

УДК 621.9(075.8)

В.В. Ступницький, Є.М. Махоркін
ТРИБОТЕХНІЧНИЙ КРИТЕРІЙ ФОРМУВАННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНО-ОРІЄНТОВАНОЇ
ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ В МАШИНОБУДУВАННІ

У статті наведені аналітичні залежності взаємозв'язку експлуатаційних властивостей деталей машин з параметрами якості їх робочих поверхонь. Використання цих рівнянь дозволить прогнозувати експлуатаційні показники деталей машин, від яких залежить надійність та довговічність їх роботи. Вирішення цієї задачі дозволить визначити фізичну суть формування мікронерівностей поверхні, що забезпечує оптимальні експлуатаційні параметри від структури та параметрів технологічних процесів їх механічного оброблення та складання

Ключові слова: шорсткість, мікротопологія поверхні, паралельний інжиніринг, зношування, трибоконтакт
Форм. 42. Табл. 1. Рис. 1. Літ. 11.

В.В. Ступницький, Е.Н. Махоркин
ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЙ КРИТЕРИЙ ФОРМИРОВАНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНО-
ОРИЕНТИРОВАННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ В
МАШИНОСТРОЕНИИ

В статье приведенные аналитические зависимости взаимосвязи эксплуатационных свойств деталей машин с параметрами качества их рабочих поверхностей. Использование этих уравнений позволит прогнозировать эксплуатационные показатели деталей машин, от которых зависит надежность и долговечность их работы. Решение этой задачи позволит определить физическую суть формирования микронеровностей поверхности, которая обеспечивает оптимальные эксплуатационные параметры от структуры и параметров технологических процессов их механического обрабатывания и сборки

Ключевые слова: шероховатость, микротопология поверхности, параллельный инжиниринг, изнашивание, трибоконтакт

V. Stupnytskyy, E. Mahorkin
TRIBOLOGICAL CRITERION FOR MANUFACTURING PARTS FUNCTIONAL-ORIENTED
TECHNOLOGY IN ENGINEERING

The paper presents the analytical dependence relationship performance properties of machine parts with quality parameters of working surfaces. Using these equations will predict the performance indicators of machine parts which depend on the reliability and durability of their work. Solving this problem will determine the physical nature of the microscopic surface formation provides optimal operating parameters on the structure and parameters of technological processes for machining and assembly

Keywords: roughness, mikrotopology of surface, concurrent engineering, wear, frictional connection

Постановка проблеми. Впровадження функціонально-орієнтованого технологічного проектування, що реалізує концепцію PLM, базується на основі паралельного проектування (або т.зв. паралельного інжинірингу). Розвиток технологій паралельного проектування пов'язаний, передусім, з підвищенням для споживача таких нецінових чинників конкурентоздатності, як якість функціональних та споживчих якостей виробу. У цьому випадку, реалізується якісно новий методологічний підхід в проектуванні функціонально-орієнтованих технологій, що полягає у формуванні структури і параметрів технологічного процесу виготовлення виробу у відповідності до умов його майбутньої експлуатації. При цьому забезпечується можливість повної адаптації виробу до заданого, необхідного або граничного експлуатаційного потенціалу в машині або технологічній системі [1]. Зв'язок між функціональними властивостями виробу та технологією їх забезпечення повинен носити прогностичний характер. Проте проаналізувати їх вплив диференційовано можна лише використавши можливості комплексного імітаційного реологічного та аналітичного моделювання, а експериментальним шляхом можна лише підтвердити адекватність їх сукупного впливу на формування мікрогеометрії остаточно.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вітчизняними і закордонними вченими в роботах, пов'язаних з вивченням інженерії поверхонь, встановлено, що не завжди зменшення мікронерівності поверхні спричинює зменшення сили тертя і сприяє менш інтенсивному зношуванню основних функціональних поверхонь машинобудівних виробів [5,9,10]. В першу чергу це пояснено положеннями молекулярно-механічної теорії тертя проф. І.В.Крагельського [5]. Згідно цієї теорії, зниження шорсткості призводить до зменшення механічної складової коефіцієнту тертя, підвищуючи при цьому його адгезійну та молекулярну складову. Таким чином, традиційно контрольовані параметри шорсткості поверхні Ra і Rz не дають повної оцінки експлуатаційних властивостей, оскільки не відображають форму мікрорельєфу, що є надзвичайно

важливим для забезпечення заданих експлуатаційних властивостей функціональних поверхонь деталей машин. Для вирішення цієї задачі необхідна непараметрична оцінка мікротопології поверхні [9].

У цьому зв'язку, заслуговує на увагу досвід західноєвропейських держав, зокрема Німеччини, де контролюються не тільки параметри мікрогеометрії поверхні, але і форма профілю з використанням опорної лінії (кривої Аббота) [7]. Так, наприклад, на підприємствах Німеччини вимоги до відповідальних поверхонь пневмонасосів, що підлягають активному зношуванню, висуваються такі вимоги [8]:

Таблиця 1. Вимоги до мікротопології внутрішніх поверхонь деталей пневмонасосів, що підлягають активному зношуванню

Поздовжнє вимірювання	$R_{pk} + R_k$ (мкм)	R_{vk} (мкм)	R_z (мкм)
Середнє значення	< 0,4	> 0,9	> 2,2
Максимальне значення	0,5	--	--
Мінімальне значення	--	0,7	1,8
Поперечне вимірювання	R_{vk} (мм)		
	<10		

Знаючи вплив технологічних чинників на якість поверхні, можна призначати умови обробки, що забезпечують досягнення заданих показників надійності і довговічності деталей машин в процесі їх експлуатації. Істотний вплив має шорсткість на умови сухого або граничного тертя між спряженими поверхнями. Сухе тертя виникає через те, що при малих зазорах при малій шорсткості мастило витискається із зони тертя. У результаті в зонах безпосереднього контакту поверхонь утворюються міцні металеві зв'язки, тобто відбувається їх прихоплювання, що, у свою чергу, також обумовлює інтенсивне зношування деталей.

У діючому на сьогоднішній день стандарті (ГОСТ 2789-73) регламентуються лише 7 параметрів шорсткості, в той час, як Міжнародний стандарт ISO 4287-1997 містить 76 параметрів. Велика кількість контрольованих параметрів зумовлена значними відмінностями в умовах функціонування деталей в машинах та вибором відповідних часткових показників шорсткості або їх комплексів. Наприклад, параметр R_{pk} (середнє арифметичне значення висот вершин, розташованих вище обраного рівня перетинів профілю) дозволяє визначити величину зношування матеріалу в процесі припрацювання. Параметр R_k (глибина усіченого профілю) характеризує допустиме зношування найбільш відповідальної поверхні, що найсуттєвіше впливає на тривалість служби деталі, а параметр R_{vk} (середнє арифметичне значення глибин впадин, розташованих нижче вибраного рівня перетинів профілю) відображає здатність поверхні до утримання мастила [10]. Усвідомлюючи все це, в останні роки вчені інтенсифікували теоретичні та експериментальні дослідження по встановленню взаємозв'язку експлуатаційних властивостей деталей машин і їх з'єднань з параметрами мікротопології поверхонь шляхом їх технологічного забезпечення [7,8,9].

Невирішені частини проблеми. Для врахування особливостей експлуатації окремих деталей в машині або технологічній системі і забезпечення заданого, необхідного або граничного їх експлуатаційного потенціалу, необхідно реалізувати алгоритм прийняття рішень щодо вибору структури та параметрів технологічного процесу, виходячи з прогностичних можливостей імітаційного моделювання процесів формоутворення машинобудівних виробів. Це найбільш повно реалізовано у автоматизованій системі формоутворення виробів (CAF-система) [11]. Вхідними даними для формування обмежень та критеріїв оптимізаційної задачі, що має на меті реалізацію функціонально-орієнтованого принципу проектування (або корекції) структури та параметрів технологічного процесу є комплекс кваліметричних параметрів, що реалізується на 2-х етапах. На першому етапі в САЕ-системі відбувається імітаційне моделювання умов експлуатації вузла та окремих його деталей. На другому етапі ці імітаційні моделі набувають аналітичної інтерпретації та формалізації, достатньої для використання у оптимізаційній моделі. Проте, на сьогоднішній день ще не існує математичного апарату, що в повній мірі формалізує рекурентний взаємозв'язок між структурними складовими САЕ-системи: формалізовані експлуатаційні вимоги до виробу – *топологічна структура функціональних поверхонь* – *структура та параметри технології механічного оброблення цих поверхонь*. Теоретичному обґрунтуванню реалізації цього алгоритму і присвячена дана публікація.

Метою дослідження є встановлення аналітичних залежностей взаємозв'язку експлуатаційних властивостей деталей машин з параметрами якості їх робочих поверхонь. При цьому буде створюватись можливість встановлення фізичної суті, отримання теоретичних рівнянь, що описують цей взаємозв'язок. Використання цих рівнянь дозволить прогнозувати експлуатаційні показники деталей машин, від яких залежить надійність та довговічність їх роботи. Вирішення зворотної задачі дозволить визначити фізичну суть формування мікронерівностей поверхні, що забезпечує оптимальні експлуатаційні параметри (зношування, контактну жорсткість тощо), від структури та параметрів технологічних процесів їх механічного оброблення та складання.

Основні результати дослідження. При виборі структури та параметрів функціонально-орієнтованого технологічного процесу, операції та переходу, заданих умовами експлуатації, точності виготовлення деталей машин і якості їх робочих поверхонь, потрібно мати на увазі, що якість обробленої поверхні і точність деталей машин в основному характеризуються: геометричними параметрами (мікрогеометрією, шорсткістю, напрямом штрихів оброблення, точністю взаємного розташування елементарних поверхонь тощо); фізико-механічними властивостями поверхневого шару (наклепом, залишковими напруженнями) і фізико-хімічними властивостями поверхневого шару, які формуються взаємодією малонасичених силових полів поверхневих атомів твердого тіла з силовими полями молекул зовнішнього середовища, що перебуває у контакті з поверхнею твердого тіла.

Мікропрофіль обробленої поверхні, що визначає значення її шорсткості, утворюється в результаті векторного додавання трьох складових: висоти мікронерівностей, одержуваної в процесі копіювання різальної частини інструмента з урахуванням кінематичних характеристик її руху (Δ_1), висоти мікронерівностей, яка визначається коливаннями елементів різального інструменту (Δ_2) та складової мікронерівності, що формується внаслідок пластичного деформування матеріалу заготовки в зоні силового впливу різального клина (Δ_3) [9]. Процес виникнення нерівностей внаслідок геометричних причин прийнято трактувати як копіювання на оброблюваній поверхні траєкторії руху і форми різальних лез. З геометричної точки зору величина, форма і взаємне розташування нерівностей (напрям інструментальних рисок) визначаються формою і станом різальних лез і тими елементами режиму різання, які впливають на зміну траєкторії руху цих лез відносно оброблюваної поверхні. У різних умовах обробки пластичні і пружні деформації оброблюваного матеріалу і вібрація спотворюють геометрично правильну форму нерівностей, порушують їх закономірний розподіл на поверхні і в значній мірі збільшують їх висоту. У ряді випадків пластичні деформації і вібрації викликають появу поздовжньої шорсткості, що досягає значних розмірів, і збільшення поперечної шорсткості. Переважний вплив на формування шорсткості поверхні надає (як правило) одна з трьох зазначених груп причин, яка і визначає характер і величину шорсткості. Однак в окремих випадках шорсткість виникає в результаті одночасного і майже рівнозначного впливу всіх зазначених причин і внаслідок цього не має чітко виражених закономірностей.

Опорна лінія профілю змінюється від рівня найбільшого піку профілю ($t_p = 0$) до рівня найбільшої впадини ($t_p = 100\%$). По ній можна отримати параметри, що характеризують форму мікрогеометрії поверхні:

- R_{pk} - усереднена висота виступів. Це верхня частина профілю поверхні, яка, як правило, руйнується в процесі припрацювання виробу;
- R_k - глибина нерівностей профілю поверхні, що визначає основу профілю. На цьому рівні поверхня тривалий час знаходиться в роботі. Даний параметр має вирішальний вплив на термін служби і якісні показники роботи виробу;
- R_{vk} - усереднена глибина западин профілю, що визначають змащувальну здатність поверхні.

Таким чином, криві опорних поверхонь мають значення для розрахунків контактних деформацій, а також забезпечення мастилоутримуючих властивостей з'єднання. При контактуванні шорстких поверхонь у більшості випадків в контакт беруть участь тільки найбільш високі виступи, що складають верхню частину опорної кривої. Застосування такого підходу дозволяє більш коректно задавати вимоги до функціональних поверхонь. На рис.1 представлений приклад профілограми і опорної лінії профілю з відповідними характеристиками для зносостійких поверхонь.

Феноменологічна модель тертя розглядає його як процес дисипації енергії, що протікає при відносному тангенціальному взаємному переміщенні спряжених поверхонь, що здійснюється в зонах реального контакту, створеного під дією зовнішніх навантажень та в середовищі реальних умов взаємодії контртіл. При зближенні шорстких поверхонь під навантаженням спочатку дотикаються найбільш високі нерівності, що підлягають дії значних локальних тисків. Це призводить до значної деформації нерівностей і введенням в контактну взаємодію нових мікроступів. Таке явище відбувається до тих пір, поки загальна площа контакту не забезпечить несучу здатність поверхні у відповідності до її розмірів, прикладеного зовні навантаження, умов контакту та фізико-механічних властивостей матеріалів спряжених деталей. Як показують дослідження [3,7,9], сформований таким чином фактичний контакт майже на 2 порядки менше номінального. Причому, фактична площа контакту (ФПК) має суттєвий вплив на такі важливі кваліметричні властивості, як теплопровідність, електричний опір реальних спряжень, контактна міцність та корозійна стійкість тощо [10].

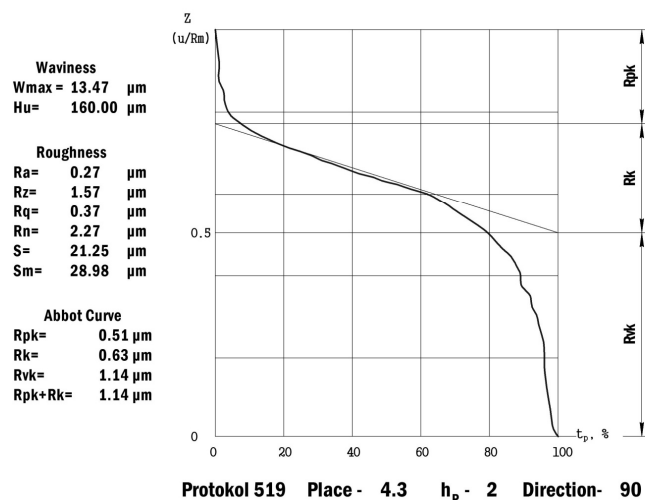
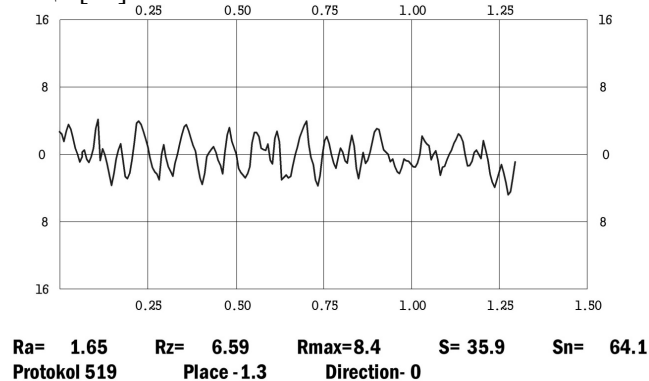


Рис. 1. Приклад профілограми і опорної лінії профілю з мікрогеометричними характеристиками (R_{pk} R_k R_{vk}) для зносостійких поверхонь

Для спрощення розрахунку ФПК, найбільш ефективним є модель Дьомкіна, де формулюється поняття шорсткої еквівалентної поверхні, що акумулює в собі шорсткість обох спряжених поверхонь і дозволяє обмежитись розглядом контакту такої еквівалентної поверхні і ідеально-гладкої [3]. Цей підхід базується на ступеневій апроксимації площі опорної поверхні η відносно опорної кривої (рис.1) з використанням апроксимуючих коефіцієнтів b і ν_d , що описується формулою [3,8]:

$$\eta = b \cdot \varepsilon^{\nu_d} \quad (1)$$

Параметри b і ν_d пов'язані з параметрами мікронерівностей відношеннями :

$$b = t_m \left(\frac{R_{max}}{R_p} \right)^{\nu_d}, \quad (2)$$

$$v_D = 2t_m \frac{R_p}{Ra} - 1, \quad (3)$$

де t_m – відносна опорна довжина на рівні середньої лінії.

Для шорсткої еквівалентної поверхні сформульовані такі співвідношення:

$$b = k \cdot b_1 \cdot b_2 \cdot (R_{\max 1} + R_{\max 2}) \frac{v_{D1} + v_{D2}}{R_{\max 1}^{v_{D1}} \cdot R_{\max 2}^{v_{D2}}}, \quad (4)$$

$$v_D = v_{D1} + v_{D2} \quad (5)$$

де $k = \frac{\Gamma(v_{D1} + 1) \cdot \Gamma(v_{D2} + 1)}{\Gamma(v_{D1} + v_{D2} + 1)}$;

Γ – гама-функція.

Таким чином, ми можемо апроксимувати контурну площу спряжених поверхонь до вигляду контакту шорсткої поверхні з віртуальними показниками b і v_D і умовним радіусом закруглення мікрогеометричної поверхні r^2 з абсолютно гладкою поверхнею. Очевидно, що кожен мікроступ деформується спочатку пружно, а потім пружно-пластично. При цьому вважається, що мікроступ деформується абсолютно пружно за умови:

$$\frac{R}{r^2} < K_m \frac{\sigma_T (1 - \mu^2)}{E} \quad (6)$$

де R – радіус плями контакту;

σ_T – межа текучості матеріалу.

K_m – коефіцієнт, що залежить від умов деформування [3] $K_m = 6 \dots 8$;

μ – коефіцієнт Пуассона;

E – модуль Юнга.

Іншим критерієм переходу від пружного контакту до пластичного служить критерій Вільямсона-Грінвуда [7], або т.зв. індекс пластичності. При цьому вважається, що пластична текучість мікронерівності починається тоді, коли максимальний герцовий тиск q_{\max} досягає значення $0,6H$ (H – твердість найбільш м'якого з контактуючих матеріалів). Приймаючи до уваги апроксимаційну модель сферичної форми мікронерівності, при втисканні кулі в площину, зближення у пов'язане з тиском співвідношенням:

$$y = \frac{\pi^2 q_{\max}^2 \mu}{4 E^2} \quad (7)$$

Підставляючи $q_{\max} = 0,6H$, отримуємо критичне зближення:

$$[y] = 0,89 \cdot \mu \cdot \left(\frac{H}{E}\right)^2 \quad (8)$$

Для розрахунку контактних деформацій необхідно класифікувати мікроспряжені поверхні за геометричною формою у відповідності до форми змодельованих мікронерівностей, отриманих як векторна сума геометрико-кінематичної, вібраційної та деформаційної складової [9]. Для них розроблені типові моделі рішення контактних задач пружності і пластичності. Так, моделювання взаємодії сферичної поверхні і пластичного площинного півпростору, вирішуємо за алгоритмом А.Ю. Ішлінського [3], моделюючи взаємодію плоского клина, розглядаємо задачу К.Хілла [8]; при мікроконтакті циліндричної і плоскої поверхні, використовуємо аналітичні залежності, сформульовані в задачі Прандтля [2] тощо.

Так, при пружному контакті сферичних виступів за формулою Герца можна розрахувати питомий контактний тиск за формулою [3,7,8]

$$q_r = 0,43 \sqrt{\frac{y}{l^2 \cdot J}} \quad (9)$$

де:

$$l = \frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2}; \quad J = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \quad (10)$$

R_1, R_2 – радіуси спряжених поверхонь;

y – умовне зближення спряжених поверхонь.

У випадку пластичної деформації для визначення контактного тиску використовується формула Майєра [8]:

$$N_i = g d^g, \quad (11)$$

де N_i - навантаження на індентор;

d - діаметр відбитку;

g, g - коефіцієнти, що характеризують пластичну властивість матеріалу.

Так, для спряження циліндричних поверхонь, отримуємо формулу [8]:

$$N_i = (8Rpr)^{g/2} g \varepsilon^{g/2}, \quad (12)$$

Тоді контактний тиск визначається за формулою:

$$q_r = \left(\frac{2H_M^{1/m_1} R p}{\alpha r} \cdot \varepsilon \right)^{m_1}, \quad (13)$$

де $m_1 = g/2 - 1$;

H_M - твердість по Майєру, що отримується при умові $d = D$, тобто при втисканні сфери до екватора:

$$g = \frac{\pi H_M}{4D^{g-2}}, \quad (14)$$

Отже, підтверджується формула Герца [5]:

$$q_r = B(\varepsilon)^\omega, \quad (15)$$

де B і ω - коефіцієнти, що залежать від форми мікровиступів і фізико-механічних властивостей матеріалу.

Загальна формула зближення спряжених шорстких поверхонь при класичному пружно-пластичному контакті визначатиметься за формулою [3,7,8]:

$$y = \frac{N}{2\pi r C \sigma_T} + \frac{3}{8} \sqrt{N \pi C \sigma_T}, \quad (16)$$

В даній формулі перша частина визначає пластичну складову зближення, а друга - пружну.

Згідно з формулою 13, граничне пружне навантаження, що сприймається одиночним мікровиступом, можна подати у вигляді:

$$N_i = q_r \Delta A_{r_i} = B(\varepsilon_i)^\omega \Delta A_{r_i}, \quad (17)$$

де відносне зближення поверхонь $\varepsilon = \frac{y_i}{R_{pk}}$;

ΔA_{r_i} - дійсна площа плями контакту у випадку даного зближення.

Враховуючи те, що середньостатистична висота виступу відрізняється від максимального значення $R_{pk_{max}}$, повне навантаження визначаємо сумуванням навантажень окремих виступів і з врахуванням, що $dN_i = N_i dn_r$. Провівши інтегрування за всіма виступами, що вступили в контакт та з урахуванням умов еквівалентності (4 та 5) отримаємо [3]:

$$N = \frac{\Gamma(2 + \omega) \Gamma(v + 1)}{\Gamma(v + \omega + 1)} \alpha \cdot t_m \cdot A_c \cdot B \cdot \varepsilon^{\omega+v}, \quad (18)$$

або враховуючи константу $K_3 = \frac{\Gamma(2 + \omega) \Gamma(v + 1)}{\Gamma(v + \omega + 1)}$, можна зробити перетворення:

$$N = K_3 \cdot \alpha \cdot t_m \cdot A_c \cdot B \cdot \varepsilon^{\omega+v}, \quad (19)$$

Значення коефіцієнта K_3 наведені в технічній літературі [3,7,8].

Тоді формула відносного зближення набуде вигляду:

$$\varepsilon = \left(\frac{q_r}{\alpha \cdot K_3 \cdot t_m \cdot B} \right)^{1/(\omega+v)}. \quad (20)$$

Відносна площа контакту :

$$\eta = \alpha^{\frac{\omega}{(v+\omega)}} \cdot t_m^{\frac{\omega}{(v+\omega)}} \cdot q_r^{\frac{v}{(v+\omega)}} \cdot K_3^{\frac{(v+\omega)}{v}} \cdot B^{\frac{(v+\omega)}{v}}. \quad (21)$$

де α - коефіцієнт пружності мікроставів (можна умовно прийняти $\alpha=0,5$ у випадку пружного контакту за умови забезпечення критерію Вільямсона-Грінвуда; або $\alpha=1,0$ у випадку пластичного контакту за умови перевищення індексом пластичності величини $0,5H$ [7];

t_m – відносна опорна довжина по середній лінії профілограми мікронерівностей профіля;

v - параметр кривої Аббота;

B, ω - емпіричні коефіцієнти, що залежать від властивостей матеріалу [7].

Таким чином, при моделюванні трибоконтакту з урахуванням параметрів мікротопології поверхонь формули (1-3) повинні бути змінені, приймаючи до уваги необхідність формалізації еквівалентної поверхні у відповідності до моделі Дьомкіна [3]:

$$v_{ekv} = v_1 + v_2; \quad (22)$$

$$tm_{ekv} = K_p \cdot tm_1 \cdot tm_2; \quad (23)$$

$$Rpk_{ekv} = K_p \cdot Rpk_1 \cdot Rpk_2; \quad (24)$$

$$K_p = \frac{(Rpk_1 + Rpk_2)^{v_{ekv}}}{Rpk_1^{v_1} Rpk_2^{v_2}}; \quad (25)$$

$$b_{ekv} = \frac{(Rmax_1 + Rmax_2)^{v_{ekv}}}{Rmax_1^{v_1} Rmax_2^{v_2}}; \quad (26)$$

$$Rvk_{ekv} = K_v \cdot Rvk_1 \cdot Rvk_2; \quad (27)$$

$$K_v = \frac{(Rvk_1 + Rvk_2)^{v_{ekv}}}{Rvk_1^{v_1} Rvk_2^{v_2}}; \quad (28)$$

$$Rk_{ekv} = Rk_1 + Rk_2; \quad (29)$$

Таким чином, середня несуча площа контакту залежить від навантаження на трибоспряження в ступені, що змінюється від 1 до 0,2, причому домінуючий вплив має саме форма мікронерівностей, а не їх висотні та крокові параметри.

Згідно теорії молекулярно-механічної природи триботехнічних систем [5] і механізму втомного зношування [7], для шорсткої поверхні найбільш характерною є деформаційно-механічна складова руйнування зношуванням, а для гладкої – молекулярна. При взаємодії мікронерівностей циклічно виникають напруження і деформації, що залежать від умов навантаження, форми і розмірів мікрорельєфу, властивостей матеріалу тощо. Це явище є наслідком часткового руйнування спряжених поверхонь, відокремленню або текучості частин деталей. Такий процес слід розглядати як підвид поверхневого руйнування – фрикційно-контактну втому [4].

Крім того, відомо [6], що контактна взаємодія визначається тільки формою зазору між контактуючими тілами (їх зсувна взаємодія до уваги не береться, зважаючи на незначний інтегральний вплив). Тоді, без обмеження адекватності, можна вважати шорсткою межу тільки одного з контактуючих поверхонь, якщо при цьому забезпечити відповідність профілю шорсткості проміжку між недеформованими поверхнями, тобто використати профіль еквівалентною шорсткості і приведений модуль пружності :

$$E_{ekv} = \frac{1}{\left(\frac{1-\mu_1^2}{E_1}\right) + \left(\frac{1-\mu_2^2}{E_2}\right)}; \quad (30)$$

де E_1 і E_2 — модулі пружності матеріалів спряжених контртіл;

μ_1 і μ_2 — коефіцієнти Пуассона контактуючих тіл.

Інтенсивність лінійного зношування визначається за формулою:

$$I_h = \frac{y}{L}, \quad (31)$$

де y – величина зношеного шару (абсолютне зближення спряжених поверхонь – формула (16));

L – шлях тертя, на якому відбувається зношування.

Основна формула для розрахунку інтенсивності зношування має вигляд

$$I_h = i \frac{A_r}{A_a} = i \frac{P_a}{P_r} \quad (32)$$

де A_a , A_r – номінальна та фактична площа трибоконтaktu спряжених поверхонь, відповідно;

де P_a , P_r – номінальне та фактичне навантаження спряжених поверхонь, відповідно;

i – питома зношування, що являє собою кількість матеріалу, що видаляється з фактичної площі дотику на довжину d :

$$i = \frac{y}{d(v+1)n} \quad (33)$$

З аналізу формул (32) - (33) очевидно, що інтенсивність зношування визначається числом циклів, що призводять до відділення частки матеріалу, і відношенням номінального тиску до фактичного. Число циклів залежить від контактних напружень і деформацій, які пов'язані з тертям. Розрахунок зношування зводиться до аналітичного виразу цих величин через механічні характеристики спряжених поверхонь і зовнішні параметри процесу (навантаження, температура, швидкість, що можна змодельовати в САЕ системі). Відповідно до видів порушення фрикційних зв'язків розрізняють три основні види зношування: при мікрорізанні; при пластичному контакті; при пружному контакті. Строго кажучи, в практиці навряд чи зустрічаються вузли, в яких реалізувався лише один з видів зношування. Проте переважання того або іншого виду зношування є цілком очевидним фактом, так що кажучи «вузол працює в умовах пружного контакту», ми маємо на увазі, що пружний контакт є домінуючим в цій парі, і зношування, викликане втомним руйнуванням в умовах пружного контакту, також є переважальним.

У випадку пружного контакту в зоні мікроспряжених поверхонь кількість циклів n до руйнування визначається за формулою [5]:

$$n = \left(\frac{\sigma_0}{k \cdot f \cdot P_r} \right)^t \quad (34)$$

де σ_0 – початкове екстрапольоване значення напружень при $n=1$;

де f – коефіцієнт тертя ковзання;

k – коефіцієнт, що залежить від фізико-механічних властивостей матеріалу. Так, для крихких матеріалів ($t_x \geq 2$) приймаємо $k = 5$; для умовно-крихких ($1 \leq t_x < 2$) приймаємо $k = 4$; для пластичних матеріалів ($t_x < 1$) приймаємо $k = 3$. Проте, для матеріалів, що допускають виникнення значних пластичних матеріалів, але працюючих в пружній області і лише для випадку виконання умови Вільямсона-Грінвуда (формула 7):

$$k = 1,5 \sqrt{4 \cdot (1 - \mu - \mu^2) + \frac{(1 - 2\mu)^2}{f^2}} \quad (35)$$

де μ – коефіцієнт Пуассона.

Тоді при пружному контакті інтенсивність зношування визначається за формулою [4]:

$$I_h = \frac{c_1 \cdot P_a^{1+\gamma t}}{\chi} (\Gamma)^{f-\gamma t-1} \left(\frac{kf}{\sigma_0 c_2} \right)^t \Delta^{\gamma t v} \quad (36)$$

де приведений еквівалентний показник ступеня γ визначається за формулою:

$$\gamma = \frac{1}{2v_{ekv} + 1} \quad (37)$$

константи c_1 , c_2 :

$$c_1 = \frac{3\pi \sqrt{v_{ekv}}}{8k(v_{ekv} + 1)}; \quad c_2 = 0,5 \cdot \left(\frac{3\pi}{2k} \right)^{2v_{ekv}\gamma} \quad (38)$$

Δ_{ekv} – безрозмірний комплекс, що характеризує еквівалентну шорсткість поверхні:

$$\Delta_{ekv} = \frac{R \max_{ekv} \cdot b_{ekv}^{v_{ekv}}}{r} \quad (39)$$

v_{ekv} – параметр ступеневої апроксимації кривої Аббота;

b_{ekv} – безрозмірний параметр кривої опорної еквівалентної поверхні (за формулою 26)

У спрощеному вигляді формула (36) може бути записана:

$$I_h = \frac{0,6(1 - \mu^2) \cdot P_a}{\sqrt{v_{ekv}} (v_{ekv}^2 - 1) \cdot K_2 \cdot E \cdot n} \quad (40)$$

При досить гладких металевих поверхнях ($Ra=0,1 \dots 0,5$ мкм, для яких $v_{ekv} = 3$ і $\mu = 0,3$, $K_2 = 0,12$ [2]), справедливе спрощення формули (40):

$$I_h = \frac{0,6P_a}{E_{ekv} \cdot n} \quad (41)$$

Ця формула може бути рекомендована для приблизного розрахунку на зношування. Число циклів слід вибрати по кривій Веллера [2], враховуючи, що розтягуюче напруження σ_p приблизно дорівнює $5fPr$.

Як впливає з формули (36), інтенсивність зношування в умовах пружного контакту прямо пропорційна номінальному тиску P_a і обернено пропорційна до числа циклів n і еквівалентному модулю пружності E_{ekv} .

Проте саме число циклів є функцією номінального тиску і модуля пружності матеріалу, геометричної характеристики контакту і т. д. Відділення часток зношування відбувається в результаті перетину втомних тріщин. Очевидно, втомна тріщина утворюється під впливом розтягуючого напруження, що діє на контактній поверхні тертя.

Криву Веллера з деяким наближенням можна виразити як:

$$n = \left(\frac{\sigma_0}{\sigma_p} \right)^t \quad (42)$$

де t - показник кривої втоми, що змінюється в межах від 3 до 14 [2];

σ_0 - екстрапольоване значення еквівалентного напруження до $n = 1$;

σ_p - дійсне розтягуюче напруження.

Висновки. Таким чином, можна зробити висновок, що в умовах пружного контакту інтенсивність зношування залежить від топології мікрогеометричних характеристик спряжених поверхонь (b , v , $Rmax$, tm), механічних властивостей матеріалів (σ_0 , E , μ), коефіцієнта тертя f , втомної характеристики t і тисків - номінального P_a і контурного P_c . На інтенсивність зношування суттєвий вплив також мають такі чинники, як зовнішні умови тертя, механічні властивості матеріалів та мікротопологія спряжених поверхонь та їх фрикційні характеристики. Проте, у вищенаведених моделях відсутні такі важливі характеристики, як швидкість ковзання і пов'язана з нею температура трибоспряження, що можуть створити значущий вплив на закономірності зношування. Очевидно, що у імітаційних CAE моделях роботи машин і механізмів слід враховувати комплексну дію механічних та термодинамічних чинників.

1. Михайлов А.Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий. – Донецк: ДонНТУ, 2009. – 346 с.
2. Власьевский С.В. Методика триботехнического исследования механических узлов подвижного состава в условиях низких температур. Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2008. – 96 с.
3. Демкин Н.Б., Рыжов Э.В. Качество поверхности и контакт деталей машин. М.: Машиностроение, 1981.- 224 с.
4. Комбалов В.С. Влияние шероховатости твердых тел на трение и износ. М.: Наука, 1974. – 112 с.
5. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчета на трение и износ. М., «Машиностроение». 1977. – 526 с.
6. Мохель А.Н., Салганик Р.Л., Федотов А.А. Контактное взаимодействие упругих тел при наличии двух резко различных по протяженности шероховатости их границ// Вычислительная механика сплошных сред. М.: – 2008.- Т.1, №4. – С. 61-68.
7. Мышкин Н.К., Петроковец М.И. Трение, смазка, износ. Физические основы и технические приложения трибологии. М.: Физмаглит, 2007. – 368 с.
8. Сафонов Б.П., Бегова А.В. Инженерная трибология: оценка износостойкости и ресурса трибоспряжений. Новомосковск. Изд-во МХТУ им. Менделеева, 2004, – 65 с.
9. Сулов А.Г. Инженерия поверхности деталей – М.: Машиностроение, 2008. – 320 с.
10. Шнейдер Ю.Г. Эксплуатационные свойства деталей с регулярным микрорельефом. Л.: Машиностроение, 1982. - 247с.
11. Stupnytskyu Vadym. Computer aided machine-building technological process planning by the methods of concurrent engineering// Europäische Fachhochschule: Wissenschaftliche Zeitschrift, ORT Publishing. Stuttgart, Germany. № 3.- 2013 (Märzs-April). Section 13. – P.346-354.

Стаття надійшла до редакції 29.04.2013.