

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ВЗАЄМОДІЇ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ПОВЕРХОНЬ ПЛУНЖЕРНИХ ПАР ПІД ЧАС ЕКСПЛУАТАЦІЇ

В статті запропоновано спосіб оцінки контактної взаємодії фрикційних плунжерних пар, який враховує мікрогеометричні параметри та фізико-механічні властивості поверхневого шару спряжених деталей що трунтується на теорії про еліптичну форму мікроступів поверхневого шару. Наведено фрагменти моделювання процесу контактної взаємодії співвісного ковзаючого контакту двох поверхонь, у вигляді контакту циліндричного плунжера та втулки з еквівалентними значеннями параметрів шорсткості, хвилястості і макровідхилень. В результаті порівняння розрахункових і фактичних значень параметрів зносостійкості підтверджено принагідність даного підходу до моделювання процесів контактної взаємодії поверхонь тертя Отримано результати, які підтверджують адекватність запропонованої моделі.

Ключові слова: зносостійкість, шорсткість, хвилястість, модель, дотичні поверхні.

Постановка проблеми. Якісні характеристики циліндричних плунжерних пар залежать від типу контактної взаємодії спряжених поверхонь деталей, умов роботи та якості їх поверхневого шару. Відома значна кількість моделей для аналізу та оцінки фрикційної взаємодії, однак переважна більшість існуючих моделей є адекватними тільки для площинних поверхонь. Таким чином, дослідження та розробка моделей для спряжених поверхонь деталей типу «тіло обертання» є актуальною науково-практичною задачею.

Аналіз останніх досліджень. Дослідженнями питання спряжених поверхонь обертання займалися Демкин Н.Б., Крагельський І.В., Сулов А.Г. Беляев Н.М, Герцем Г., Динник А.Н. та інші науковці. Внаслідок наявності на дотичних поверхнях хвилястості та шорсткості, контакт спряжених тіл носить дискретний характер, відповідно до цього, зони контакту доцільно розглядати за законом розподілу контактного тиску. Отже, модель шорсткості поверхневого шару може бути представлена набором еліптичних виступів, причому їх необхідно описати параметрами, які характеризують їх геометричну форму.

Формулювання цілей статті. Для спрощення та візуалізації кінцевого результату необхідно обрати модель одиничного виступу з ряду елементарних геометричних фігур. В результаті опрацювання експериментальних даних було побудовано моделі елементарних поверхонь з нерівностями у вигляді сферичних сегментів, стержнів, пірамід, еліпсоїдів. Із запропонованих варіантів форм нерівностей найбільш повно задовольняють всі умови сферична, циліндрична та еліпсоїдальна моделі. Сферична модель містить похибку зміни радіусів кривизни в поздовжньому та поперечному напрямках, які еквівалентні радіусам округлень. Циліндрична модель передбачає сталість середнього розміру фактичної зони контакту при зміні навантаження, що суперечить отриманим експериментальним даним [1]. Еліпсоїдальна модель є найбільш адекватною, особливо для тих поверхонь, технологія формування яких пов'язана з різанням та поверхневим пластичним деформуванням поверхневого шару. Аналіз цих моделей дав право стверджувати, що під час розрахунку площі контакту результати за стрижневою моделлю відрізняються від результатів за еліпсоїдальною моделлю на 25...30%, а розрахунки за сферичною від еліпсоїдальної на 10...15%, тому в якості робочої гіпотези обрано еліпсоїдальну модель.

Виклад основного матеріалу. Моделювання процесу контактної взаємодії наведено на прикладі співвісного ковзаючого контакту двох поверхонь обертання, у вигляді контакту циліндричного плунжера та втулки з еквівалентними значеннями параметрів шорсткості, хвилястості і макровідхилень. При цьому враховуються пружні деформації спряжених тіл, а також пружнопластичні деформації мікронерівностей. В процесі моделювання геометричного контакту розглядається певна ділянка поверхні, розташована вздовж твірної в перерізі площиною, що проходить через її центр. Дана елементарна ділянка є фрагментом загальної геометричної площі контакту, ширина якого визначається довжиною еліптичного параболоїда під час моделювання хвилястості. Допускаючи, що на всій спряженій поверхні контактна взаємодія відбувається аналогічно, можна ввести масштабний коефіцієнт:

$$K_0 = 400A / (\pi R p Smw tmw), \quad (1)$$

де A – геометрична площа контакту; R – приведений радіус спряжених сфер; Sm_w, tm_w – параметри хвилястості; p – коефіцієнт, що враховує співвідношення довжин фокусів еліптичних параболоїдів.

Номінальна площа контакту визначається виходячи з припущення, що одна зі сфер має сумарну величину макровідхилень H_{max} й набуває внаслідок їх наявності форму еліпсоїда, велика піввісь якого розташовується відповідно кута контакту, який дорівнює 0 або 90° в полярній системі координат (рис. 1). Якщо вважати, що сумарна величина макровідхилень мала в порівнянні з величиною радіусу R , то з рис. 1 отримаємо:

– для випадку (а): $\beta \in [0; \beta]$, $\beta = \arcsin \left[\frac{(R - H_{max})}{R} \right]$;

– для випадку (б): $\beta \in [\beta_1; \beta_2]$, $\beta = \arccos \left[\frac{(R - H_{max})}{R} \right]$;

де β_2 – характеризується геометричними (конструктивними) характеристиками спряження.

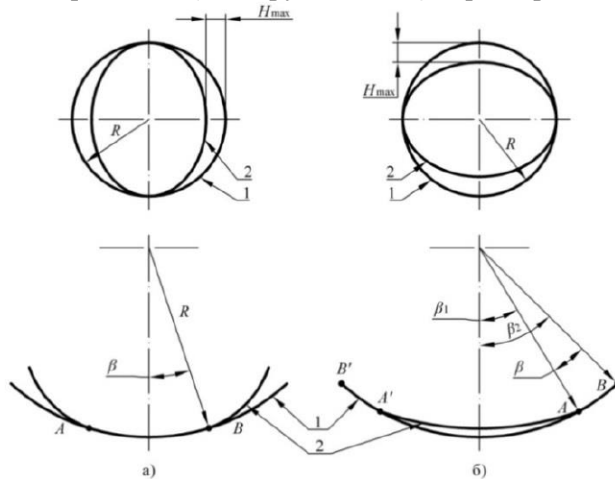


Рис. 1. Контакт дотичних поверхонь при наявності макровідхилень: 1, 2 – спряжені циліндричні поверхні плунжерної пари; АВ, А'В' – ділянки поверхні контакту; R – радіус сфери; β, β_1, β_2 – кути, що визначають ділянки поверхні контакту

На ділянках номінальної площі контакту присутня шорсткість та хвилястість, модель якої є набором деформованих під навантаженням еліптичних параболоїдів 2-го порядку, вершини яких мають певний закон розподілу (рис. 2).

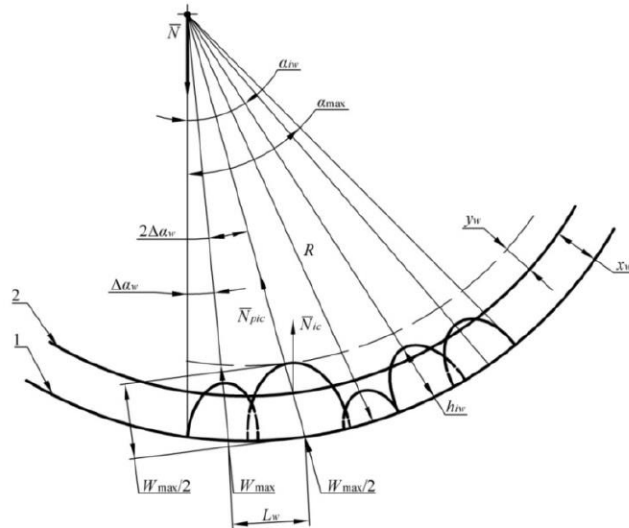


Рис. 2. Розрахункова схема для моделювання контакту циліндричних поверхонь при $\beta \in [0; \beta]$: 1, 2 – дотичні поверхні тертя; y_w – зближення контактуючих поверхонь; x_w – рівень перерізу моделі поверхонь

Для цієї моделі перерізи, отримані від перерізу функціонального профілю площиною, перпендикулярною середній площині, будуть параболи 2-го порядку, а площиною, паралельною середній площині – еліпси (рис. 3). Площа перетину i -го параболоїда на рівні x_w характеризується виразом:

$$P_{iw} = p\pi\varphi_w^2 \frac{(h_{iw} - x_w)}{h_{iw}}, \quad (2)$$

де $p_w = \frac{Smw tmw}{200}$.

Закон і параметри розподілу висот виступів параболоїдів визначаються з умови рівності відносних опорних площ профілю реальної поверхні і моделі. Наведемо функцію щільності розподілу висот виступів у вигляді експоненційної функції:

$$f(h_w) = \lambda e^{-\lambda(h_w - W_{\max}/2)}, \quad (3)$$

де λ – параметр розподілу.

З огляду на зміну значень висот виступів хвилястості $h_w \in [W_{\max}/2; W_{\max}]$ (рис. 4) отримаємо:

$$f(h_w) = \begin{cases} \lambda \exp(-\lambda[h_w - W_{\max}/2]); & W_{\max}/2 \leq h_w \leq W_{\max}; \\ 0; & h_w \leq W_{\max}/2, h_w > W_{\max}. \end{cases} \quad (4)$$

Тоді функція (закон) розподілу висот виступів (рис. 5) буде мати вигляд:

$$F(h_w) = \int (h_w) dh_w, \quad (5)$$

а з урахуванням (3) і границь значень h_w :

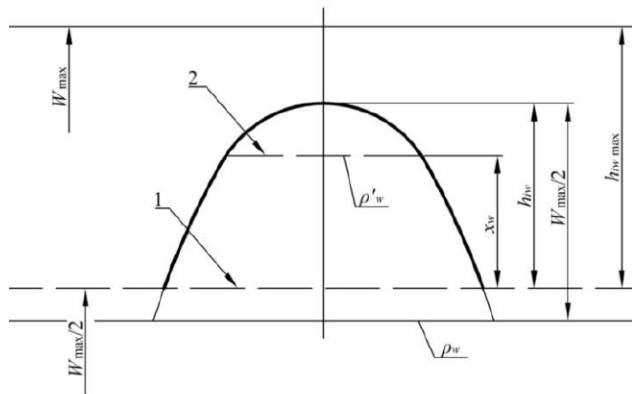


Рис. 3. Форма виступів моделі хвилястої поверхні; 1, 2 – дотичні поверхні тертя; ρ_w, ρ'_w – довжина поперечних півосей еліпсів на рівні середньої площини і рівні перетину X_w відповідно; h_{iw} – висота i -го виступу моделі хвилястої поверхні; W_{\max} – максимальна висота профілю хвилястості

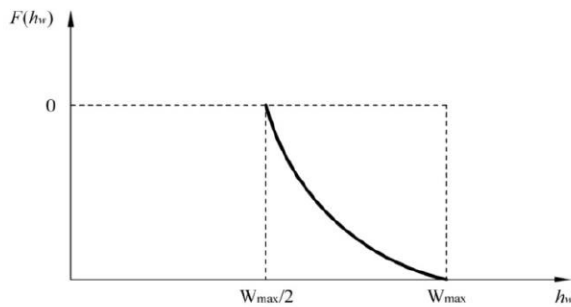


Рис. 4. Функція щільності розподілу висот виступів моделі

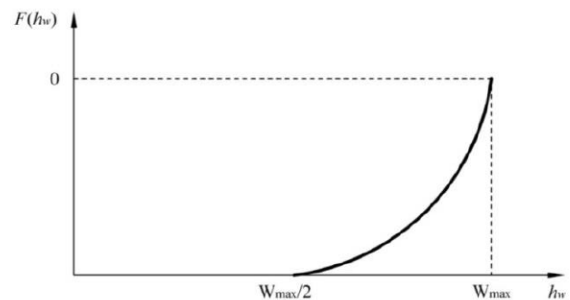


Рис. 5. Функція розподілу виступів моделі

$$F(h_w) = \begin{cases} 0; & h_w \leq W_{\max}/2; \\ 1 - \exp(-\lambda[h_w - W_{\max}/2]); & W_{\max}/2 \leq h_w \leq W_{\max}; \\ 1; & h_w > W_{\max}. \end{cases} \quad (6)$$

Значення висот виступів будуть визначатися в результаті розв'язку рівняння $F(\xi) = \eta$, де η – випадкова величина, рівномірно розподілена на відрізку $[0; 1]$, який є областю зміни функції $F(h_w)$. Випадкова величина ξ має щільність розподілу, аналогічну $f(h_w)$.

Тоді:

$$\eta = 1 - \exp(-\lambda[\xi - W_{\max}/2]). \quad (7)$$

З (7) отримаємо:

$$\xi = W_{\max} (0,5 - \ln(1 - \eta) / \lambda). \quad (8)$$

З урахуванням (6) і (8) висота виступів розподіляється наступним чином:

$$h_{iw} = \begin{cases} W_{\max} / 2; & \eta = 0; \\ W_{\max} (0,5 - \ln(1 - \eta) / \lambda); & 0 < 1 < \exp(-\lambda W_{\max} / 2); \\ W_{\max}; & 1 - \exp(-\lambda W_{\max} / 2) \leq \eta \leq 1. \end{cases} \quad (9)$$

Параметр розподілу λ безпосередньо впливає на вигляд кривої $f(h_w)$ та знаходиться виходячи з рівності відносних опорних площ профілю реальної поверхні $tp(x_w)$ і моделі $\tilde{P}_w(x_w)$ на рівні перетину x_w , під час вирішення рівняння:

$$Z_{\min} = \int_{W_{\max}/2}^{W_{\max}} [\tilde{P}_w(x_w) - tp(x_w)]^2 dx_w. \quad (10)$$

Після інтегрування (10) будемо мати значення λ , яке визначається з рівняння:

$$0,024\lambda^3 + \frac{0,6b_w(2^{v_w+2} - 1)}{(v_w + 2)2^{v_w+2}} + \frac{b_w(1 - 2^{v_w+2})}{(v_w + 2)2^{v_w+2}} + \frac{1,38b_w(2^{v_w+2} - 1)}{(v_w + 2)2^{v_w+2}} = 0. \quad (11)$$

Визначивши конфігурацію поверхні, можна знайти контурну площу контакту. Положення вершин виступів моделі буде визначатися кроком між вершинами параболоїдів, рівним середньому кроку по вершинах локальних виступів хвилястості L_w (рис. 2).

$$\Delta\alpha_w = \arcsin\left[\frac{L_w}{2R}\right]. \quad (12)$$

Враховуючи, що контурна площа контакту моделюється на номінальних ділянках, обмеженою кутом β (рис 1) положення i -тої вершини параболоїда визначатиметься наступним чином:

$$\text{– для випадку (а): } \begin{cases} \alpha_{iw} \in [0; \beta], \\ \alpha_{iw} = \Delta\alpha_w, \\ \alpha_{iw} = \alpha_{(i-1)w} + 2\Delta\alpha_w; \end{cases} \quad (13)$$

$$\text{– для випадку (б): } \begin{cases} \alpha_{iw} \in [\beta_1; \beta_2], \\ \alpha_{iw} = \beta_1 + \Delta\alpha_w, \\ \alpha_{iw} = \alpha_{(i-1)w} + 2\Delta\alpha_w; \end{cases} \quad (14)$$

Площа перерізу i -го параболоїда для ділянок контурної площі контакту, обмеженої (13) і (14), з урахуванням пружних деформацій виступів:

$$P_{ic} = p\pi p_w^2 \left(\frac{h_{iw} - x_w - y_{np.w}}{h_{iw}} \right), \quad (15)$$

де величина пружних деформацій з урахуванням [2]:

$$y_{np.w} = (1 - \mu)ck\sigma_T P_{iw} / (\pi E). \quad (16)$$

Реакція кожного виступу:

$$N_{ic} = ck\sigma_T P_{iw} (1 + f^2)^{0,5} \cos\alpha_{iw}, \quad (17)$$

де f – коефіцієнт тертя.

Шорстка поверхня моделюється на ділянках контурної площі контакту аналогічно наведеній методиці моделювання хвилястості. У виразах (1)...(12) необхідно замінити величини $K_o, Smw, tmw, P_{iw}, p_w, h_{iw}, x_w, W_{\max}, h_w, \lambda, \tilde{P}_w, b_w, v_w, \Delta\alpha_w, L_w$, на величини $K_{or}, Sm, tm, P_{irj}, p_r, h_{ijr}, x_r, R_{\max}, h_r, \lambda_r, \tilde{P}_r, b, v, \Delta\alpha_r, S$ відповідно.

Фактична площу контакту, на якій моделюється конфігурація шорсткої поверхні, буде визначатися наступним способом: положення вершин виступів моделі буде визначатися кроком між вершинами параболоїдів, рівним середньому кроку по вершинах локальних виступів шорсткості,

$$\Delta\alpha_r = \arcsin\left[\frac{S}{2R}\right]. \quad (18)$$

З огляду на те, що фактична площу контакту моделюється на ділянках контурної, тобто на перетинах параболоїдів, що вступили в контакт при моделюванні хвилястої поверхні (для

яких $h_{iw} > x_w + y_{np.w}$, положення ij -ї вершини параболоїда при моделюванні шорсткої поверхні (рис. 6):

$$\begin{cases} \alpha_{irj} \in [\alpha_{ira}; \alpha_{irb}] \\ \alpha_{irj} = \alpha_{ira} + \Delta\alpha_r, \\ \alpha_{ira} = \alpha_{ir(j-1)} + 2\Delta\alpha_r, \end{cases} \quad (19)$$

де $\alpha_{ira} = \alpha_{iw} - \delta\alpha_{ir}$; $\alpha_{irb} = \alpha_{iw} + \delta\alpha_{ir}$; $\delta\alpha_{ir} = \arctg \left[\frac{(p_w (h_{iw} - x_w)^{0.5})}{\{(R - x_w)(W_{\max} / 2)\}^{0.5}} \right]$.

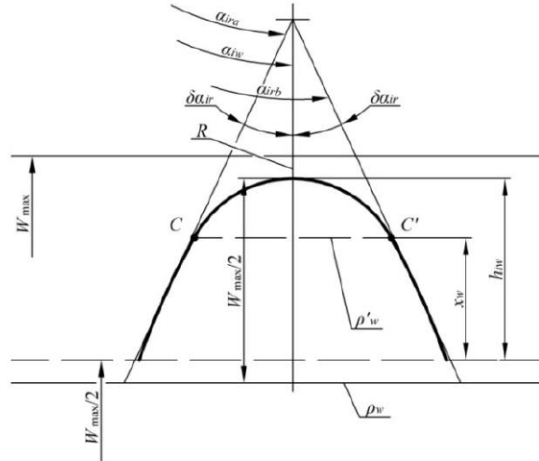


Рис. 6. Зона моделювання шорсткої поверхні на виступах хвиль: CC' – зона моделювання фактичної площі контакту

Площа перерізу ij -го параболоїда для ділянок фактичної площі контакту, обмеженої (19), з урахуванням пружних деформацій виступів дорівнює:

$$P_{ijr} = p\pi\rho_w^2 (h_{ijr} - x_r - y_{np.r}) / h_{ijr}, \quad (20)$$

де величина пружних деформацій з урахуванням [3]:

$$y_{np.r} = (1 - \mu^2) ck\sigma_T P_{irj} / (\pi E). \quad (21)$$

Реакція кожного виступу:

$$N_{ijr} = ck\sigma_T P_{irj} (1 + f^2)^{0.5} \cos\alpha_{irj}. \quad (22)$$

Параметри, що характеризують контактну взаємодію поверхонь тертя, розраховуються шляхом проведення за допомогою ПК статистичних випробувань над моделями процесу контактної взаємодії на основі реалізації наступного алгоритму:

1. Введення вихідних даних, до яких відносяться геометричні параметри спряжених деталей; параметри якості їх поверхневих шарів; необхідні експлуатаційні показники пари тертя;

2. Визначення геометричного контакту з використанням виразу (1);

3. Знаходження номінальної площі контакту для двох варіантів контакту: (а) $\beta \in [0; \beta]$, (б) $\beta \in [\beta_1; \beta_2]$.

4. Визначення контурної площі контакту на ділянках номінальної.

Положення вершин параболоїдів розраховується за (12)...(14), а розподіл висот виступів визначається з (9) і (11).

Здається деяка величина зближення y_w , зумовлена рівнем перерізу $x_w \in [W_{\max} / 2; W_{\max}]$, (рис. 2), і оцінюється виконання нерівності:

$$\left| (K_o \sum N_{ic} - N) / N \right| \leq \varepsilon, \quad (23)$$

де N – зовнішнє навантаження.

При цьому розглядаються виступи, які вступили в контакт ($h_{iw} > x_w + y_{np.w}$). Виконання нерівності (23) свідчить про те, що знайдена величина зближення, при якій сформувалася контурна площа контакту здатна витримати зовнішнє навантаження.

5. Визначення фактичної площі контакту на ділянках контурної. Для параболоїдів хвилястої поверхні, що вступили в контакт ($h_{iw} > x_w + y_{np.w}$ величина x_w визначена при виконанні нерівності (23)), розраховується положення вершин параболоїдів для шорсткої поверхні за (18),

(19) і розподіл висот виступів згідно (9), (11) з урахуванням підстановки в дані виразів відповідних параметрів шорсткості. Здається величина зближення y_r , зумовлена рівнем перерізу $x_r \in [R_{\max} / 2; R_{\max}]$, і оцінюється виконання нерівності:

$$\left| (K_{or} \sum N_{ijr} - N) / N \right| \leq \varepsilon, \quad (24)$$

При цьому розглядаються виступи, які вступили в контакт, для яких $h_{ijr} > x_r + y_{zm.r}$. Виконання нерівності (24) свідчить про те, що знайдена величина зближення, при якій утворилася фактична площа контакту здатна витримати зовнішнє навантаження.

6. Розподіл контурних тисків уздовж твірної поверхні. Під дією навантаження відбувається не тільки пластична деформація вершин окремих виступів, а й пружне занурення зони пластичних деформацій в основний метал. В процесі пластичної деформації тиск постійний і дорівнює $kH\mu_0$ [3, 4]. Для пружної деформації виступів, що утворюють площу контакту у вигляді еліпса, контурний тиск вздовж твірних поверхні з урахуванням [51] визначається як:

$$q_c(\alpha) = 0,3K_e (\sum_{KW} y_r)^{0,5} I^{-1} \cos \alpha_i, \quad (25)$$

де пружна постійна $I = \frac{(1-\mu_1^2)}{(\pi E_1)} + \frac{(1-\mu_2^2)}{(\pi E_2)}$; сума головної кривизни $\sum_{KW} = \frac{1}{\rho_{wnon}} + \frac{1}{\rho_{wnp}}$;

ρ_{wnon} , ρ_{wnp} – радіуси округлення хвиль; K_e – коефіцієнт зближення:

$$y_r = R_{\max} / 2 - x_r - y_{np.r}, \quad (26)$$

7. Розрахунок очікуваної швидкості зношування спряжених поверхонь у відповідності до моделі зношування:

$$J_i(\alpha) = K_J C_X^m(\alpha) C_F^n(\alpha). \quad (27)$$

Порівняння розрахункових і фактичних значень параметрів зносостійкості показало достовірність даного підходу до моделювання процесів контактної взаємодії спряжених циліндричних поверхонь тертя.

Висновок. Знаючи регламентовані значення зносостійкості спряженої пари та використовуючи наведену модель контактної взаємодії можливо знайти значення параметрів k та C_x , необхідні для забезпечення необхідної зносостійкості. При цьому не потрібно виконувати натурні випробування. В залежності від регламентованих значень коефіцієнтів зміцнення поверхневого шару k і параметра C_x проводиться вибір технологічних методів і режимів механічного оброблення. Кожен із вказаних технологічних методів оброблення має свої особливості та області застосування, що характеризуються визначеними факторами, які обумовлюють процес формування параметрів якості оброблюваних поверхонь деталей. Кожному з факторів притаманні свої кількісні та якісні характеристики: регламентовані висотні та крокові параметри нерівностей, ступінь та глибина зміцнення; величина, знак та глибина залягання залишкових напружень. Запропонований підхід дозволяє шляхом проведення статистичних випробувань над імітаційними моделями виконувати науково обґрунтований вибір технологічних методів та режимів оброблення. Також було проведено експериментальну перевірку запропонованої моделі, яка підтвердила правомірність даного підходу до вирішення завдання забезпечення регламентованої зносостійкості фрикційних циліндричних поверхонь.

Інформаційні джерела

1. V. Zablotskyi, O. Dahnyuk, S. Prystupa, A. Tkachuk Formation of physical and mechanical properties of surface layer of machine parts. Mechanics, Materials Science & Engineering Journal. Volume 8, March 2017, Pages 87-98, DOI: 10.2412/mmse.99.57.43.

2. Заблоцький, В.Ю. Технологічне забезпечення зносостійкості робочих поверхонь спряжених деталей методами зміцнювально-вигладжувального оброблення / В.Ю. Заблоцький, А.А. Ткачук, О.П. Дахнюк // Системи розроблення та поставлення продукції на виробництво : матеріали І Міжнародної науково-практичної конференції, м. Суми, 17-20 травня 2016 р. / Ред.кол.: О.Г. Гусак, К.О. Дядюра. - Суми : СумДУ, 2016. - С. 138-139.

3. Приступа С.О. Характеристика оброблюваності металів різанням в контексті оптимізації енерговитрат в процесі механічного оброблення / С.О. Приступа // Технологічні комплекси. - 2013. - №2(8). - С. 160-163.

4. Мороз С.А. Дослідження мікрогеометричних параметрів поверхні деталі після зміцнювально-вигладжувального оброблення / С.А. Мороз, В.В. Пташенчук // Вісник

Ткачук А.А., к.т.н., Кононенко А.С.

Луцкий национальный технический университет

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПЛУНЖЕРНЫХ ПАР ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ

В статье предложен способ оценки контактного взаимодействия фрикционных плунжерных пар, который учитывает микрогеометрические параметры и физико-механические свойства поверхностного слоя сопряженных деталей основанный на теории о эллиптической форме микровыступов поверхностного слоя. Приведены фрагменты моделирования процесса контактного взаимодействия соосного скользящего контакта двух поверхностей, в виде контакта цилиндрического плунжера и втулки с эквивалентными значениями параметров шероховатости, волнистости и макроотклонений. В результате сравнения расчетных и фактических значений параметров износостойкости подтверждено возможность использования данного подхода к моделированию процессов контактного взаимодействия поверхностей трения. Полученные результаты, подтверждают адекватность предложенной модели.

Ключевые слова: износостойкость, шероховатость, волнистость, модель, соприкасающиеся поверхности.

A. Tkachuk, A. Kononenko

Lutsk National Technical University

MODELING OF THE PROCESS OF INTERACTION OF THE FUNCTIONAL SURFACES OF PLUNGER COUPLES AT OPERATION

The article proposes a method for evaluating the contact interaction of friction plunger pairs, which takes into account the microgeometric parameters and physical and mechanical properties of the surface layer of conjugate parts based on the theory of the elliptical form of microprotrusions of the surface layer. The fragments of modeling the process of contact interaction of a coaxial sliding contact of two surfaces are presented, in the form of a contact between a cylindrical plunger and a sleeve with equivalent values of the parameters of roughness, ripple and macro deviations. As a result of comparison of calculated and actual values of wear resistance parameters, the possibility of using this approach to modeling the processes of contact interaction of friction surfaces was confirmed. The obtained results confirm the adequacy of the proposed model.

Key words: wear resistance, roughness, waviness, model, contiguous surfaces.