

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ПОВЕРХОНЬ ВИРОБУ З ВРАХУВАННЯМ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ЧИННИКІВ

© Ступницький В. В., 2016

Наведено методику моделювання зносостійкості поверхонь рухомих спряжень деталей машин в умовах їх потенційної експлуатації як результат управління цією експлуатаційною властивістю на стадії технологічної підготовки виробництва. Можливість прогнозувати певну величину зносостійкості під час задання характеристик якості поверхневого шару, що забезпечуються оптимальними методами оброблення, дає змогу підвищити експлуатаційні властивості виробу відповідно до концепції PLM.

**Ключові слова:** рухомі спряження деталей, моделювання зносостійкості, оптимальні методи оброблення, концепція PLM.

The technique of surface modeling durability conjugations of moving machine parts in terms of their potential use, as a result of operational management of the property at the stage of technological planning production is written in article. The ability to predict a certain amount of wear resistance when setting quality characteristics of the surface layer provided optimal treatment methods, improves performance properties of the product according to the PLM concept.

**Key words:** moving machine parts, modeling durability conjugations, optimal treatment methods, PLM concept.

**Постановка проблеми.** Серед методів підвищення зносостійкості поверхонь рухомих спряжень деталей машин особливе місце посідає процес управління цією експлуатаційною властивістю вже на стадії технологічної підготовки виробництва. Можливість прогнозувати певну величину зносостійкості за задання характеристик якості поверхневого шару, що забезпечуються оптимальними методами оброблення, дає змогу підвищити експлуатаційні властивості виробу, відповідно до концепції PLM. Проте вирішення цієї проблеми багато у чому ускладнене з таких причин: складність адекватної формалізації математичних моделей, що пов'язують показники зносостійкості з характеристиками якості поверхні і технологічними умовами оброблення, різноплановість підходів до описання фізики процесів зношування, розрізненість і суперечність відомостей із забезпечення зносостійкості, багатоваріантність під час вибору рішень, використання різних критеріїв при виборі умов зношування, матеріалів, характеристик якості поверхні, методів оброблення тощо. Враховуючи це, першочерговим завданням в умовах конструкторсько-технологічного забезпечення зносостійкості деталей повинна стати систематизація даних (інформації) про математичну модель процесу зношування і побудова на її основі сучасного методу проектування структури та параметрів функціонально-орієнтованих технологічних процесів з використанням обчислювальної техніки.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Тема та напрямок досліджень щодо формування експлуатаційних властивостей виробів на основі на стадії технологічної підготовки виробництва розглядаються у багатьох літературних джерелах [1–5]. Знаючи вплив технологічних чинників на якість оброблюваної поверхні, можна призначати умови та режими формоутворення, що

забезпечують досягнення заданих параметрів довговічності деталей машин у процесі їх потенційної експлуатації [6]. Істотний вплив мають сформовані мікрогеометричні параметри спряжених поверхонь на умови сухого або граничного тертя між ними. Сухе тертя виникає через те, що за малих зазорів за малої шорсткості мастило витискається із зони контакту. У результаті у зонах безпосереднього контакту поверхонь утворюються міцні металеві зв'язки, тобто відбувається їх прихоплювання, що, своєю чергою, спричиняє інтенсивніше зношування деталей. Феноменологічна модель тертя розглядає його як процес дисипації енергії, що перебігає за відносного тангенціального переміщення спряжених поверхонь, що здійснюється у зонах реального контакту, створеного під дією зовнішніх навантажень та в середовищі реальних умов взаємодії спряжених поверхонь виробів [2, 6]. У [2–4] доводиться, що під час наближення шорстких поверхонь під навантаженням спочатку дотикаються найвищі нерівності, що підпадають під дію значних локальних тисків, що призводить до значного стиску нерівностей, і введення в контактну взаємодію нових мікрорівнів. Це відбувається до того часу, поки загальна площа контакту не забезпечить несучу здатність поверхні відповідно до її розмірів, прикладеного ззовні навантаження, умов контакту та фізико-механічних властивостей матеріалів спряжених деталей. Як показують дослідження [2, 6–8], сформований у такий спосіб фактичний контакт майже на два порядки менший від номінального.

**Мета та постановка завдання досліджень.** Основною метою проведення досліджень є оцінка взаємного впливу основних технологічних параметрів на показники зносостійкості функціональних поверхонь у рухомих з'єднаннях машин та механізмів. Вплив режимів різання у процесі механічного оброблення деталей машин та механізмів на формування параметрів зносостійкості та втомної міцності виробів, як правило, здійснюється на основі проведення експериментів з методики одно- або багатofакторного експерименту. Такий шлях є надто дорогим та тривалим. Тому основним завданням, виконанням якого пропонується у цій роботі, є методика побудови прогнозуючих моделей впливу структури та параметрів технологічного процесу на формування комплексу експлуатаційних властивостей виробу.

**Основний зміст роботи.** Для спрощення розрахунку площі фактичного контакту найефективнішою є пропозиція Дьомкіна про шорстку еквівалентну поверхню, що акумулює шорсткість обох спряжених поверхонь і дає змогу обмежитись розглядом контакту такої еквівалентної поверхні та ідеально-гладкої [2]. Цей підхід ґрунтується на ступеневій апроксимації площі опорної поверхні  $\eta$  щодо опорної кривої з використанням апроксимуючих коефіцієнтів  $b$  і  $\nu_D$ , що описується такою формулою [2]:

$$h = b \cdot e^{\nu_D} . \quad (1)$$

Параметри  $b$  і  $\nu_D$  пов'язані з параметрами мікронерівностей відношеннями:

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

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

де  $t_m$  – відносна опорна довжина на рівні середньої лінії.

Для шорсткої еквівалентної поверхні сформульовані такі співвідношення:

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

$$\nu_D = \nu_{D1} + \nu_{D2}, \quad (5)$$

де  $k = \frac{\Gamma(\nu_{D1} + 1) \cdot \Gamma(\nu_{D2} + 1)}{\Gamma(\nu_{D1} + \nu_{D2} + 1)}$ ;  $\Gamma(\cdot)$  – гамма-функція.

Отже, ми можемо апроксимувати контурну площу спряжених поверхонь до вигляду контакту шорсткої поверхні з віртуальними показниками  $b$  і  $\nu_d$  і умовним радіусом заокруглення мікрогеометричної поверхні  $r^2$  з абсолютно гладкою поверхнею. Очевидно, що кожен мікровиступ деформується спочатку пружно, а потім пружно-пластично. При цьому вважається, що мікровиступ деформується абсолютно пружно за умови

$$\frac{R_{\max}}{r^2} < K_m \frac{S_T (1 - m^2)}{E}, \quad (6)$$

де  $r$  – радіус плями контакту;  $S_T$  – межа текучості матеріалу.  $K_m$  – коефіцієнт, що залежить від умов деформування [2]  $K_m = 6 \dots 8$ ;  $m$  – коефіцієнт Пуассона;  $E$  – модуль Юнга.

Іншим критерієм переходу від пружного контакту до пластичного є критерій Вільямсона–Грінвуда [7], або т. зв. індекс пластичності. При цьому вважається, що пластична текучість мікронерівності починається тоді, коли максимальний Герців тиск  $q_{\max}$  досягає значення  $0,6H$  ( $H$  – твердість найм'якішого з контактуючих матеріалів). Беручи до уваги апроксимаційну модель сферичної форми мікронерівності, за втискання кулі у площину, зближення  $y$  пов'язане з тиском співвідношенням:

$$y = \frac{p^2 q_{\max} m}{4 E^2}. \quad (7)$$

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

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

Для розрахунку контактних деформацій необхідно класифікувати спряжені поверхні за геометричною формою відповідно до форми змодельованих мікронерівностей, отриманих як векторна сума геометрично-кінематичної, вібраційної та деформаційної складової. Для них розроблені типові моделі розв'язання контактних задач пружності і пластичності. Так, моделювання взаємодії сферичної поверхні і пластичного площинного напівпростору вирішуємо за алгоритмом А. Ю. Ішлінського [9], моделюючи взаємодію плоского клина, розглядаємо задачу К. Хілла [10]; за циліндричної і плоскої поверхні використовуємо аналітичні залежності, сформульовані у задачі Прандтля [11] тощо.

Так, за пружного контакту сферичних виступів за формулою Герца можна розрахувати питомий контактний тиск за формулою [2, 7, 12] :

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

де

$$I = \frac{1 - m_1^2}{E_1} + \frac{1 - m_2^2}{E_2}; \quad J = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}; \quad (10)$$

$R_1, R_2$  – радіуси спряжених поверхонь;  $y$  – умовне зближення спряжених поверхонь.

У разі пластичної деформації для визначення контактного тиску використовують формулу Майєра:

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

де  $N_i$  – навантаження на індентор;  $d$  – діаметр відбитка;  $g, J$  – коефіцієнти, що характеризують пластичну властивість матеріалу.

Так, для спряження циліндричних поверхонь, отримаємо формулу [7]:

$$N_i = (8Rpr)^{J/2} g e^{J/2}. \quad (12)$$

Тоді контактний тиск визначаємо за формулою

$$q_r = \left( \frac{2H_M^{1/m_1} R_p}{a r} \cdot e \right)^{m_1}, \quad (13)$$

де  $m_1 = J/2 - 1$ ;  $H_M$  – твердість по Майєру, яку отримують за умови  $d = D$ , тобто за втискання сфери до екватора:

$$g = \frac{p H_M}{4D^{J-2}}. \quad (14)$$

Отже, підтверджується формула Герца [2]:

$$q_r = B(e)^w, \quad (15)$$

де  $B$  і  $\omega$  – коефіцієнти, що залежать від форми мікронерівностей і фізико-механічних властивостей матеріалу.

Загальна формула зближення спряжених шорстких поверхонь за класичного пружно-пластичного контакту визначатиметься за формулою [2, 7]:

$$y = \frac{N}{2prCs_T} + \frac{3}{8} I \sqrt{NpCs_T}. \quad (16)$$

У цій формулі перша частина визначає пластичну складову зближення, а друга – пружну.

Згідно з формулою (11), граничне пружне навантаження, що сприймається одиничним мікровиступом, можна подати у вигляді

$$N_i = q_r \Delta A_{ri} = B(e_i)^w \Delta A_{ri}, \quad (17)$$

де  $e = \frac{y_i}{R_{pk}}$  – відносне зближення поверхонь;  $\Delta A_{ri}$  – справжня площа плями контакту у разі такого 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 усіма виступами, що вступили у контакт, та з урахуванням умов еквівалентності (4) та (5) отримаємо [2]:

$$N = \frac{\Gamma(2+w)\Gamma(n+1)}{\Gamma(n+w+1)} a \cdot t_m \cdot A_c \cdot B \cdot e^{w+n}, \quad (18)$$

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

$$N = K_3 \cdot a \cdot t_m \cdot A_c \cdot B \cdot e^{w+n}. \quad (19)$$

Значення коефіцієнта  $K_3$  наведені у технічній літературі [1, 2].

Тоді формула відносного зближення набуде такого вигляду:

$$e = \left( \frac{q_r}{a \cdot K_3 \cdot t_m \cdot B} \right)^{1/(w+n)}. \quad (20)$$

Відносна площа контакту:

$$h = a^{\frac{w}{(n+w)}} \cdot t_m^{\frac{w}{(n+w)}} \cdot q_r^{\frac{n}{(n+w)}} \cdot K_3^{\frac{(n+w)}{n}} \cdot B^{\frac{(n+w)}{n}}, \quad (21)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт пружності мікровиступів (можна умовно прийняти  $\alpha=0,5$  у разі пружного контакту за умови забезпечення критерію Вільямсона–Грінвуда; або  $\alpha=1,0$  – у разі пластичного контакту за умови перевищення індексом пластичності величини 0,6Н) [2, 7];  $t_m$  – відносна опорна довжина по середній лінії профілограми мікронерівностей профілю;  $v$  – параметр кривої Аббота;  $B$ ,  $\omega$  – емпіричні коефіцієнти, що залежать від властивостей матеріалу [1, 3, 7].

Отже, під час моделювання трибоконтакту з урахуванням параметрів мікротопології поверхонь формули (1)–(3) повинні бути змінені, беручи до уваги необхідність формалізації еквівалентної поверхні відповідно до моделі Дьомкіна [2]:

$$n_{ekv} = n_1 + n_2; \quad (22)$$

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

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

$$K_p = \frac{(Rpk_1 + Rpk_2)^{n_{ekv}}}{Rpk_1^{n_1} Rpk_2^{n_2}}; \quad (25)$$

$$b_{ekv} = \frac{(R \max_1 + R \max_2)^{n_{ekv}}}{R \max_1^{n_1} R \max_2^{n_2}}; \quad (26)$$

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

$$K_v = \frac{(Rvk_1 + Rvk_2)^{n_{ekv}}}{Rvk_1^{n_1} Rvk_2^{n_2}}; \quad (28)$$

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

Середня несуча площа контакту залежить від навантаження на трибоконтакт у ступені, що змінюється від 1 до 0,2, причому домінуючий вплив має саме форма мікронерівностей, а не їхні висотні та крокові параметри.

Крім того, відомо з [13], 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 еквівалентної мікронерівності і приведений модуль пружності:

$$E_{ekv} = \frac{1}{\left(\frac{1 - m_1^2}{E_1}\right) + \left(\frac{1 - m_2^2}{E_2}\right)}, \quad (30)$$

де  $E_1$  і  $E_2$  – модулі пружності матеріалів спряжених контртіл;  $\mu_1$  і  $\mu_2$  – 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 такий 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 трибоконтакту спряжених поверхонь; де  $P_a$ ,  $P_r$  – номінальне та фактичне навантаження спряжених поверхонь;  $i$  – питома зношування, що являє собою кількість матеріалу, що видаляється з фактичної площі дотику на довжину  $d$ :

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

З аналізу формул (32)–(33) очевидно, що інтенсивність зношування визначається кількістю циклів, що призводять до відділення частки матеріалу, і відношенням номінального тиску до

фактичного. Кількість 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 у CAE-системі) [14].

У разі пружного контакту у зоні спряжених поверхонь кількість циклів  $n$  до руйнування визначається за формулою [3, 15]:

$$n = \left( \frac{S_0}{k \cdot f \cdot P_r} \right)^t, \quad (34)$$

де  $S_0$  – початкове екстрапольоване значення напружень за  $n = 1$ ;  $f$  – 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 ( $1 \leq t_x < 2$ ) –  $k = 4$ ; для пластичних матеріалів ( $t_x < 1$ ) –  $k = 3$ . Проте для матеріалів, що допускають виникнення значних пластичних матеріалів, але таких, що працюють у пружній області і лише для випадку виконання умови Вільямсона–Грінвуда (формула (6)):

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

де  $m$  – коефіцієнт Пуассона.

Тоді за пружного контакту інтенсивність зношування визначається за формулою [16]:

$$I_h = \frac{c_1 \cdot P_a^{1+gt}}{c} (\Gamma)^{f-gt-1} \left( \frac{kf}{S_0 c_2} \right)^t \cdot I \cdot \Delta^{gm}, \quad (36)$$

де приведений еквівалентний показник ступеня  $g$  визначається як

$$g = \frac{1}{2n_{ekv} + 1}, \quad (37)$$

а константи  $c_1, c_2$ :

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

$\Delta_{ekv}$  – безрозмірний комплекс, що характеризує еквівалентну шорсткість поверхні:

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

де  $v_{ekv}$  – параметр ступеневої апроксимації кривої Аббота;  $b_{ekv}$  – безрозмірний параметр кривої опорної еквівалентної поверхні (за формулою (26));  $I$  – коефіцієнт, що враховує вплив поверхневих залишкових напружень По роду на інтенсивність зношування визначається за формулою [8]:

$$I = \left( \frac{S_a - S_a^{II}}{S_a} \right)^{t_y}, \quad (40)$$

де  $S_a^{II}$  – залишкове напруження II роду, що визначається на основі аналізу реологічної моделі алотропних перетворень [17];  $S_a$  – справжнє значення еквівалентного напруження на поверхні тертя, що визначаються на основі аналізу CAE-моделі;  $t_y$  – коефіцієнт фрикційної втоми за пружного контакту спряжених поверхонь [20].

У спрощеному вигляді формула (36) може бути записана так:

$$I_h = \frac{0,6(1 - m^2) \cdot P_a \cdot I}{\sqrt{n_{ekv}} (n_{ekv}^2 - 1) \cdot K_2 \cdot E \cdot n}. \quad (41)$$

За доволі гладких металевих поверхонь ( $R_a=0,1\dots0,5$  мкм, для яких  $v_{ekv} = 3$  і  $\mu = 0,3$ ,  $K_2 = 0,12$  [18]), справедливе спрощення формули (41):

$$I_h = \frac{0,6P_a \cdot l}{E_{ekv} \cdot n}. \quad (42)$$

Формула (42) може бути рекомендована для приблизного розрахунку на зношування. Кількість циклів потрібно вибрати по кривій Веллера [18], враховуючи, що розтягувальне напруження  $\sigma_r$  приблизно дорівнює  $5fP_r$ .

Як впливає з формули (36), інтенсивність зношування в умовах пружного контакту прямо пропорційна до номінального тиску  $P_a$  і обернено пропорційна до кількості циклів  $n$  і еквівалентного модуля пружності  $E_{ekv}$ .

Можна зробити висновок, що в умовах пружного контакту інтенсивність зношування залежить від топології мікрогеометричних характеристик спряжених поверхонь ( $b$ ,  $v$ ,  $R_{\max}$ ,  $t_m$ ), механічних властивостей матеріалів ( $\sigma_0$ ,  $E$ ,  $\mu$ ), коефіцієнта тертя  $f$ , втомної характеристики  $t$  і тисків: номінального  $P_a$  і контурного  $P_c$ .

У складнішому випадку пластичного контакту шорстких поверхонь (коли умова Вільямсона–Грінвуда (8) не виконується, тобто індекс пластичності перевищує значення 0,6Н) та з врахуванням теорії еквівалентної поверхні (модель Демкіна (формули (22)–(29)), об'єм зношеного матеріалу  $V_b$  визначаємо за формулою І. В. Крагельського [3]:

$$V_b = A_c \cdot R_{\max_{ekv}} b_{ekv} \int_0^e x^{n_{ekv}} dx = \frac{A_c \cdot R_{\max_{ekv}} b_{ekv} \cdot e^{n_{ekv}}}{n_{ekv}} = \frac{e \cdot A_r \cdot R_{\max_{ekv}}}{n_{ekv} + 1}, \quad (43)$$

де  $x$  – відстань від середньої лінії мікронерівностей до лінії виступів виражена у відносних одиницях:

$$x = \frac{P}{R_{\max_{ekv}}}, \quad (44)$$

$\varepsilon$  – відносне зближення спряжених поверхонь, що визначається за формулою (20), але з врахуванням еквівалентності показників – відносної опорної довжини по середній лінії профілографи мікронерівностей профілю  $t_{mekv}$  та параметра ступеневої апроксимації кривої Аббота  $v_{ekv}$ .

Отже, у разі пластичного контакту мікронерівностей спряжених поверхонь інтенсивність зношування можна описати такою формулою:

$$I_h = \frac{a \cdot b_{ekv} \cdot e^{(n_{ekv}+1)} \cdot R_{\max_{ekv}} \cdot l}{(n_{ekv} + 1) \cdot n \cdot d}. \quad (45)$$

Аналізуючи формули (36) і (45), можна зробити висновок, що на інтенсивність зношування істотний вплив мають такі чинники, як зовнішні умови тертя, механічні властивості матеріалів та мікротопологія спряжених поверхонь і їх фрикційні характеристики. Причому саме структура та параметри технологічного процесу механічного та хіміко-термічного оброблення та зміцнення функціональних поверхонь визначатимуть більшість з цих параметрів [19]. Проте у вищенаведених моделях відсутні такі важливі характеристики, як швидкість ковзання і пов'язана з нею температура трибоспряження, що можуть створити значний вплив на закономірності зношування [12]. Отже, потрібно враховувати комплексну дію механічних та термодинамічних чинників в імітаційних САЕ-моделях роботи машин і механізмів.

Зношування і температура у трибоспряженнях залежно від вихідних параметрів мікротопології поверхонь змінюються симбатно. Тобто за прямої залежності коефіцієнта тертя до зношування за пружно-пластичного контакту можна визначити мінімум на кривій температура-шорсткість. Відповідно до термофлуктаційної теорії С. М. Журкова [3, 16], зносостійкість матеріалу повинна бути обернено пропорційна до температури у фрикційному контакті. В умовах сталого навантаження і швидкості ковзання найменша температура у зоні трибоконтракту

відповідатиме мінімальному значенню коефіцієнта тертя. Якщо вважати режим тертя усталеним, а отже, термофізичні властивості матеріалів спряжених деталей постійними, то отримаємо середню температуру у контакті:

$$t_{\min} = \frac{f_{\min} \cdot p \cdot V}{(I_1 \cdot K_1 + I_2 \cdot K_2) \cdot A_a}, \quad (46)$$

де  $\lambda_1, \lambda_2$  – коефіцієнти теплопровідності спряжених поверхонь;  $K_1, K_2$  – емпіричні коефіцієнти теплофізичних та геометричних властивостей матеріалів спряжених поверхонь, відповідно [3,16];  $A_a$  – номінальна площа трибоконтакту.

Отже, мінімальному значенню температури і відповідатиме мінімальне зношування.

**Висновки.** Впровадження комплексної системи забезпечення життєвого циклу виробу (PLM) вимагає врахування умов експлуатації найнавантажених деталей у виробі не лише на стадії конструювання та призначення норм точності виробів, але й на етапі проектування технології їх виготовлення. Основні параметри мікротопології поверхонь, що найбільше впливають на інтенсивність зношування, формуються залежно від структури та параметрів технологічного процесу і є наслідком напружено-деформованого стану оброблюваних поверхонь, вібрацій лезового інструмента тощо. Доведено, що в умовах конкретної експлуатаційної ситуації фактично завжди можна виділити домінуючий вид тертя, що призводить до зношування функціональної поверхні з найбільшою інтенсивністю. Для виявлення провідного виду зношування в умовах потенційної експлуатації виробу в САЕ-системі повинна бути врахована додаткова умова, що впливає з аналізу кінетики руйнування спряжених поверхонь: за сталого зношування інтенсивність руйнування спряжених поверхонь не повинна перевищувати швидкості процесу, що визначає вид зношування, тобто

$$I_{\text{руйн}} \leq I_h. \quad (47)$$

Впровадження функціонально-орієнтованих технологічних процесів передбачає виконання етапу моделювання та аналізу напружено-деформованого стану виробу у процесі його формоутворення, реалізований в САЕ-системі та етапів розрахунку технологічної складової локальних критеріїв – інтенсивності зношування функціональних поверхонь, коефіцієнта запасу за показником втомної міцності, показника динамічної якості трибоспряжень, коефіцієнта запасу рідинного трибоконтакту функціональних поверхонь деталі та параметра корозійної стійкості (фретінг-корозії) в умовах потенційного функціонування виробу залежно від варіативної структури та параметрів функціонально-орієнтованого технологічного процесу формоутворення цих поверхонь [5, 19].

1. Валетов В. А. Микрогеометрия поверхностей деталей и их функциональные свойства / В. А. Валетов, А. Ю. Иванов // Известия вузов “Приборостроение”. – 2010. – Т. 53, № 8. – С. 7–11. 2. Демкин Н. Б. Качество поверхности и контакт деталей машин / Н. Б. Демкин, Э. В. Рыжов. – М.: Машиностроение, 1981. – 224 с. 3. Крагельский И. В. Основы расчета на трение и износ / И. В. Крагельский, М. Н. Добычин, В. С. Комбалов. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с. 4. Маталин А. А. Технология машиностроения / А. А. Маталин. – СПб.: Издательство “Лань”, 2010. – 512 с. 5. Ступницький В. В. Структурно-параметрична оптимізація технологічних процесів при забезпеченні експлуатаційних властивостей деталей / В. В. Ступницький // Східно-Європейський журнал передових технологій. – Харків, 2014. – №2/3(68). – С. 9–16. 6. Ступницький В. В. Триботехнічний критерій формування функціонально-орієнтованої технології виготовлення деталей у машинобудуванні / В. В. Ступницький, Є. М. Махоркін // Зб. наук. пр. Луцького національного технічного університету “Наукові нотатки”. – Луцьк, 2013. – Вип. №42. – С. 305–313. 7. Мышкин Н. К. Трение, смазка, износ. Физические основы и технические приложения трибологии / Н. К. Мышкин, М. И. Петроковец. – М.: Физматлит, 2007. – 368 с. 8. Суслов А. Г. Инженерия поверхности деталей / А. Г. Суслов. – М.: Машиностроение, 2008. – 320 с. 9. Ишлинский А. Ю.

Математическая теория пластичности / А. Ю. Ишлинский, Д. Д. Ивлев. – М.: Физматлит, 2001. – 702 с. 10. Hill K. *The Mathematical Theory of Plasticity* / K.Hill. – Oxford: Clarendon Press, 1990. – 396 p. 11. Прандтль Л. Применение теории Генки к равновесию пластических деформаций / [В кн.: Теория пластичности; под ред. Ю. Н. Работнова]. – М.: Иностранная литература, 1968. – С. 51–55. 12. Сафонов Б. П. Инженерная трибология: оценка износостойкости и ресурса трибосопряжений / Б. П. Сафонов, А. В. Бегова. – Новомосковск.: Изд-во МХТУ им. Менделеева, 2004. – 65 с. 13. Мохель А. Н. Контактное взаимодействие упругих тел при наличии двух резко различных по протяженности шероховатости их границ / А. Н. Мохель, Р. Л. Салганик, А. А. Федотов // Вычислительная механика сплошных сред. – М.: МФТИ. – 2008. – Т.1, №4. – С. 61–68. 14. Ступницький В. В. Структура та функції системи автоматизованої технологічної підготовки машинобудівного виробництва на основі концепції функціонально-орієнтованого проектування операцій / В. В. Ступницький // Міжнародний науковий журнал “Технологічні комплекси”. – Луцьк, 2013. – № 2(8). – С. 65–71. 15. Трение, изнашивание и смазка: справочник: в 2-х кн.; под ред. И. В. Крагельского, В. В. Алипина. – М.: Машиностроение. – 1978. – Кн.1. – 400 с. 16. Комбалов В. С. Методы и средства испытаний на трение и износ конструкционных и смазочных материалов: справочник / В. С. Комбалов, Е. А. Марченко; под. ред. К. В. Фролова. – М.: Машиностроение, 2008. – 296 с. 17. Dolyniak Yaroslav, Stypnytskyu Vadym. Rheological modeling and analysis of the influence of technological factors on the 2nd kind’s residual stresses formation/ *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences*. – “East West” Association for Advanced Studies and Higher Education GmbH. – 2015. – №9–10. 18. Власьевский С. В. Методика триботехнического исследования механических узлов подвижного состава в условиях низких температур / С. В. Власьевский. – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2008. – 96 с. 19. Ступницький В. В. Проектування функціонально-орієнтованих технологій механічного оброблення деталей засобами паралельного інжинірингу / В. В. Ступницький // Вісник Донецького національного технічного університету “Прогресивні технології і системи машинобудування”. – 2013. – Вип. 1 (45), 2 (46). – С. 249–256. 20. Электронные, ионные и плазменные технологии . Приложение № 1 // Инженерный журнал. – 2000. – № 1. – 24 с.