

РІЗАЛЬНИЙ ІНСТРУМЕНТ. ПРОЕКТУВАННЯ, ВИГОТОВЛЕННЯ, ЕКСПЛУАТАЦІЯ

УДК 621.9.02.004.6(048)

В.С. Антонюк, д.т.н., проф.

Національний технічний університет України "КПІ"

О.Б. Сорока, к.т.н., с.н.с.

Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МІЦНОСТІ ПОВЕРХОНЬ ІЗ ЗНОСОСТІЙКИМИ ПОКРИТТЯМИ

Розглядаються шляхи забезпечення міцності поверхні деталей та інструменту з покриттями. Показано, що цього можна досягти застосуванням покриттів дискретного типу із необхідними параметрами, вибір яких базується на аналізі типу покриття та умов експлуатації.

Вступ. Високий рівень якості продукції машинобудування, експлуатація якої характеризується підвищеним зносом інструментального виробництва, неможливо забезпечити без використання зносостійких покриттів. Основною проблемою застосування покриттів є їх руйнування, яке відбувається відповідно до двох основних механізмів: когезійним розтріскуванням та адгезійним відшаруванням покриття від основи. Порушення когезійної міцності (розтріскування) виникає як наслідок нормальних напружень у покритті від впливу зовнішнього навантаження, нагрівання деталі та додатних залишкових напружень. Адгезійне відшарування покриттів може відбуватись як нормальний відрив від основи або зсув покриття в зоні адгезійного контакту від дії зовнішнього навантаження та (або) залишкових напружень стиску. Обмежити величини нормальних напружень у покритті, дотичних в зоні адгезійного контакту, залишкових напружень можна за рахунок застосування покриттів дискретного типу [1].

Формування покриттів. Серед методів, які дозволяють формувати такі покриття, слід виділити метод електроіскрового легування та метод вакуум-плазмового напилення. Електроіскрове легування є доступним, дешевим та мобільним засобом формування зміцненого поверхневого шару, який базується на принципі Шарпі, згідно з яким для забезпечення високої несучої здатності шар робочої поверхні повинен мати пластичну основу з твердими включеннями.

Покриття такого типу є дискретними за самою своєю природою, а регулювання параметрів нанесення (напруга, струм) дає можливість отримувати ділянки різного розміру та з різною глибиною. Вакуум-плазмові покриття достатньо легко формуються, а високий ступінь керованості їхніми властивостями робить їх застосування масовим явищем як покриттів загального призначення для зниження тертя у фрикційних парах та підвищення зносостійкості різального і штампового інструмента. Спосіб нанесення таких покриттів дозволяє оптимізувати їх під конкретні умови експлуатації, а модернізація устаткування типу “Булат” із застосуванням спеціальних “масок” [2] надає можливість отримувати покриття дискретного типу із заданими параметрами.

Дискретизація покриття дозволяє вирішити такі питання:

– запобігти когезійному розтріскуванню покриття при навантаженні деталей згинальним моментом або зусиллями розтягу, які передаються покриттю через поверхню адгезійного контакту [3];

– знизити рівень еквівалентних напружень при контактно навантаженні за рахунок зменшення залишкових напружень стиску, притаманних вакуум-плазмовим покриттям [4];

– виключити адгезійне відшарування покриття внаслідок нормального відриву по краях ділянки при контактному навантаженні зосередженою силою [5], або в результаті втрати стійкості елементом покриття за умов повздовжнього гнуття, яке є наслідком залишкових напружень стиску;

– виключити ймовірність адгезійного відшарування шляхом зсуву в зоні адгезійного контакту від дії дотичних напружень, які виникають як при контактному навантаженні, так і в умовах навантаження деталі зусиллями розтягу або згину [6].

Метою даної роботи є викладення і узагальнення започаткованих досліджень [3–6] з вибору параметрів покриттів, які дозволяють забезпечити конструкційну міцність деталей та інструменту з покриттями дискретного типу.

Методика визначення параметрів покриттів. Запобігти когезійному розтріскуванню покриття можливо на основі принципу самоорганізації системи шляхом створення дискретного поверхневого шару ідентичного тому, який виникнув би при розтріскуванні в умовах навантаження основи розтягуючим зусиллям (рис. 1). Розмір дискретної ділянки покриття обмежували кроком тріщини – C_n .

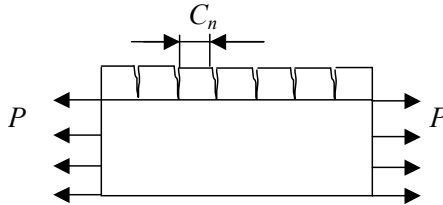


Рис. 1. Схема розтріскування покриття при навантаженні основи зусиллями розтягу – P

Максимально припустимий крок тріщини в покритті визначали як:

$$C_n = -\frac{1}{k} \ln \left(0,1 + \frac{\sigma_n^T + \sigma_n^{зан}}{\varepsilon_{кр} E_n} \cdot \left(1 + \frac{E_n h_n}{E_o H_o} \right) \right), \quad (1)$$

де $\varepsilon_{кр}$ – критична деформація основи, за перевищенням якої починається когезійне розтріскування; σ_n^T , $\sigma_n^{зан}$ – температурні та залишкові напруження в покритті; H_o – напівтовщина основи; h_n – товщина покриття; E_o , E_n – модулі пружності основи і покриття; k – коефіцієнт, який залежить від модулів пружності основи і покриття:

$$k^2 = 2 \frac{G_o G_n}{G_o h_n + G_n H_o} \left(\frac{1}{E_n h_n} + \frac{1}{E_o H_o} \right), \quad (2)$$

де G_n , G_o – модулі зсуву основи і покриття.

Максимальний приведений розмір ділянки дискретного покриття:

$$D_{max} \leq C_n. \quad (3)$$

Розглядаючи поверхню, зміцнену електроіскровим покриттям з твердого сплаву ВК8 ($E_n = 7,1 \cdot 10^5$ МПа), визначимо критичний розмір дискретної ділянки покриття згідно з формулою 1. На рис. 2 наведено залежності критичного розміру ділянки, отриманої методом електроіскрового легування, від товщини покриття для різних величин залишкових і температурних напружень, які є наслідком формування покриття та умов його експлуатації і критичної деформації основи зі сталі 40Х ($E_n = 2,1 \cdot 10^5$ МПа) від зовнішнього навантаження.

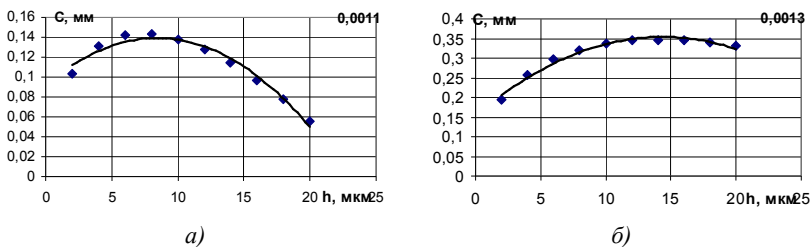


Рис. 2. Залежність розміру дискретної ділянки C_n від глибини покриття h при $\sigma_n^{зал} = 350$ МПа; $\sigma_n^T = 140-180$ МПа: $\varepsilon_{кр} = 0,11\%$ (а); $\varepsilon_{кр} = 0,13\%$ (б)

Таким чином, визначивши максимально припустимий крок тріщини в покритті, є можливість закласти розміри дискретної ділянки покриття з урахуванням експлуатаційних, залишкових напружень та напружень, що виникають від впливу температури, на етапі конструювання деталі з покриттям, що дозволить виключити когезійне розтріскування останнього.

При навантаженні зосередженою силою, коли треба виключити порушення адгезійної міцності внаслідок нормального відриву, дискретну ділянку розглядали як балку на пружній основі і, виходячи з цього, розв’язували задачу розрахунку прогину елемента покриття. При цьому елемент електроіскрового покриття (включення) можна розглядати як балку з жорстко затиснутими кінцями (рис. 3, а), а дискретну ділянку вакуум-плазмового покриття – як балку з вільними кінцями (рис. 3, б).

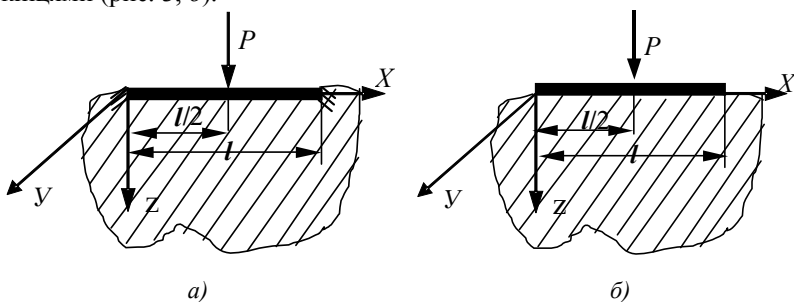


Рис. 3. Схема дискретної ділянки електроіскрового покриття (а) та вакуум-плазмового покриття (б) під дією навантаження зосередженою силою P

Для розв’язання задачі приймали гіпотезу Фуса-Вінклера про пропорційну залежність між реакцією і прогином балки $w(x)$ з коефіцієнтом пропорційності α , який дорівнює модулю пружності

основи. Тоді диференціальне рівняння пружної лінії для балки з постійною жорсткістю поперечного перерізу на згин має вигляд:

$$\frac{d^4 w(x)}{dx^4} + \frac{4}{L^4} w(x) = 0, \quad (4)$$

де $L = \sqrt[4]{\frac{4E_n I}{\alpha}}$; E_n – модуль пружності матеріалу покриття; I – момент інерції перерізу балки відносно осі Y .

Інтегруючи рівняння (4) за методом А.Н. Крилова [7] і розташували початок координат в крайній лівій точці ділянки, рівняння методу початкових параметрів для прогинів $w(x)$ ділянки покриття з урахуванням граничних умов через функції Крилова запишемо для електроіскрового покриття у вигляді:

$$w(x) = -\frac{1}{E_n I} \left\{ M_0 L^3 Y_3 \left(\frac{x}{L} \right) + Q_0 L^3 Y_4 \left(\frac{x}{L} \right) - L^3 P Y_4 \left(\frac{x - l/2}{L} \right) \right\}, \quad (5)$$

а для вакуум-плазмового – у вигляді:

$$w(x) = w_0 Y_1 \left(\frac{x}{L} \right) + \theta_0 Y_2 \left(\frac{x}{L} \right) + \frac{L^3}{E_n I} P Y_4 \left(\frac{x - l/2}{L} \right), \quad (6)$$

де M_0 і Q_0 – згинальний момент та перерізуюча сила в початку координат, w_0 , θ_0 – прогин та кут повороту в початку координат; Y_1 , Y_2 , Y_3 і Y_4 – функції А.Н. Крилова.

Для визначення параметрів електроіскрового покриття проводили розрахунки для твердого сплаву ВК8 ($E_n = 7,1 \cdot 10^5$ МПа), який нанесено на швидкорізальну сталь Р6М5 ($E_o = 2,2 \cdot 10^5$ МПа). Параметри вакуум-плазмового покриття визначали на прикладі розрахунку покриття TiN ($E_n = 4,4 \cdot 10^5$ МПа), який нанесено на титанову основу ВТ3-1 ($E_o = 1,1 \cdot 10^5$ МПа).

Аналіз отриманих результатів (рис. 4, 5) дозволяє зробити висновок, що існує співвідношення між довжиною (l) та товщиною (h) дискретної ділянки, нижче якого покриття по всій довжині під дією зосередженої сили P набуває додатного прогину: “вдавлюється” в основу, і адгезійне відшарування не відбувається. Для електроіскрового покриття ВК8 на Р6М5 це співвідношення становить $l \leq 7h$, а для TiN на титановому сплаві – $l \leq 3,5h$. Для довжини ділянки ВК8 – $l > 7h$ та ділянки TiN – $l > 3,5h$ спостерігаються зони з від’ємним прогином, для яких ймовірно є адгезійне відшарування покриття від основи.

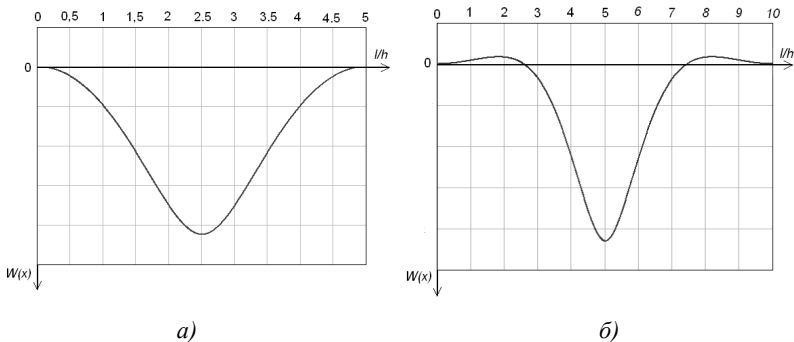


Рис. 4. Форми прогину дискретних ділянок покриття ВК8 з різним співвідношенням l/h під дією сили P , де $l/h = 5$ (а); $l/h = 10$ (б)

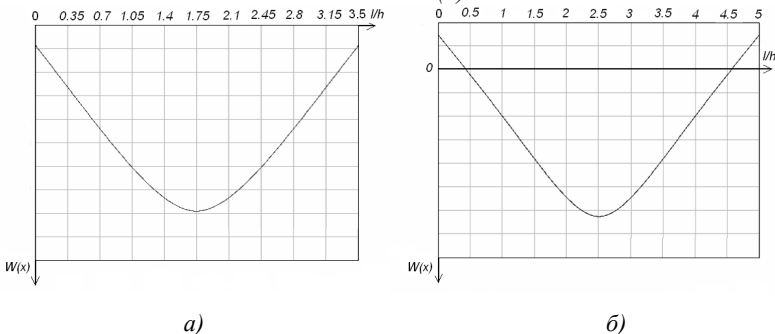


Рис. 5. Форми прогину дискретних ділянок покриття TiN з різним співвідношенням l/h під дією сили P , де $l/h = 3,5$ (а); $l/h = 5$ (б)

Застосування для розрахунку напружено-деформованого стану системи “основа-покриття” методу скінченних елементів дозволяє встановити залежність дотичних напружень на поверхні адгезійного контакту в умовах розподіленого контактного навантаження інтенсивністю q від розмірів дискретної ділянки D вакуум-плазмового покриття (рис. 6).

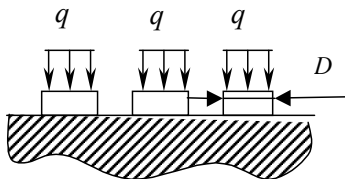


Рис. 6. Схема навантаження поверхні з покриттям дискретного типу розподіленим контактним навантаженням інтенсивністю q

Показано, що значення дотичного напруження на поверхні адгезійного контакту вакуум-плазмового покриття (Ti,Al)N з основою з твердого сплаву T15K6 спочатку збільшуються із зростанням дискретної ділянки, а потім, досягнувши максимуму, починають зменшуватись. Із збільшенням ділянки покриття максимум напружень заглиблюється в основу, і на поверхні адгезійного контакту величина напружень зменшується. Враховуючи, що збільшення розміру ділянки супроводжується зростанням залишкових напружень [4], а зменшення розміру ділянки наближає максимум напружень до поверхні контакту, оптимальні значення D знаходяться в межах 50–80 мкм при товщині 6–10 мкм (рис. 7).

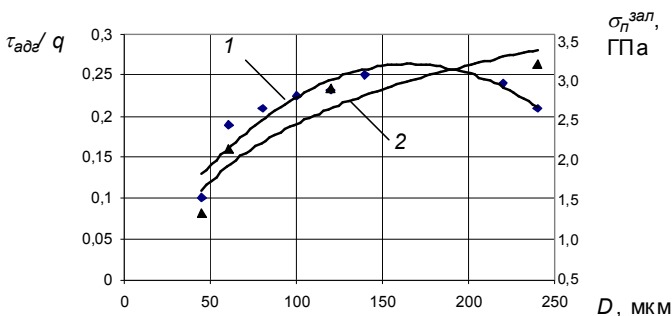


Рис. 7. Залежність дотичних напружень на поверхні адгезійного контакту (1) та залишкових напружень стиску (2) від розміру дискретної ділянки D

Висновки. Показано, що уникнути таких недоліків суцільних покриттів, як когезійне розтріскування та адгезійне відшарування і забезпечити міцність поверхні можна за рахунок заміни суцільного покриття дискретним. Визначити параметри дискретного покриття слід з урахуванням типу покриття та умов навантаження деталі або інструменту з покриттями:

- дослідження розтріскування електроіскрового покриття під дією зовнішнього силового та температурного навантаження, а також залишкових напружень дозволив визначити величину ділянки покриття, виходячи з розрахунку кроку тріщини;

- аналіз форми прогину ділянок електроіскрових та вакуум-плазмових покриттів при навантаженні зосередженою силою дозволив вибрати такі співвідношення параметрів покриттів, які виключають їх нормальний відрив від основи;

– отримані залежності дотичних напружень на поверхні адгезійного контакту при розподіленому контактному навантаженні та залишкових напружень від розмірів ділянки вакуум-плазмового покриття дозволили визначити параметри покриття, які запобігають порушенню контактної міцності та адгезійному відшаруванню покриття.

ЛІТЕРАТУРА:

1. *Ляшенко Б.А., Мовшович А.Я., Долматов А.И.* Упрочняющие покрытия дискретной структуры // Технологические системы. – 2001. – № 4 (10). – С. 17–25.
2. Патент України № 68303 МПК С23 С14/32. Спосіб нанесення зносостійких несущіх покриттів / В.А. Рутковський, В.С. Антонюк, В.М. Волкогон, Б.А. Ляшенко, О.С. Осипов, І.А. Петруша. – Заявлено 03.12.03. Опубл. 15.07.2004. – Бюл. № 7.
3. *Антонюк В.С., Ляшенко Б.А., Сорока Е.Б.* Выбор параметров покрытий дискретной структуры при модификации поверхности режущего инструмента // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2005. – № 3. – С. 49–50.
4. *Ляшенко Б.А., Антонюк В.С., Сорока Е.Б., Рутковський А.В.* О снижении остаточных напряжений в вакуум-плазменных покрытиях дискретной структуры // Сверхтвердые материалы. – 2005. – № 2. – С. 72–75.
5. *Антонюк В.С., Сорока О.Б., Панівко В.В.* Розрахунковий метод визначення параметрів зносостійкого покриття // Вісник СумДУ. – № 11 (83). – 2005. – С.13–18.
6. *Антонюк В.С., Сорока О.Б.* Архітектура зміцненої поверхні різального інструменту // Резание и инструмент в технологических системах: Межд. науч.-техн. сборник. – Харьков: НТУ “ХПИ”, 2006. – Вып. 70. – С. 16–31.
7. Справочник по сопротивлению материалов / Г.С. Писаренко, А.П. Яковлев, В.В. Матвеев / Отв. Ред. Г.С. Писаренко. – 2-е изд., перероб. и доп. – Киев: Наук. думка, 1988. – 736 с.

АНТОНЮК Віктор Степанович – доктор технічних наук, професор Національного технічного університету України "КПІ".

Наукові інтереси:

– технологічне забезпечення зносостійкості різального інструменту.

E-mail: vp@users.ntu-kpi.kiev.ua

СОРОКА Олена Борисівна – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник Інституту проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України.

Наукові інтереси:

– міцність деталей та елементів конструкцій з покриттями.

Подано 23.11.2006

