуже важливим завданням.

Висновки

Система покриття-основа є взаємозалежною. Отже, вибір функціонального покриття та способу його нанесення буде впливати не тільки експлуатаційні властивості деталі, але й на адгезійні властивості основи. Виходячи зі сказаного вище,

очевидною є актуальність дослідницької діяльності у сфері створення композиційних покриттів з використанням нанорозмірних структур з високим ступенем гомогенності, що дозволяють отримувати матеріали та вироби з високими зносостійкістю, корозійною стійкістю, жароміцністю, утомною міцністю, підвищеними оптичними та іншими властивостями.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Інженерія поверхні* / [К. А. Ющенко, Ю. С. Борисов, В. Д. Кузнецов, В. М. Корж]. — К. : Наук. думка, 2007. — 559 с.
2. *Солнцев С. С.* Защитные покрытия металлов при нагреве : справ. пособ.. Изд. 2-е, доп. / С. М. Солнцев. — ЛИБРОКОМ, 2009. — 248 с.
3. *Chen X. H., Cheng F. Q., Zhao S. L., Li D. Y.* Electrodeposited nickel composite containing carbon nanotubes, *Surf. Coat. Technol.* 155 (2002) 247.
4. *Сартинская Л. Л.* Композиционные электрохимические никелевые покрытия на основе наноразмерного нитрида бора / Л. Л. Сартинская, А. А. Покрышко, Е. М. Заварач [и др.] // Сб. статей «Современные проблемы физического материаловедения». — К. : ИПМ НАН Украины. 2007. — С. 52–54.
5. *Пат. 2426190* Российская Федерация, МПК H01L21/00 B82B3/00. Способ формирования наноразмерных структур / В. Г. Курявцев; заявитель патентообладатель Институт химии ДВО РАН. — № 2010108074/28; заявл. 04.03.2010; опубл. 10.08.2011, Бюл. № 22.

Стаття надійшла до редакції 24.02.2014