

РОЗРОБКА НОВИХ ЗНОСОСТІЙКИХ ПОКРИТТІВ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЕТАЛЕЙ МЕХАНІЗМІВ

Запропоновано комплексний підхід формування покриттів дискретної структури. Він базується на принципі забезпечення когезійної міцності покриття. Цей підхід дозволяє обирати параметри і розташування ділянок покриттів дискретної структури, що забезпечує зносостійкість деталей в реальних умовах експлуатації і підвищує їх надійність і довговічність.

Досвід експлуатації і результати численних досліджень свідчать про те, що в більшості випадків функціональні властивості і ресурс різних видів машин і обладнання, зокрема сільськогосподарського комплексу, визначаються інтенсивним зношуванням високонавантажених деталей вузлів тертя і робочих органів. Внаслідок експлуатації робочі органи сільськогосподарських машин зазнають високих динамічних навантажень, а також абразивно-хімічного впливу ґрунту і мають довговічність в 3-6 разів нижчу від інших вузлів і механізмів.

Різальний інструмент сільськогосподарського призначення внаслідок специфіки повинен мати певні властивості, які відрізняють його від інших різальних інструментів, що застосовуються при обробці металів та інших конструкційних матеріалів: різати м'які, волокнисті органічні матеріали з включенням твердих фракцій; не втрачати різальних властивостей при підвищеній вологості, в агресивному середовищі, від інтенсивного ударного навантаження. Крім того, різальний інструмент експлуатується в умовах високих швидкостей різання, від яких залежить продуктивність сільськогосподарських машин.

Аналіз робіт з використання сільськогосподарських механізмів дозволяє виділити наступні шляхи підвищення стійкості деталей цих механізмів: розробка і використання нових інструментальних матеріалів і конструкцій; використання різних засобів підвищення довговічності, в тому числі за рахунок використання зносостійких покриттів. Тому для підвищення ресурсу деталей і робочих органів сільськогосподарських машин, які схильні до інтенсивного абразивного зношування, були розроблені нові перспективні методи зміцнення, які ґрунтуються на створенні зносостійких дискретних композиційних покриттів [1]. Регулюючи склад покриття, геометрію, структуру і фізико-механічні властивості поверхневих шарів, можна забезпечити високу адгезійну і когезійну стійкість окремих ділянок захисного покриття. Такі покриття дозволяють підвищити працездатність робочих органів сільськогосподарських машин за рахунок забезпечення необхідних експлуатаційних показників і зниження напружень у покритті.

Метою даної роботи є вибір оптимальної конструкції покриття на робочих поверхнях деталей сільськогосподарського призначення для підвищення довговічності деталей при переробці сільськогосподарської продукції. Конструювання дискретного покриття здійснюється розрахунковим методом на базі математичної моделі, яка описує напружено-деформований стан в покритті. Ми пропонуємо обирати розмір дискретної ділянки, виходячи з розрахунку кроку тріщин за умов когезійного розтріскування. Відомо [2], що утворення тріщин в покритті (фрагментація) буде відбуватися доти, доки відстань між ними не досягне критичного значення. Після фрагментації шару покриття до критичних значень подальше розтріскування відбуватися не буде.

Руйнування покриття відбувається шляхом когезійного розтріскування під впливом нормальних напружень, що виникають в покритті внаслідок дії зовнішнього навантаження основи та нагрівання інструмента, а також залишкових нормальних напружень, які виникають в процесі нанесення покриття і зумовлені різницею коефіцієнтів лінійного розширення матеріалів покриття і основи та значною дефектністю покриття. Сумарна величина напружень в покритті:

$$\sigma_n^{екс} = \sigma_n^M + \sigma_n^T, \quad (1)$$

де σ_n^M - напруження в покритті від дії механічного навантаження; σ_n^T - напруження в покритті, що виникають під дією температурного градієнта.

Напруження від дії механічного навантаження визначаємо за формулою [3]:

$$\sigma_n^M = \frac{1}{h_n} \cdot \frac{\varepsilon_{кр}}{\left(\frac{1}{E_n h_n} + \frac{1}{E_o H_o}\right)} \cdot \left[1 - \frac{ch(ky)}{ch(kl)}\right], \quad (2)$$

де $\varepsilon_{кр}$ - критична деформація основи, за перевищенням якої починається когезійне розтріскування; $2H_o$, h_n - товщини основи і покриття, відповідно; E_o , E_n - модулі пружності основи і покриття; y - проміжна координата, $2l$ - базовий розмір; k - коефіцієнт, який залежить від модулів пружності основи і покриття:

$$k^2 = 2 \frac{G_o G_n}{G_o h_n + G_n H_o} \left(\frac{1}{E_n h_n} + \frac{1}{E_o H_o}\right), \quad (3)$$

де E_n , E_o - модулі пружності і G_n , G_o - зсуву основи і покриття, відповідно.

Окрім напружень від механічного навантаження, в покритті виникають залишкові напруження - $\sigma_n^{Тзал}$, зумовлені температурним градієнтом при нанесенні покриття та різницею між коефіцієнтами лінійного розширення матеріалів основи і покриття, а також експлуатаційні напруження - $\sigma_n^{Текс}$ від температури різання, які визначаємо як [4]:

$$\sigma_n^T = \sigma_n^{Текс} + \sigma_n^{Тзал}, \quad (4)$$

де $\sigma_n^{Тзал} = k \cdot E_n \cdot \Delta T^H (\alpha_{To} - \alpha_{Tn})$ - залишкові напруження; $\sigma_n^{Текс} = k \cdot E_n \cdot \Delta T^P (\alpha_{To} - \alpha_{Tn})$ напруження, які виникають при експлуатації; ΔT^H , ΔT^P - різниця температур при нанесенні та експлуатації (різанні), відповідно; α_{To} , α_{Tn} - температурний коефіцієнт лінійного розширення матеріалів основи і покриття, відповідно; k - коефіцієнт:

$$k = \frac{\lambda_o}{\lambda_n}, \quad (5)$$

де λ_o , λ_n - теплопровідність матеріалів основи і покриття, відповідно.

Оскільки приймаємо, що когезійна міцність покриття $\sigma^{коз} = \varepsilon_{кр} E_n$ в ньому розподілена за нормальним законом з стандартним відхиленням $0,1\sigma^{коз}$, то найбільш ймовірно тріщина може виникнути в перетині ($l-y$) при $\sigma_n^{еф} = 0,9\sigma^{коз}$.

Максимально припустимий крок тріщини в суцільному покритті:

$$C_n = -\frac{1}{k} \ln \left(0,1 + \frac{h_n \cdot \sigma^T}{\varepsilon_{кр}} \cdot \left(\frac{1}{E_n h_n} + \frac{1}{E_o H_o} \right) \right). \quad (7)$$

Максимальний приведений розмір ділянки дискретного покриття:

$$D_{max} \leq C_n. \quad (8)$$

Таким чином, є можливість закласти розміри дискретної ділянки покриття з урахуванням експлуатаційних, залишкових напружень та напружень, що виникають від впливу температури, на етапі конструювання різального інструменту з покриттям, що дозволить виключити когезійне розтріскування останнього.

Окрім розмірів дискретної ділянки, важливим геометричним параметром є щільність покриття ψ (відношення площі дискретних ділянок до загальної площі), яка визначає експлуатаційну надійність захисного шару. При цьому виникає задача визначення оптимальної площі дискретних ділянок покриття.

Проаналізуємо вплив контактного навантаження на поверхню деталі, що відповідає реальним умовам роботи різального інструменту сільськогосподарського призначення. Оскільки зношування різального інструменту здебільшого є залежним від напруження у поверхневому шарі, то, знаючи об'ємний вміст включень (щільність покриття - ψ), за якими спостерігаються найменші концентрації напруження, є можливість забезпечити оптимальну величину зношування робочої поверхні. Визначаючи і мінімізуючи коефіцієнти концентрації напружень як функції об'ємного вмісту включень, можна визначити оптимальну щільність.

Розглянемо міжфазову межу “основа – включення” в системі основа-покриття при формуванні елементів включень методом електроіскрового легування. На рис.1 схематично зображено ділянки включення в матеріал основи в об'ємі (а) і в площині поверхні (б), де P – сили, що прикладені нормально до площини контакту і однакові як в точці O_e – центрі включення, так і в точці O_o основи, рівновіддаленій від включень; точка K – довільна точка на міжфазовій межі включення - основа.

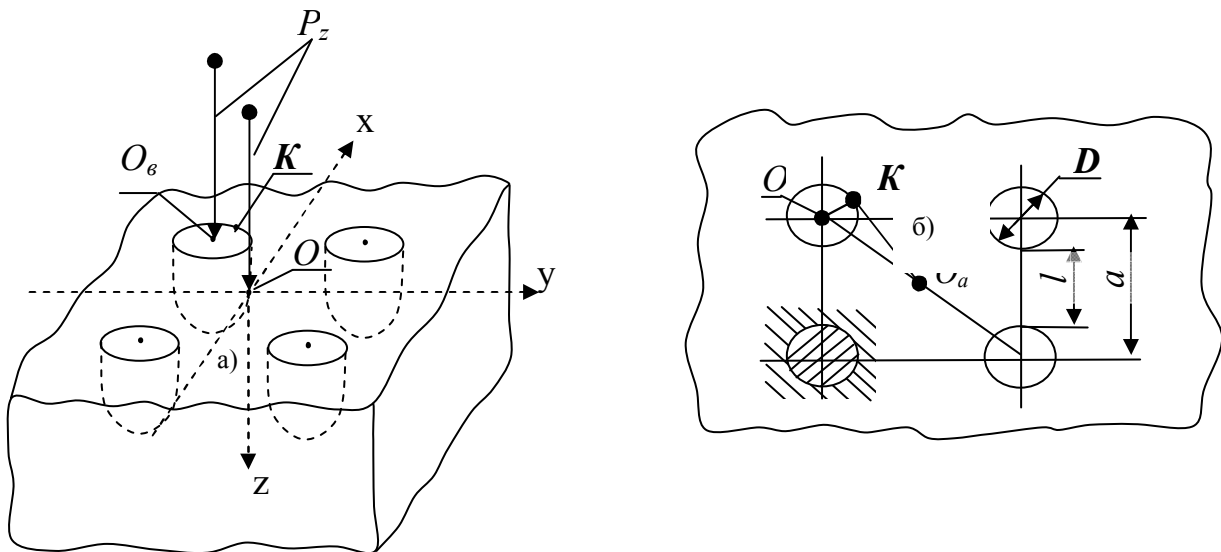


Рис.1. Схематичне зображення ділянки покриття в об'ємі (а) і в площині поверхні (б), де P – сили, що прикладені нормально до площинки контакту; O_e – центр включення; O_o – рівновіддалена від включення точка в основі; K – довільна точка на міжфазовій межі включення–основа; D - діаметр включення; l - відстань між найближчими точками включення; a – крок включень в основі

Припускаємо, що найбільша концентрація напружень на поверхні спостерігається в точках міжфазової межі матеріалу включення (рис. 2.). Під впливом зовнішньої сили на поверхню в точках міжфазової межі виникають внутрішні сили, модуль і напрямок яких змінюються в залежності від пружних властивостей компонентів і долі їх вмісту. В цій точці в зміну напруження вносить вклад як деформація стиску, що пов'язана з нормальним напруженням - σ_e , так і деформація чистого зсуву, яка пов'язана з дотичними напруженнями - τ_e .

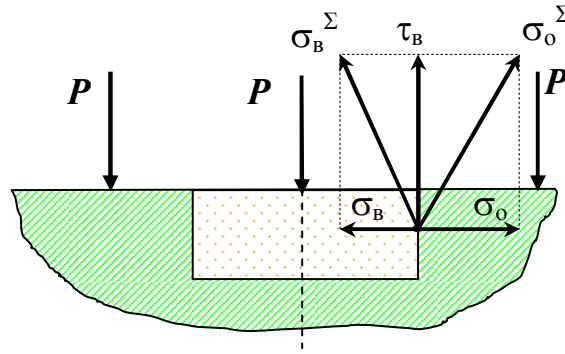


Рис. 2. Схема розподілу напружень в точці на межі включення – основа

Коефіцієнти концентрації напружень розтягу (стиску) - K_σ і повздовжнього зсуву - K_τ визначаються за формулами [5], які після перетворень з урахуванням граничних умов мають такий вигляд:

$$K_\sigma = \frac{\sigma}{\sigma_\epsilon} = \frac{4G_o(v_o - v_\epsilon)/E_1}{2 - V_o + V_\epsilon\chi_o + V_o \frac{G_o(\chi_\epsilon - 1)}{G_\epsilon}} \cdot \left\{ 1 - V_\epsilon + 3 \frac{\chi_o + 1}{\chi_o + \frac{G_o}{G_\epsilon}} \left[3 + 10 \left(\frac{V_\epsilon}{\pi} \right)^2 \right] \left(\frac{V_\epsilon}{\pi} \right)^2 \right\}; \quad (9)$$

$$K_\tau = \frac{\tau}{\tau_\epsilon} = 2 \frac{\frac{G_\epsilon}{G_o}}{V_o + (1 + V_\epsilon) \cdot \frac{G_\epsilon}{G_o}} \left\{ 1 + 4 \frac{\frac{G_\epsilon}{G_o} - 1}{\frac{G_\epsilon}{G_o} + 1} \cdot \left(\frac{V_\epsilon}{\pi} \right)^2 \cdot \left[3 + 7 \left(\frac{V_\epsilon}{\pi} \right)^2 \right] \right\}, \quad (10)$$

де σ, τ – нормальні локальні напруження та локальні напруження поздовжнього зсуву в покритті; $\sigma_\epsilon, \tau_\epsilon$ - сумарне напруження від стиску та сумарне напруження від зсуву на фазових границях компонентів “включення–основа”, відповідно; G_ϵ, G_o – модулі зсуву включення і основи, відповідно; v_ϵ, v_o – коефіцієнти Пуассона, відповідно; $\chi_\epsilon = (4 - 3v_\epsilon)$; $\chi_o = (4 - 3v_o)$; V_o, V_ϵ - відносний об’ємний вміст основи і включення, відповідно; $E_1 = V_\epsilon E_\epsilon + V_o E_o$; E_o, E_ϵ – модуль пружності першого роду матеріалу основи включення, відповідно.

Щільність покриття визначають з умови мінімального значення концентрації напружень. Відповідно визначають оптимальні частки об’ємного вмісту включень – V_v^{opt} . Об’ємний вміст включень, впливає, в основному, на концентрації напружень стиску (розтягу), викликаних дією нормальних сил, і мало впливає на концентрацію напружень зсуву, викликаних дією сил тертя.

Зв’язок об’ємного вмісту компонентів композиції і співвідношення їх площ на поверхні підпорядковується принципу Кавальєра [5]. Відповідно до цього принципу, відношення площ компонентів композиції в будь-якому перетині таке ж, як і в об’ємі.

Звідси об’ємна щільність включень $\psi_v = \frac{V_\epsilon}{V_o}$, де V_ϵ - об’ємний вміст дискретних включень, V_o – загальний об’єм шару матеріалу системи “основа-покриття” дорівнює щільності покриття $\psi = \frac{S_\epsilon}{S_o}$, де S_ϵ - площа поверхні з дискретними включеннями, а S_o - загальна площа матеріалу поверхні системи “основа-покриття”.

Оптимальна щільність, при якій маємо найменше значення концентрації напружень $\Psi_v^{opt} = \Psi^{opt}$. Знаючи загальну площу поверхні S_o , можна визначити площу включень $S_\epsilon = \Psi^{opt} \cdot S_o$.

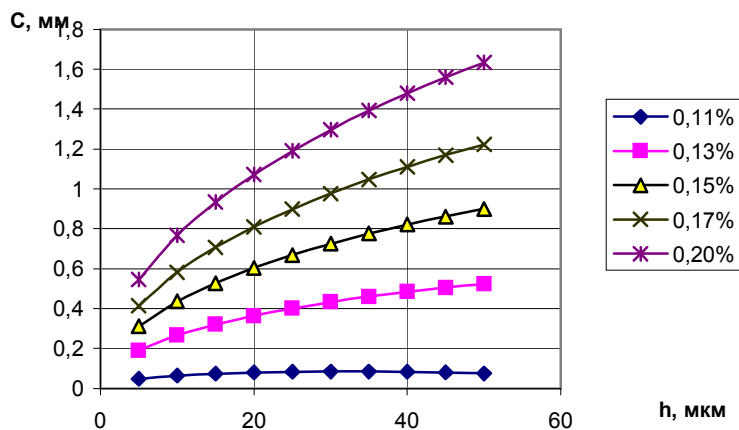
Крок включення $-a$ одержуємо з умови:

$$a = k_a \sqrt{\frac{\pi D_{max}^2}{4\Psi_{onm}}}, \quad (11)$$

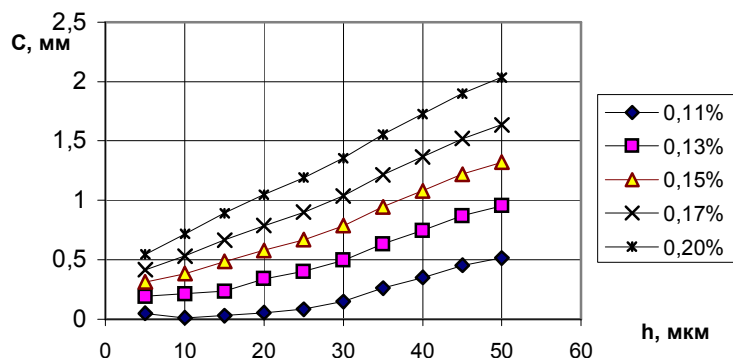
де k_a - корегуючий коефіцієнт; D_{max} визначається з формул (7, 8).

Для вирішення проблеми підвищення зносостійкості механізмів сільськогосподарської техніки розроблено комплексний підхід до створення і впровадження нових технологій і зносостійких покриттів, що принципово змінюють експлуатаційні властивості деталей, які лімітують ресурс роботи різних механічних систем. Ці технології дозволяють сконструювати поверхневий шар з високим опором руйнуванню робочих поверхонь.

Параметри шару зносостійкого покриття дискретної будови (щільність покриття, розмір дискретної ділянки та крок між ними) визначаємо на основі розробленої методики. Розрахунки, що виконано для ножів різання цукрового буряка, на яких формували шар зносостійкого покриття дискретної будови з твердого сплаву ВК8, дозволили визначити розміри дискретних ділянок покриття в залежності від глибини компонентів включення при напруженнях від температурного фактору, які дорівнюють $\sigma_n^T = 400-530$ МПа і при критичній деформації основи під дією зовнішнього навантаження $\varepsilon_{кр} = 0,11- 0,2$ % (рис. 3.)



а)



б)

Рис.3. Залежність розміру дискретної ділянки $C_n = D_{max}$ від глибини покриття h (мкм); а) - $\varepsilon_{кр} = 0,11- 0,2$ % $\sigma_n^T = 500$ МПа; б) $\varepsilon_{кр} = 0,13$ % $\sigma_n^T = 400-530$ МПа

Шар з визначеними параметрами можна сформувати методами електроіскрового легування. Покриття наносяться на модернізованому устаткуванні на базі ЕЛІТРОН-22.

З метою модифікації поверхні робочих органів сільськогосподарських машин використовували твердий сплав ВК-8 як електрод для формування інерметалідних включень в основу з легованої сталі 65Г, з якої виготовляються ножі для різання цукрового буряка.

Режими формування дискретних ділянок на робочих поверхнях ножів: величина струму – $I = 4 \dots 6$ А; напруга $V = 35 - 40$ В. Щільність дискретних ділянок складала від 50 до 55%. При цьому глибина дискретних компонентів включень досягала 0,2-0,3 мм.

Порівняльні випробування на зносостійкість зміцнених та незміцнених ножів, які були закріплені в один барабан бурякорізки. Експерименти здійснювали на устаткуванні бурякорізки, яка працювала в безперервному режимі зі швидкістю різання 7 м/с. Результати випробувань показали підвищення зносостійкості ножів з дискретними покриттями щодо незміцнених в 2 - 3 рази.

Висновок

Розроблено комплексний підхід формування дискретних покриттів, який дозволяє на стадії проектування закласти розміри і розташування ділянок покриття таким чином, щоб запобігти когезійному розтріскуванню і передчасному зношуванню в умовах експлуатації робочих органів сільськогосподарських машин.

Такий підхід забезпечує рівномірне зношування на ділянках, які відрізняються напружено-деформованим станом внаслідок відмінностей пружних властивостей матеріалів основи і покриття та дозволяє підвищити ресурс і надійність важконавантажених деталей та робочих органів сільськогосподарських машин.

The complex method of approach for forming of discontinuous coatings is suggested. It is based on the principle of preventing adhesion cracking and allows choosing the size and deposition of the sections of discontinuous coatings. Such approach gives even wear on the sections with different Stress-strain State and allows increasing reliability and ensuring an original life of the details.

Література

1. Ляшенко Б.А., Кузема Ю.А., Дигам М.С., и др. Упрочнение поверхности металлов покрытиями дискретной структуры с повышенной адгезионной и когезионной стойкостью.- Киев: ИПП АН УССР, 1984. - 57 с.
2. Ляшенко Б.А., Сорока Е.Б., Рутковский А.В., Липинская Н.В. Определение параметров дискретной структуры покрытий с учетом остаточных напряжений // Пробл. прочности. - 2002. - №4. - С. 119-125.
3. Уманский Э.С., Ляшенко Б.А. Условия адгезионной и когезионной равнопрочности жаростойкий покрытий // Косм. исслед. на Украине. – 1975. – Вып. 6. – С. 58 – 64.
4. Колтунов М.А., Кравчук А.С., Майборода В.П. Прикладная механика деформируемого твердого тела. – М.: Высш. школа, 1983. – 349 с.
5. Лучка М.В. Покриття градієнтного типу поверхні трибоконтакту ковзанням. - Київ, 1998. – 53 с. – (Препр./НАН України. Ін-т пробл. матеріалознавства ім. І.М.Францевича).

Одержано 22.06.2004 р.