

ОСОБЛИВОСТІ ЗМІНИ ФОРМИ ГАЛЬВАНОПОРОШКОВИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ ПОКРИТТІВ ЗА УМОВ КОНТРОЛЬОВАНОГО МЕХАНІЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

Інститут проблем матеріалознавства ім.І.М.Францевича НАНУ

Вивчено еволюцію зміни форми і напружено - деформований стан гальванопорошкових композиційних покриттів в процесі їх контрольованого механічного навантаження по схемі трьохточкового вигину в трьох напрямках щодо напрямку зростання покриття: співпадаючому; протилежному і перпендикулярному. Виявлена залежність механічних властивостей покриттів від їх структури і напрямку навантаження. Виявлено явище аномально великої зворотної пружної зміни форми тонких покриттів при вигині в напрямках зростання і протилежному.

Проблема і постановка завдання. Композиційні покриття складають широкий клас матеріалів, які використовуються для поліпшення функціональних і конструкційних характеристик робочих поверхонь інженерних і технічних об'єктів. Існує багато методів нанесення і формування композиційних покриттів. Ефективним є створення металопорошкових композиційних електrolітичних покриттів (КЕП) зміцнених хіміко-термічною обробкою [1]. Один з багатьох прикладів комплексного використання КЕП – підвищення зносостійкості контактних поверхонь в парах ковзання при роботі в екстремальних критичних умовах обмеження кількості мастила, або без змащувальної речовини, високих температур, хімічної і корозійної агресивності і активності зовнішнього середовища. Тому питання вивчення механічної стійкості і міцності КЕП при їх функціонуванні під впливом зовнішніх навантажень є актуальними.

Складність вирішення цієї проблеми посилюється істотними недоліками КЕП, обумовленими виключно фізико-хімічними особливостями технології нанесення і консолідації покриттів. Це внутрішні залишкові напруги і наводнення, характерні для всіх гальванічних покриттів. Знак внутрішньої напруги залежить від співвідношення модулів пружності, параметрів кристалічних ґраток і величини крайового кута змочування підкладки і матриці. Особливо

несприятливим є поєднання наявності водневого окрихчування і розтягуючих залишкових напружень в матриці, що підвищує ризик прискороженого розтріскування і крихкого руйнування КЕП. Моменти нестабільності і втрати функціональних якостей покриття можна прогнозувати, знаючи граничні характеристики їх міцності (межі пружності, течії і тимчасової міцності - при руйнуванні). Ці критичні точки втрати механічної стійкості зразка на макроскопічному рівні можна коректно визначити при проведенні стандартних механічних випробувань [2]. Окрім того, КЕП мають складну структуру, оскільки містять жорсткі включення наповнювача в матриці, які є гетерогенними за своєю будовою і складом, що ускладнює аналіз процесів деформації і руйнування в гальванопорошкових покриттях. Зарощувані в матрицю тверді частинки другої фази можуть деформуватися пластично або руйнуватися тільки при дуже високому рівні зовнішньої напруги (що майже на порядок перевищує межу плинності матриці) [3]. Очевидно, існує пряма залежність рівня міцності і структурно-механічної стійкості композиційного комплексу «матриця + включення» від ступеня неоднорідності (гетерогенності) структури КЕП, співвідношення масової долі речовини матриці і концентрацій наповнювача, середніх розмірів включень другої фази або середньої відстані між ними. З'являється структурна складова в проблемі загальної механічної стійкості і міцності гальванопорошкових композиційних (ГПК) покриттів.

Механічні властивості КЕП вивчалися і раніше, в основному однобічно, локально – за допомогою відомих методів тестування і діагностики технічного стану поверхні і морфології об'єму покриттів. Як правило, це різноманітні варіанти статичного і динамічного макро- і мікроіндентування, а також ультразвукове зондування [4]. В той же час макроскопічні характеристики міцності і їх зв'язок з механічною і структурною стійкістю КЕП вивчені недостатньо детально. В зв'язку з цим **метою даної роботи** є: експериментально, в умовах активного безперервного контрольованого механічного навантаження, вивчити еволюцію зміни форми і визначити руйнуючу напругу КЕП (без підкладки) з різною структурою в трьох напрямках щодо напрямку їх зростання: співпадаючому, протилежному і перпендикулярному. Тестування відокремлених від підкладки покриттів, спрощує рішення поставленої задачі тим, що при інтерпретації результатів експерименту виключається вплив підкладки на

процес зміни форми покриття і може вказати шляхи підвищення їх структурно-механічної стійкості, ресурсу і функціональної довговічності в умовах дії руйнуючих навантажень.

Матеріали і методика проведення експерименту. Використовували призматичні зразки довжиною 22 мм. Гальванопорошкові покриття відділялись від підкладки, електроіскровим методом вирізувалися зразки (балки) заданих розмірів і випробовувались за умов активного безперервного контрольованого навантаження шляхом стандартних механічних випробувань по схемі триточкового вигину (з базою, рівною 16 мм) на малогабаритній випробувальній машині «Мікротест-01» [4]. Вигин балки відбувався в режимі активного безперервного розтягування за рахунок реверсивного переміщення зі швидкістю 0,25 мм/хв спеціального пристосування, що приєднується до рухомого тримача. Поточне значення зовнішнього навантажуючого зусилля у діапазоні від 0 до 500 Н відображалося на цифровому табло з точністю вимірювання 0,5 % і мінімальним реєстрованим зусиллям 1Н. Діаграма навантаження в координатах «навантаження – прогинання» записувалася на двох координатному самописному пристрої Н307.

Об'єктами дослідження були ГПК покриття, що наносяться на металеву (титанову) підкладку, низька адгезія до якої забезпечувала необхідну малу міцність зчеплення при нанесенні і дозволяла відокремити КЕП без пошкодження. Випробування проводили в умовах поєднання механічних випробувань (вигину) з системою технічного зору. Це дозволило в реальному часі проводити постійне візуальне спостереження за змінами поверхневого рельєфу вибраного поблизу середньої частини зразка. Розміри поля спостереження обирались відповідно до поставленого завдання шляхом підбору ступеня збільшення зображення в об'єктиві оптичного мікроскопа «ЛОМО МЕТАМ-Р1». У даній роботі цей майданчик огляду мав розміри 1,2×1,8 мм (при збільшенні 130× 140), де перший габарит є висотою кадру, а другий – його шириною.

Характер руйнувань досліджувався на скануючому мікроскопі Jeol Superprobe- 733.

Отримані результати і обговорення. В якості матриці і наповнювача використовували нікелеві КЕП, що містять мікро і нанорозмірні частинки порошку карбідів хрому. Усереднені дані змі-

ни форми від розмірів і вмісту твердих включень в КЕП вказані у табл. 1, де n – номер серії зразків (досліджувалось 6 серій), цифри 1, 2, 3 – позначають напрями прикладання навантажень співпадаючих, протилежних і перпендикулярних до напрямку зростання покриття відповідно.

Таблиця 1

Зміна форми зразків від розмірів і вмісту твердих включень в КЕП

| Вміст Ni, % | Вміст наповнювача, % | № положення | Прогин загальний, мм | Прогин пружний, мм | Деформація пружна, % | Напруження, МПа | Ефективний модуль пружності, ГПа |
|-------------|----------------------|-------------|----------------------|--------------------|----------------------|-----------------|----------------------------------|
| 79,5 | 20,0 | 1-1 | 2,04 | 2,04 | 14,55 | 573 | 3,94 |
| | | 1-2 | 2,95 | 2,95 | 21,02 | 531 | 2,53 |
| | | 1-3 | 0,17 | 0,02 | 0,15 | 113 | 75,54 |
| 78,15 | 21,57 | 2-1 | 1,28 | 1,28 | 9,12 | 444 | 4,87 |
| | | 2-2 | 1,13 | 1,13 | 8,05 | 788 | 9,79 |
| | | 2-3 | 0,23 | 0,13 | 0,9 | 256 | 28,76 |
| 90,7 | 9,3 | 3-1 | 1,69 | 1,69 | 12,04 | 510 | 4,24 |
| | | 3-2 | 1,77 | 1,77 | 12,61 | 659 | 5,23 |
| | | 3-3 | 0,26 | 0,13 | 0,9 | 645 | 72,47 |
| 99,0 | 0,85 | 4-1 | 1,63 | 1,63 | 11,61 | 449 | 3,87 |
| | | 4-2 | 1,71 | 1,71 | 12,18 | 107 | 0,88 |
| | | 4-3 | 0,21 | 0,1 | 0,74 | 171 | 23,11 |
| 97,1 | 2,0 0,8Fe | 5-1 | 0,75 | 0,58 | 4,16 | 102 | 2,45 |
| | | 5-2 | 0,63 | 0,5 | 3,56 | 217 | 6,1 |
| | | 5-3 | 0,25 | 0,16 | 1,14 | 162 | 14,21 |
| 87 | 13 | 6-1 | 1,89 | 0,21 | 1,48 | 287 | 19,39 |
| | | | | 1,68 | 11,97 | 80 | 0,67 |
| | | 6-2 | 0,23 | 0,23 | 1,6 | 200 | 12,50 |
| | | 6-3 | 0,54 | 0,1 | 0,71 | 145 | 20,42 |
| | | | | 0,05 | 0,35 | 221 | 61,39 |

Обрана силова схема вигину балки і організації деформаційно-силового процесу застосовується для створення направленої локалізації і полегшення візуалізації при вивченні руйнування за крихким типом (зародження і розповсюдження тріщини), що прак-

тично відразу приводить до локалізації деформації у вузькій області, прилеглий до формоутворювальної рухомої опори (ножа). Це має місце за навантаження зразків у поперечному напрямку. Аналіз отриманих експериментальних результатів вивчення зміни форми покриттів в процесі їх випробувань, звертає увагу на незвичність траєкторії зміни форми зразків тонких покриттів в напрямі дії сили, співпадаючому і протилежному напрямку росту покриття. Відомий феномен локалізації деформації за такої схеми навантаження, зазвичай, пов'язується (наприклад, при одноосному розтягуванні) з утворенням статичної шийки. Далі шийка стоншується і реалізується один з сценаріїв в'язко-крихкого руйнування [3]. Причому перехід до локалізації напруги здійснюється із стадії рівномірної пластичної деформації. У разі трьох точкового вигину цей перехід походить з пружної області. Локалізація напружень і деформацій свідчить про втрату механічної стійкості і початок пластичної деформації. Незалежно від величини стріли прогинання незворотні деформації мають місце лише в невеликій центральній частині зразка (його зовнішніх зон, безпосередньо прилеглих до ножа і протилежних йому). Великі прогинання апріорі зв'язуються з інтенсивною локалізацією деформації і подальшим деформаційним процесом виключно пластичного характеру, але ніяк не пружного. Незвичайною також є велика величина стріли прогинань і форма зігнутого зразка. Як відомо, при навантаженні по схемі три точкового вигину обернена пружна зміна форми відбувається по дузі, що спирається на дві нерухомі опори. При будь-якій величині стріли прогинання деформація і відповідний йому перенос маси забезпечується за рахунок рівномірної пружної об'ємної (розтягуючої) деформації всієї робочої (обмеженої базою вигину) частини зразка. На цю особливість пружної зміни форми, до недавнього часу, звертали недостатньо уваги, і вона вперше використовується авторами для визначення значень дійсних пружних деформацій і ефективних модулів пружності. Локалізація деформації і зовнішня (визначувана по зламу або спаду релаксації на діаграмі навантаження) пластифікація при випробуванні в напрямках зовнішньої дії, співпадаючих або протилежних напрямку зростання покриття (1 і 2) виявляється двічі в 5-й серії. Можна стверджувати, що має зворотній (псевдопружний) характер зміни форми тонких покриттів (КЕП), навантажених у напрямі зростання і протилежному. Така упевне-

ність заснована на ретельному спостереженні і вимірюванні геометричних параметрів форми (товщина і ширина) зразків до і після їх до руйнування. Відзначимо ідеальне зімкнення зруйнованих країв зламу балки, їх паралельність і незмінність розмірів зразків (товщини, ширини і довжини сумісних половинок).

У ряді експериментів зафіксовано прояв ефекту акустичної емісії в чутному (звуковому) діапазоні частот (добре помітне, характерне потріскування). Найбільш характерні злами приведені на рис. 1.

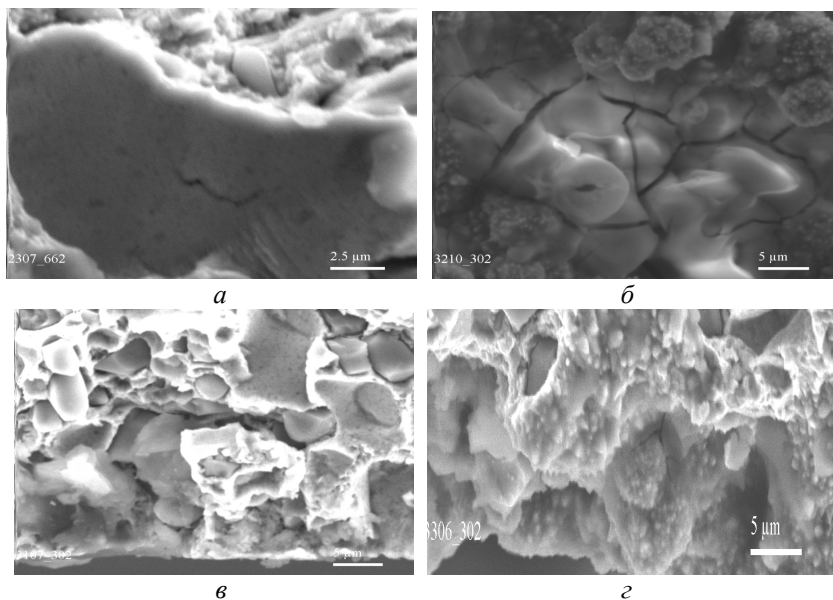


Рис 1. Фрагменти руйнування макро-, мікро- і нанопоповнених гальванопорошкових КЕП: *a* – макровклучення Cr_3C_2 , $\times 6600$; *b* – нікелевої матриці, $\times 3000$; *v* – мікровклучення Cr_3C_2 , $\times 3000$; *z* – нановклучення Cr_3C_2 , $\times 3000$

Остаточна думка про зворотність і пружний характер зміни форми для перших двох напрямів випробування може бути прийнята тільки після експериментів по розвантаженню, що необхідно зробити в майбутньому. Важлива сама форма діаграми навантаження навіть при її повній зворотності: збіг траєкторій прямого і зворотного ходу може вказати на перевагу виду пружної зміни фо-

рми, або, за наявності петлі гістерезису, - на в'язку, не пружню. Рівномірна, не локалізована по довжині зразка, зміна форми дає можливість точного визначення дійсної деформації за чисельними значеннями стріли прогинання. Максимально можлива зворотна пружна (або не пружна) деформація досягається при величині прогинання, рівній половині відстані між нерухомими опорами. При цьому, форма зразка нагадує частину кола з радіусом, рівним половині бази випробування.

Шляхом нескладних розрахунків (які не приводитимемо) знаходимо, що найбільша і досяжна деформація дорівнює 57 %. У припущенні дотримання постійної пропорції кривизни зміни форми і прогинання, визначено дійсні деформації випробуваних зразків. Результати отриманих даних величини стріли прогинання і дійсних деформацій наведені в таблиці 1. Проаналізуємо їх з погляду ступеня гетерогенності структури і співвідношення напружувача щодо напрямку зростання покриття.

При навантаженні в напрямках $(n-1)$ і $(n-2)$ зразки всіх шести серій, без виключення, продемонстрували аномально велику пружність. У перерахунку на дійсну деформацію вона для всіх випробуваних серій КЕП перевищувала відмітку в 4–5 %. Відомо, що в кращих пружинних сталях пружна деформація не перевищує 1 %, а в інших металах вона є на порядок меншою (0, 1 %). Незрозумілими виглядають зворотні деформації (пружні зсуви – дисторсії) в КЕП, що досягають значення 20 % (у зразку 1-ї серії – 1–2, отримане найбільше для даних експериментів значення деформації, рівне 21 %). У ряді випробувань мала місце анізотропія зміни форми залежно від напрямку навантаження для зразків з однієї серії. Найяскравіше вона виявилася в серії №6: пружна дійсна деформація у напрямі навантаження протилежному напрямку зростання покриття $(6-2)$ перевищує аналогічну величину у напрямі навантаження співпадаючому з напрямом зростання покриття $(6-1)$ майже на порядок. В інших серіях ця різниця (у інтервалі 10–30 %) була у бік перевищення значень пружних дисторсій в напрямі $(6-1)$ в порівнянні з напрямом $(6-1)$. У 4-й серії ця різниця на спостерігалась. Ступінь гетерогенності структури покриття також впливає на рівень стріли прогинання і відповідне йому значення пружного деформаційного рівномірного (не локалізованого) масопереносу. У чотирьох серіях випробуваних покриттів ГПК середній розмір зміцнюючих диспер-

сних частинок був мікронним (близько 7 мкм), а в двох – включення переважно нанорозмірні, окремі конгломерати з яких також не більше мікронних. Тому рівень неоднорідності структури покриттів можна було змінити, тільки міняючи співвідношення між їх кількістю (масовою концентрацією) наповнювача в матриці. Проте, при такій достатньо скупій вибірці складів покриттів досить чітко і однозначно простежується тенденція зниження деформаційних показників оберненої пружної зміни форми (наприклад, в 3-й серії) із зменшенням масової частки наповнювача по відношенню до матриці. Так, зниження змісту наповнювача (карбіду хрому) майже в два рази зменшує абсолютні (стріла прогинання) і відносні (дійсна пружна деформація) показники зміни форми приблизно на 30–35 %. Максимальна зміна форми спостерігалась при випробуванні зразка № 1 – 2. Йому відповідає структура КЕП, що містить 20 % частинок карбіду хрому, середній розмір яких складав 2–5 мкм. Зменшення вмісту наповнювача до 10 %, з тим же вмістом жорстких включень, диспергування структури покриття приводить до аналогічних результатів. Зразки з дрібними зміцнюючими нанорозмірними частинками руйнувалися при менших значеннях накопичених пружних деформаціях.

Висновки. Зміна форми зразків композиційних матрично наповнених покриттів суттєво залежить від виду, розміру і кількості нано-і мікро розмірних включень у гальванопорошкових покриттях, відділених від підкладки. Особливо відчутний вплив на характеристики деформацій і напружень в КЕП, виду навантаження, за умов випробування, що визначалися у напрямку співпадаючому з вектором їх росту, протилежному і поперечному. Показано, що вплив форми зразка і напрямку навантаження відрізняється у поперечному напрямку і в протилежному росту КЕП. Радіус кривизни поверхні вигнутої балки і величини стріли прогину максимальні, вони аномально зростають в напрямку протилежному росту покриття у порівнянні з напрямком зворотного і, особливо, поперечного згинання. Пояснення відмінностей у руйнуванні у співпадаючому і протилежному напрямках росту КЕП видів навантаження можна обґрунтувати розбіжностями у структурі епітаксiального шару, що прилягає до підкладки і незавершеної в процесі нанесення КЕП поверхні, а зростання крихкості у поперечному напрямку – зростанням на порядок товщини покриття, що заслуговує більш детального вивчення.

Список літератури

1. *Лучка М.В.* Износостойкие композиционные диффузионно легированные электролитические покрытия / М.В. Лучка, М.В. Киндрачук, П.И. Мельник та др. – К.: Техніка, 1993. – 143 с.
2. *Лучка М.В.* Гальванопорошкові покриття триботехнічного призначення / М.В. Лучка // Порошковая металлургия. – 2006. – № 9-10. – С. 22–30.
3. *Физические* свойства металлов и сплавов. 2 изд. / Б. Г. Лившиц., В.С. Крапошин, Я. Л. Липецкий // М.: Знание, 1980. – 246 с.
4. *Ярматов И.Т.* Особенности структурообразования в пластических материалах в условиях контролируемого нагружения / И.Т. Ярматов // Металлофизика и новейшие технологии. – 2009. – т. 31. – № 1. – 17–24.

Ярматов И. Т., Лучка М. В. **Особенности изменения формы гальванопорошковых композиционных покрытий в условиях контролируемой механической нагрузки** / Проблемы тертя та зношування: наук.-техн. зб. – К.: НАУ, 2011. – Вип. 56. – С. 211–219.

Изучена эволюция изменения формы и напряженно - деформированное состояние гальванопорошковых композиционных покрытий в процессе их контролируемого механического нагружения по схеме трехточечного изгиба в трех направлениях относительно направления роста покрытия: совпадающем; противоположном и перпендикулярном. Выявлена зависимость механических свойств покрытий от их структуры и направления нагрузки. Выявлено явление аномально большого обратного упругого изменения формы тонких покрытий при изгибе в направлениях роста и противоположном.

Рис.1, табл. 1, список лит. :4 наим.

Jarmatov I.T., Luchka M.V. **Features of changes in the shape of composite powder coatings in the process of controlled mechanical loading**

Studied evolution of a forming and tensely deformed state of a galvanic powder composition coatings in the process of their controlled mechanical loading on the chart of three-point bend in three directions in relation to direction of growth of coverage: consilient; opposite and perpendicular. Dependence of mechanical properties of coatings is exposed on their structure and direction of the loading. Found out the phenomenon anomalous large convertible elastic of the forming of the thin coatings at a bend in directions of growth and opposite.

Ключові слова: гальванопорошкові композиційні покриття, гетерогенність, структура, стріла прогину, деформація.

Стаття надійшла до редакції 31.10.2011