

УДК 539.431:670.19:536.421.1

М. І. Денисенко, канд. техн. наук, доц.

СХОПЛЮВАННЯ, ВТОМНІ ПОШКОДЖЕННЯ ТА НАНОКОНТАКТНА ВЗАЄМОДІЯ ПОВЕРХОНЬ ТВЕРДИХ ТІЛ

Національний університет біоресурсів і природокористування України

Розглянуто теоретичні та експериментальні результати по дослідженню тонкої структури поверхонь і втомної міцності деталей та вузлів сільськогосподарських машин.

Сутність проблеми. В останні десятиліття в умовах масового і серійного виробництва спостерігається зростання енергоємності машин і апаратів, створюються нові технологічні процеси, які перебігають в екстремальних умовах. У зв'язку з цим особливого значення набуває вміння конструювати довговічні машини. Аналіз причин виходу з ладу машин і механізмів показав що в 75 випадках зі 100 вони виникають через зношення тертьових спряжень. Таким чином, підвищення зносостійкості машин є основним резервом збільшення їх довговічності. Збільшення довговічності тертьових деталей машин неможливе без створення інженерних методів розрахунку на знос, у яких би враховувались фізико-механічні характеристики матеріалів тертьових тіл, режими роботи вузла тертя (навантаження, швидкість), зовнішні умови тертя (зовнішнє середовище, змащування) і конструктивні особливості фрикційного зчленування. Тут доречно відзначити ряд особливостей контактної взаємодії твердих тіл в умовах тертя, для урахування яких потрібно відмовитись від традиційних допущень, прийнятих у розрахунках на міцність.

По-перше, об'єм матеріалу, який сприймає навантаження у фрикційному зчленуванні, не є постійним, він змінюється залежно від значень тиску, шорсткості тертьових тіл та плівок, що виникають на поверхнях тертя;

По-друге, реальний контакт твердих тіл дискретний, деформуються мікрооб'єми матеріалу, до яких неприйнятна гіпотеза про однорідне ізотропне тіло, що широко використовується в класичній механіці деформувальних тіл.

По-третє, на відміну від розрахунків на міцність (умов не

руйнування тіл) у розрахунках на знос по суті оцінюються характеристики самого процесу руйнування.

По-четверте, властивості матеріалів, що беруть участь у терті, найчастіше відрізняються від властивостей вихідних матеріалів, вони змінюються в процесі тертя і відповідно змінюються умови руйнування матеріалів.

Перша спроба пов'язати знос з механічними властивостями матеріалів належить Тонну [1] (1937 р.), який запропонував емпіричну формулу для абразивного зносу. Пізніше Хольм [2] (1940 р), виходячи із атомарного механізму зношування, розрахував об'єм речовини, зношеної на одиночному шляху ковзання:

$$W = z \frac{N}{HB},$$

де z – ймовірність видалення атома з поверхні в разі зіткнення його з атомом контртіла.

Американські вчені F. T. Burwell и C. D. Strang [3] (1952 р.), J. F. Archard и W. Hirst [4] (1956 р.), розвиваючи адгезійну теорію зносу, пропонують розрахункову формулу, яка ідентична за своєю структурою формулі Хольма. Вони вважають, що внаслідок зношування відбувається відділення мікрооб'ємів матеріалу. Гадаючи, що частинки зношування мають форму півсфери, радіус якого дорівнює радіусу плями контакту, Арчард [4] показав, що

$$W = \left(\frac{k}{3}\right) \left(\frac{N}{HB}\right),$$

де k – ймовірність відділення частинки зносу з плями контакту.

Величина k змінюється в межах $10^{-2} - 10^{-7}$. У випадку тертя зі змащенням у це рівняння вводять додатковий множник $\alpha < 1$, який враховує відношення площі металевго контакту до загальної площі. Е. Рабинович установив зв'язок між α і коефіцієнтом тертя незмащених контактів, змащених контактів і загальним коефіцієнтом тертя. Роу [5] врахував збільшення розмірів одиночної плями контакту за наявності тангенціальних напружень і процеси десорбції змащування.

Наступний важливий етап розвитку розрахункових методів на знос пов'язаний з втомною теорією зносу твердих тіл, яка пропонується в СРСР. Перші публікації про неї появилися в 1957 р. [6].

У більш розширеному вигляді вона була опублікована в СРСР у 1958 р. [7], США в 1965 р. [8] і в Англії у 1968 р. [9].

В цій теорії, яка буде докладно викладена раніше, вводиться поняття про одиночний фрикційний зв'язок, деформований об'єм тертьових тіл, розглядається напружений стан цього об'єму залежно від навантаження, тертя і геометричного окреслювання мікронерівностей. Вигляд напруженого стану визначає характер порушення фрикційних зв'язків. Основна концепція цієї теорії полягає в потребі багатократного фрикційного впливу на руйнування поверхонь тертя. Ці впливи виражаються кількісно залежно від напруженого стану (виду порушення фрикційного зв'язків).

Група вчених, починаючи з 1962 р. [10], розвивають метод розрахунку на знос різних спряжень машин, який побудований на висунутій авторами інженерній моделі процесу. В її основу покладено уявлення про втомну природу зносу.

Матеріали та методика досліджень. Зношування деталей у процесі роботи реальних машин відтворювалося в лабораторних умовах, а вплив окремих факторів на закономірності його розвитку вивчалось диференційовано за постійного значення інших факторів. Такий методичний підхід дозволяє установити межі, в яких реалізується явище структурного пристосування, та вивчити фактори, що впливають на розширення цих меж. Дослідження починали зі всебічного вивчення стану поверхонь тертя та поверхневих шарів деталей і умов їх експлуатації, що дозволяє виявити фактори, які зумовлюють процес нормального механо-хімічного зношування та встановити причини розвитку якого-небудь іншого патологічного процесу зношування, якщо такий є.

Для дослідження закономірностей процесів, що супроводжують зношення в умовах тертя та структурного пристосування, на мікро- і субмікрорівнях були розроблені оригінальні установки. Основною вимогою до цих установок є висока точність оцінювання параметрів процесів, оскільки при структурному пристосуванні значення коефіцієнтів тертя змінюється в межах 0,05–0,005, а інтенсивність зношування – $10^{-1} - 10^{-3} \text{ мм}^3/\text{см}^2 \cdot \text{км}$.

Як основою аналітичних розрахунків скористалися характеристиками вихідного технологічного рельєфу, хоча деякі дослідники (М.М. Хрущов, М.М. Тененбаум) відзначили зміну початкових геометричних параметрів поверхні наприкінці періоду припрацювання.

Результати досліджень. В умовах тертя процес руйнування локалізується в малому об'ємі матеріалу, який вилучається із зони тертя у вигляді частинок зносу. Величину зносу зазвичай оцінюють за зменшенням розміру тіла в напрямі, перпендикулярному до поверхні тертя (лінійний знос).

Знос відбувається в тих ділянках поверхні, де реалізовується силова взаємодія між тертьовими тілами, тобто на фрикційних зв'язках, які в сукупності складають фактичну площу контакту двох тіл. У стаціонарному режимі зносу фактичної площі контакту є постійною в будь-який момент часу. У разі зрушення одного тіла відносно іншого на величину середнього діаметра плями контакту фрикційні зв'язки порушуються і виникають нові в тій же кількості, а в будь-якій точці поверхні, яка належить фрикційному зв'язку, реалізується повний цикл навантаження. Тому зсув на середній діаметр плями контакту можна розглядати як елементарний акт взаємодії поверхонь.

Припустімо, що об'єм матеріалу ΔV , який видалений з поверхні у вигляді частинок зносу, що пропорційний фактичній площі контакту, тобто

$$\Delta V \sim A_r. \quad (1)$$

Це допущення покладено в основу більшості розрахункових схем [11] і справедливо хоча би тому, що напруження, які діють на плями фактичного контакту, майже однакові, тому руйнування матеріалу на них можна розглядати як сукупність рівноймовірних незалежних подій.

Коефіцієнт пропорційності в формулі (1) повинен мати розмірність довжини. На цьому етапі розрахунку немає потреби звертатися до якого-небудь конкретного механізму зношування. Кінцева мета цих міркувань полягає у визначенні мікро- і макрохарактеристик процесу зношування і встановленні зв'язку між ними.

У разі зсуву на середній діаметр плями контакту руйнування може відбутися лише в деяких ділянках площі A_r . У кількісному відношенні це рівносильне відділенню шару товщиною Δh з кожної із плям контакту, тобто

$$\Delta V = \Delta h A_r. \quad (2)$$

Таким чином, у рівнянні (2) величина Δh характеризує умовну, а не реально зношувану з кожної плями товщину шару матеріалу. Визначимо, яке зміщення задати зношуваній поверхні відносно зношуваної для того, щоб остання спрацювалася на величину ΔH .

Імовірно, що це відбудеться за умови, що в кожній точці зношуваної поверхні виникне і порушиться N фрикційних зв'язків, де

$$N = \frac{\Delta H}{\Delta h}.$$

Уявно поділимо зношувану поверхню на смужки уздовж напрямку ковзання шириною $\overline{d_1}$, де $\overline{d_1}$ – середній розмір плям у напрямку, перпендикулярному до напрямлення ковзання. Довжина кожної такої смужки має бути такою, щоб на ній виникло N фрикційних зв'язків. Тоді загальна кількість фрикційних зв'язків, які

виникають в умовах тертя, $\frac{\alpha}{d_1} \frac{\Delta H}{\Delta h}$, де α – розмір зношуваного тіла в напрямі, перпендикулярному до напрямлення ковзання. Якщо щільність плям контакту $\gamma = \frac{n}{A_\alpha}$, то потрібна кількість фрикцій-

них зв'язків визначиться на площі тертя $\frac{\alpha}{d_1} \frac{\Delta H}{\Delta h} \frac{1}{\gamma}$, і дійсний шлях тертя

$$L_{\text{тр}} = \frac{\Delta H}{\Delta h} \frac{1}{\overline{d_1} \gamma}. \quad (3)$$

Вираз (3) можна змінити:

$$\frac{\Delta H}{L_{\text{тр}}} = \frac{\overline{d_1} \overline{d_2}}{\Delta A_r} \frac{\Delta h}{d_2} \cdot \frac{A_r}{A_\alpha}, \quad (4)$$

де ΔA_r – середня площа одиночної плями контакту; $\overline{d_2}$ – середній діаметр плями контакту в напрямленні кочення.

Вираз (4) встановлює зв'язок між макрохарактеристикою процесу зношування

$$I_h = \frac{\Delta H}{L_{\text{тр}}},$$

яка називається інтенсивністю зношування і його мікрохарактеристи-

кою $i_h = \frac{\Delta h}{d_2} = \frac{\Delta V}{A_r d_2}$ – питома інтенсивність зношування.

У межах прийнятої моделі нерівностей $\overline{d_1} = \overline{d_1} = \overline{d}$ зв'язок між характеристиками i_h і I_h виражається співвідношенням

$$I_h = \frac{4}{\pi} i_h \frac{A_r}{A_\alpha} \approx i_h \frac{A_r}{A_\alpha}.$$

Всупереч цій характеристиці у деяких випадках доцільно користуватися інтенсивністю зношування за масою

$$I_G = \frac{\Delta G}{L_{\text{тр}}} \text{ або об'ємною } I_V = \frac{\Delta V}{L_{\text{тр}}},$$

тут ΔG і ΔV – відповідно маса і об'єм зношеного матеріалу на шляху тертя $L_{\text{тр}}$.

У Японії товариством інженерів-мастильників (JSLE) введено питому характеристику зносу, яку називають питомим об'ємним зносом ($\text{см}^2/\text{кгс}$):

$$\varpi = \frac{V}{NL},$$

де V – зношений об'єм; N – нормальне навантаження; L – шлях ковзання.

Японське товариство інженерів, яке обробило за допомогою цієї характеристики понад 3000 експериментальних даних, встановило, що ϖ змінюється в межах $10^{-11} - 10^{-5}$.

Очевидно, що безрозмірна інтенсивність зношування, яка використовувалась в СРСР, пов'язана з питомим об'ємним зносом:

$$I_h = \frac{\varpi}{p_\alpha},$$

де p_α – номінальний тиск на контакт; зазвичай дорівнює контурному тиску p_c , оскільки випробування, як правило, проводяться на малих зразках.

Якщо шлях тертя в будь-якій точці стираної поверхні однаковий, а знос рівномірно розподілений по поверхні, то інтенсивність зношування є характеристикою всієї поверхні, у противному випадку її слід розглядати, або як характеристику досить малої ділянки поверхні, на якій виконуються зазначені умови, або як усереднену по поверхні характеристику.

Інтенсивність зношування елемента пари тертя можна визначати за зміною його розмірів або маси з урахуванням кінематики вузла тертя за однією з таких формул:

$$I_h = \frac{\Delta V}{A_T L_{\text{тр}}}; \quad I_h = \frac{\Delta h}{L_{\text{тр}}}; \quad I_h = \frac{\lambda}{\gamma} \frac{\Delta G}{A_{\alpha} L_{\text{тр}}},$$

де A_T – площа поверхні тертя стираного елемента; γ – щільність матеріалу, який зношується; $\lambda = A_{\alpha}/A_T$ – відношення номінальної площі контакту до площі поверхні тертя.

У загальному випадку за заданої величини відносного переміщення деталей спряження шляхи тертя різні для кожної деталі та для різних точок поверхні.

Нагромаджено великий експериментальний матеріал, який дозволяє скласти уявлення, наскільки великий діапазон зносостійкості елементів машин та механізмів: ($I_h = 10^{-3} \dots 10^{-12}$).

Дослідники стверджують, що в разі зрушення на діаметр плями контакту тільки в одному із мільйона плям (якщо $i_h = 10^{-6}$) відбувається відділення частинок зносу.

Частинки зносу є важливим джерелом інформації. Дослідивши їх форму і розміри, склад, рельєф поверхні, фізичні і механічні властивості, можна скласти певні уявлення про процес їх утворення.

Одне із суттєвих питань полягає в тому, чи відбувається відділення частинок у результаті однократної взаємодії між нерівностями або деякий підготовчий (латентний) період.

Для того щоб усунути цю суперечність, можна передбачити фрагмент, який відокремлюється, набагато меншого розміру плями контакту. Сода (N. Soda) [12] оцінює ділянки безпосереднього контакту де може відбутися руйнування, 10^{-3} і менше від площі одиночної плями. Посилання на те, що частинки зносу розміром 10^{-5} мм не є бездоганим доказом цієї гіпотези, оскільки не можна знехтувати подрібненням частинок зносу в разі виходу їх із зони тертя.

Ще Арчард [4], сформулювавши механізм адгезійного зносу, був вимушений ввести в рівняння зносу коефіцієнт k , який може бути інтерпретований, як кількість впливів n , необхідних для утворення частинок зносу ($n = k^{-1}$).

Принцип багатократності впливу невід'ємно пов'язаний з необхідністю урахування змін, які відбуваються в матеріалі контактної зони. Дійсно, якщо під кожний послідовний вплив підпадає один і той же матеріал, то зовсім незрозуміло, чому руйнування настає в разі повторного застосування, а не першого з них.

У цьому зв'язку становить великий інтерес теорія «пелюстково-го» зносу (зношування через відшарування), яка була висунута Су [12]. За Су товщина зносу визначається товщиною зони із зниженою концентрацією дислокацій h . Оцінювані розрахунки показують, що

$$h = \frac{Gb}{4\pi(1-\mu)\sigma_f},$$

де G – модуль зрушення; b – вектор Бюргерса; μ – коефіцієнт Пуассона; σ_f – напруження тертя. Очевидно, що чим менше відношення G/σ_f , тим менша товщина частинки зносу. Розвинення тріщин у приповерхневому шарі паралельно поверхні тертя зафіксовано за допомогою сканувального електронного мікроскопа.

Швидкість утворення тріщин у твердому матеріалі ускладнюється високе значення напруження тертя і когезійної міцності матеріалу. Контактна пружно-пластична деформація є основним фактором, що зумовлює процеси структурного пристосування матеріалів під час тертя. Відповідно до першого закону термодинаміки сил тертя A перетворюється в теплоту Q і частково запасастся вузлом тертя ΔE , $A = Q + \Delta E$ [13].

Процеси запасу енергії зумовлені переважно утворенням активної ультрадисперсної орієнтованої структури, що викликає структурну активацію матеріалу в контактній зоні деформації. Кількісний рівень структурно-термічної активації у процесі тертя можна охарактеризувати питомою роботою тертя A_y , що являє собою добуток коефіцієнта тертя μ на питома навантаження p та швидкість ковзання v : $A_y = \mu p v$. Для умов структурного пристосування слушні такі вирази: $A \neq Q$; $\Delta E \neq 0$;

У загальному енергетичному балансі за нормального тертя ΔE складає незначну величину (менше 1%). Але якщо врахувати, що ця енергія запасастся в тонкому поверхневому шарі (товщина десятки та сотін нанометрів), то густина отриманої енергії в одиниці деформувального об'єму буде близькою до граничних критичних значень енергії, яку може поглинути метал у твердій фазі у процесі деформації або нагрівання до температур, що близькі до температури плавлення.

Висновки. Відповідно до класичних уявлень пластична деформація в більшості металів утворюється в мікрооб'ємах не гомо-

генно. Активний процес відбувається в незначній частині об'єму (за розтягу близько 1%). Становлення фундаментальної закономірності зовнішнього тертя та поверхневого руйнування, а також її головного фізичного механізму – явища структурного пристосування матеріалів – є основою для побудови загальної теорії поверхневої міцності.

Список літератури

1. *Tonn W.* Beitrag zur Kenntnis des Verschleißvorganges beim Kurzversuch. Ztsch. F. Metallkunde, Bd. 29, –N 6. – S. 196–198.
2. *Holm R.* Electrical Contacts. Stockholm. H/ Gerbers, 1946. 398 p.
3. *Burwell J. T., Strang C. D.* On the Empirical Law of Adhesive Wear. J. Appl. Phys., –Vol. 23. – N 1, 1952, –P. 18–28.
4. *Archard J. F., Hirst W.* An Examination a Mild Wear Process. Proc. Roy. Lond. Ser A, –Vol. 238. – 1957. – P. 515–528.
5. *Rowe C. N.* Some Aspects of the heat of Adsorption in the Function of a Boundary Lubricant. ASLE Trans. –N 2. –1966, –P. 101–111.
6. *Крагельский И.В.* Некоторые понятия и определения, относящиеся к трению и изнашиванию /Крагельский И.В. – М.: Изд-во АН СССР, 1957. – 12 с.
7. *Крагельский И.В.* Износ как результат повторной деформации поверхностных слоев (частный случай контактирования деформируемой поверхности с абсолютно жесткой шероховатой) / Крагельский И. В. – Известия высш. учеб. заведений. Физика. – 1958. –№ 5. – С. 1047–1050.
8. *Bayer R. G. Clinton W. C., Sirico J. L.* Note on the Application of the Stress Dependency of Wear. Wear, –Vol. 7. –1964, –P. 282–289.
9. *Engineering Model for Wear*, –Vol. 5, –1962, –P. 378-391. Auth.: Bayer R. G., Clinton W. C., Nelson C. W., Schumacher R. A.
10. *Белый В.А.* О регулировании фрикционных свойств композиционных материалов. /Белый В.А., Свириденко А.И., Дубровский В.С. – ДАН СССР, 1974. – № 3, –С. 624–626.
11. *Выбор износостойких материалов для поворотных кругов экскаваторов* / Г.М.Харач, С.Е.Ровках, Р.В.Захарбеков и др.– В сб.: Строительные и дорожные машины, разд. «Экскаваторы и стрелковые краны», вып. 1, М., Изд. ЦНИИТЭ строймаш., 1968, –С. 3–7.
12. *Soda N.* Friction and Lubrication, Iwanami, 1954, – 91 p.
13. *Поверхностная прочность материалов при трении* / [Костецкий Б.И., Носовский И.Г., Караулов А.К. и др.] ; под ред. Б.И. Костецкого «Техніка», 1976. – 296 с.

УДК 539.431:670.19:536.421.1

Денисенко М.И. **Схватывание, усталостные повреждения и наноконтактное взаимодействие поверхностей твердых тел // Проблемы тертя та зношування: Наук.-техн. зб. – К.: Вид-во НАУ «НАУ-друк», 2010. – Вип. 52. – С.102–111.**

Рассмотрены теоретические и экспериментальные результаты исследований тонкой структуры поверхностей и усталостной прочности деталей и узлов сельскохозяйственных машин.

Список лит.: 13 наим.

Denysenko M.I. **Grasp and of wear-fatigue damage at of nanocontact interaction surface hardness solid**

Theoretical and experimental results on the thin structure of surface and fatigue strengthening of the details and units of agricultural machines are described.

Стаття надійшла до редакції 13.10.09.