

УДК 624.132.6

DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2020.88.2.115

МОДЕЛЬ ФОРМУВАННЯ ЛОКАЛЬНОГО НАПРУЖЕНОГО СТАНУ В ОСНОВІ МІКРОНЕРІВНОСТЕЙ ПІД ЧАС ЇХ ВЗАЄМОДІЇ

Косолапов В. Б.

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Анотація. Розглянуто моделювання локального напруженого стану у основі нерухомої мікронерівності під час взаємодії з рухомою мікронерівністю за умови врахування ступеня перекриття та величини зовнішнього навантаження зазначеного сполучення. Розглянуто розв'язування задачі за стандартною методикою з використанням додатка Mathcad, отримано графік зміни значення напруженого стану в основі мікронерівності.

Ключові слова: локальний напружений стан, мікронерівність, шорсткість поверхні.

Вступ

У зв'язку з тенденцією до збільшення обсягів будівельно-дорожніх робіт існує необхідність забезпечення підвищеної надійності дорожніх машин. Більша частина землерийно-транспортних машин працюють за умов високих навантажень, що призводить до значного запилення навколишнього середовища. Тяжкі умови роботи та динамічний, вібраційний характер їх навантаження знижують надійність і час експлуатації їхніх гідравлічних приводів.

За даними численних досліджень встановлено, що до 70 % відмов у роботі гідронасичених мобільних машин припадає на гідропривід. Як силові приводи землерийно-транспортних машин найбільш популярним є використання аксіально-поршневих регульованих насосів з похилим диском і аксіально-поршневих нерегульованих гідромоторів з похилим диском. Виробниками цього класу гідромашин є провідні підприємства «Hamilton Sundstrand», «Eaton» (США), «Danfos» (Данія), «Sauer-Danfoss» (Данія), «Rexroth-Bosch» (Німеччина), «Europarts» (Словаччина), «Гідромаш» (Росія), «Гідросила» (Україна) тощо. Як свідчить аналіз дефектів гідронасосів, основним процесом, що зумовлює втрату їх працездатності, слід вважати процес зношування поверхонь поршнів і втулок блока циліндрів, торцевих поверхонь розподільника, приставного дна і поверхні п'яти. У процесі експлуатації в міру зношення робочих поверхонь коливального вузла збільшуються зазори в парах тертя, що призводить до зниження тиску нагнітання, об'ємного і загального коефіцієнтів корисної дії (ККД) а отже, і до зниження продуктивності машини.

Аналіз публікацій

За інших рівних умов, зношення поверхонь сполучень коливального вузла залежить від геометрії поверхонь. Поверхні деталей ніколи не бувають абсолютно гладкими, на них завжди є нерівності, геометрія яких залежить від структури матеріалу та виду їх технологічного оброблення. Поверхня нерівностей, які утворюють шорсткість, має шорсткість другого типу – субмікрошорсткість. Відомо, що фактичний майданчик контактування поверхонь сполучення зазвичай становить менш ніж 0,1 % від номінальної площі контактування [1, 2]. Отже контактування поверхонь сполучень здійснюється за окремими мікронерівностями, а процес зношення поверхонь визначається результатом взаємодії окремих мікронерівностей.

Складність процесів тертя та зношування в з'єднаннях реальних деталей машин поки не дозволяють з достатньою точністю описати їх кількісно. Однак для інженерних розрахунків можуть бути використані залежності, які встановлюють взаємозв'язок інтенсивності зношування з параметрами якості поверхні тертя. Існують різні моделі формування умов і розвитку процесу зношування поверхонь рухливих сполучень.

Найцікавішою є модель пружно-пластичного контактування шорсткуватих поверхонь, запропонована Х. Тяном, Ч. Чжао, Д. Чжу й Х. Цинем [3]. Автори на основі моделі Гринвуда-Вільямсона запропонували вираз для визначення глибини занурення під час пружного контактування:

$$d^* = 1.41g^{0.65} \frac{0.5732\beta E \sqrt{\sigma}}{P_n}, \quad (1)$$

де β – параметр нерівностей; E – наведений модуль пружності; σ – стандартне відхилення висот нерівностей; p_n – фактичний тиск.

Автори дослідили пружно-пластичне контактування та встановили, що в зоні дії пружної деформації у випадку глибини занурення $h > 3$ вплив шорсткості є незначним.

У роботі І. Д. Ібатуліна [4] розглянута кінетична модель росту накопиченої енергії, яка складається з трьох рівнів. На першому рівні вершини нерівностей вступають у безпосереднє контактування, де на фактичних майданчиках цього процесу діють високі тиски, близькі до значення твердості матеріалу. На них відбуваються процеси пошкодження, зокрема зминання, зрушення матеріалу, мікрорізання, схоплювання та перенос речовини.

На другому рівні формується область пружно-пластичних деформацій, тобто відбуваються знакозмінні циклічні пружно-пластичні деформації. Під час пластичної деформації зі збільшенням щільності дислокацій їхня частина утворює мікротріщини, які руйнують кристал.

На третьому рівні формується зона багаточислової контактної втоми, яка відбувається за рахунок змінних навантажень, що перевищують межу втоми матеріалу. Механічна енергія, що витрачається на деформації, розсіюється у вигляді тепла, але частина цієї енергії накопичується у вигляді енергії пружних викривлень кристалічної решітки за рахунок росту щільності дислокацій. У процесі накопичення вони досягають критичного значення, що призводить до локальних руйнувань.

У роботі [5] Н. Б. Демкін дійшов висновку, що для металів з високою чистотою оброблення деформація буде переважно пружною, якщо ж виступ деформувався під час першого навантаження пластично, то у разі повторного навантаження деформація буде пружною до тих пір, поки навантаження не перевищує первісне.

У роботі [6] А. М. Суслов наводить вирази щодо інтенсивності зношування поверхонь рухомого сполучення в період прироблення:

$$I_h = \frac{1.2Ra^{2/3}}{n\lambda S_m t m^{3/2}} \left(\frac{p}{H_{\mu 0}} \right)^{7/6} \times \sqrt{15\pi (W_z H_{\max})^{1/3} \left[1 + \frac{2\pi H_{\mu 0} (1 - \mu^2)}{E} \right]} \quad (2)$$

та в період нормального зношування:

$$I_h = \frac{1.2p^{7/4}}{n\lambda H_{\mu 0}^{2/3} t m^{3/2}} \times \sqrt{15\pi \left[\frac{30\pi (1 - \mu^2) (2\pi Ra W_z H_{\max})^{1/3}}{ES_m} \right]} \quad (3)$$

де n – кількість циклів впливу, які призводять до руйнування матеріалу; μ – коефіцієнт Пуассона; t – відносна опорна довжина профілю; m – кількість контактів; $H_{\mu 0}$ – мікротвердість; R_a – середнє арифметичне відхилення висот нерівностей профілю шорсткості; λ – коефіцієнт, що враховує вплив поверхневих залишкових напруг на зношування;

$$\lambda = \left[\frac{\sigma_a - \sigma_{\text{ост}}}{\sigma_a} \right]^{t_y} \quad (4)$$

де σ_a – значення амплітудної напруженості в поверхневому шарі; t_y – параметр фрикційної втоми.

У роботі [7] А. М. Суслов запропонував рівняння для визначення величини пластичних деформацій, виходячи з якості оброблення поверхні:

$$h_{\text{ши}} = \frac{P}{mH_{\text{ши}} \left(\frac{\pi t_{m,\text{пр}} S_{m,\text{пр}} t_{m,\text{по}} S_{m,\text{по}}}{4 \cdot 10^4 R_{p,\text{пр}}^{0.5} R_{p,\text{по}}^{0.5}} \right)} \quad (5)$$

де P – навантаження; $H_{\text{ши}}$ – мікротвердість; $t_{m,\text{пр}}$, $t_{m,\text{по}}$ – відносна опорна довжина профілю в поздовжньому та поперечному напрямках; $S_{m,\text{пр}}$, $S_{m,\text{по}}$ – крок нерівності вздовж середньої лінії у поздовжньому та поперечному напрямках; $R_{p,\text{пр}}$, $R_{p,\text{по}}$ – висота нерівностей у поздовжньому та поперечному напрямках.

Мета і постановка завдання

У процесі створення дорожніх машин актуальною проблемою є дослідження питань, спрямованих на підвищення їх надійності та продуктивності за рахунок вибору оптимального навантаження елементів гідроприводу.

Метою роботи є моделювання локального напруженого стану в основі мікронерівностей поверхонь рухомого трибосполучення під час їх взаємодії з урахуванням ступеня перекриття та величини зовнішнього навантаження сполучення.

Розроблення математичної моделі процесу

Окрема мікронерівність під час процесу розрахунків на вигин може бути подана як консольна балка змінного перетину. Під час розрахувань на вигин необхідно визначити напругу σ_F у небезпечному перерізі в зоні перехідної кривої (рис. 1).

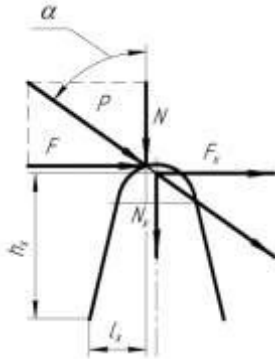


Рис. 1. Схема сил у місці дотику мікронерівностей

Будемо вважати, що контакт піддається дії осьового навантаження та вертикального навантаження з боку мікронерівності 2. Підсумкова сила, що передається від однієї поверхні до іншої через майданчик контактування, розкладається на нормальну силу P_n , що діє вздовж загальної нормалі до дотичної лінії профілю поверхні 1, яка повинна бути стискальною, і тангенціальну силу τ , що діє в дотичній площині та є протидією силі тертя (рис. 2).

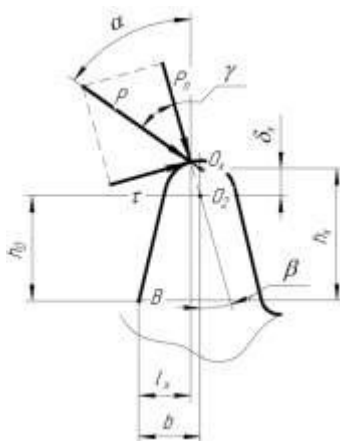


Рис. 2. Схема сил, зведених до осі симетрії мікронерівності

За умови руху одної мікронерівності відносно іншої величина сили τ повинна бути

у граничному стані рівною або більше сили граничного тертя, тобто

$$\tau \geq \mu \cdot P_n \tag{6}$$

де μ – коефіцієнт граничного тертя.

Відповідно до схеми рис. 3 [8], сила τ розкладається на компоненти τ_x і τ_y , паралельні осям O_x і O_y .

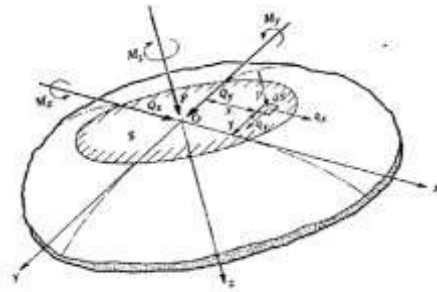


Рис. 3. Схема сил на майданчику дотику

За умови ковзного контактування дотична сила, що діє на поверхню кожного з тіл, що котактують, досягає свого граничного значення в напрямку, протилежному напрямку вектора швидкості ковзання, отже:

$$\tau_x = -\frac{\Delta v_x}{|\Delta v|} \cdot \mu \cdot P_n \quad \tau_y = -\frac{\Delta v_y}{|\Delta v|} \cdot \mu \cdot P_n \tag{7}$$

$$\tau_x = -\frac{\Delta v_x}{|\Delta v|} \cdot \mu \cdot P \quad \tau_y = -\frac{\Delta v_y}{|\Delta v|} \cdot \mu \cdot P \tag{8}$$

Зусилля, передані через точку контактування, призводять до стискання тіл, що деформуються, внаслідок чого вони вступають у контакт вздовж майданчика кінцевих розмірів.

Моменти M_x і M_y (рис. 3) є моментами кочення. Вони визначають опір відносному перекочуванню тіл, що контактують. Третя складова вислідного моменту M_z діє на загальну нормаль і виникає внаслідок тертя вздовж майданчика контактування (момент вертіння). Якщо вертіння супроводжує кочення, то енергія його дисипації підсумовується з енергією дисипації кочення і визначає загальний опір коченню. У межах розглянутої системи взаємодії мікронерівностей моментами M_x і M_y й M_z можна зневажати [8].

Сили взаємодії нерівностей передаються через майданчик контактування за допомо-

гою поверхневих зусиль, розподілених вздовж площі контактування.

Під час розподілу зусиль p і q вздовж площі контактування S необхідно враховувати такі умови загальної рівноваги:

$$\begin{aligned} F &= \int_S p \cdot dS \\ Q_y &= \int_S q_y \cdot dS \\ Q_x &= \int_S q_x \cdot dS \end{aligned} \quad (9)$$

Під час розраховувань на вигин необхідно визначити напругу σ_F у небезпечному перерізі в зоні перехідної кривої [8]:

$$\sigma_F = \sigma_{\text{н}} - \sigma_{\text{ст}}, \quad (10)$$

де $\sigma_{\text{н}}$ – напруга вигину (для окружності в підставі); $\sigma_{\text{ст}}$ – напруга стискання;

$$\sigma_{\text{н}} = \frac{h \cdot F}{W} = \frac{h \cdot F}{0,1 \cdot d^3}, \quad (11)$$

$$\sigma_{\text{ст}} = \frac{N}{A} = \frac{4N}{\pi d^2}, \quad (12)$$

де A – площа поперечного перерізу підстави мікронерівності; d – діаметр майданчика перетину мікронерівності в точці контактування; b – ширина майданчика контактування; F – горизонтальна сила, прикладена в точці контактування мікронерівностей (рис. 1).

Відповідно до рис. 1, горизонтальна сила, прикладена в точці контактування мікронерівностей, може бути визначена за виразом

$$F = N \cdot \operatorname{tg}(\operatorname{arctg}(f_{\text{тр}}) + \beta),$$

де $f_{\text{тр}}$ – коефіцієнт тертя; β – кут між нормаллю до контуру, що утворює вершину у місці контактування мікронерівностей та вертикальною віссю симетрії нерухої мікронерівності.

Моделювання здійснювалось та таких умов:

– верхня нерівність переміщується у горизонтальному напрямку з постійною швидкістю;

– верхня нерівність може переміщуватися у вертикальному напрямку;

– на верхню нерівність діє вертикальна сила N (рис. 1);

– нижня нерівність вважається нерухлою та жорстко закріпленою;

– величина перекриття мікронерівностей задавалася з урахуванням параметрів шорсткості та властивостей матеріалу.

Сила прикладена в точці контактування мікро-нерівностей P .

Розрахунки напруги σ_F у небезпечному перерізі в зоні перехідної кривої проводились для мікронерівностей з висотою $0,08 \cdot 10^{-6}$ м, $0,16 \cdot 10^{-6}$ м, $0,32 \cdot 10^{-6}$ м.

Результати розрахунків напруги σ_F у небезпечному перерізі в зоні перехідної кривої з використанням додатка Mathcad подано на рис. 4.

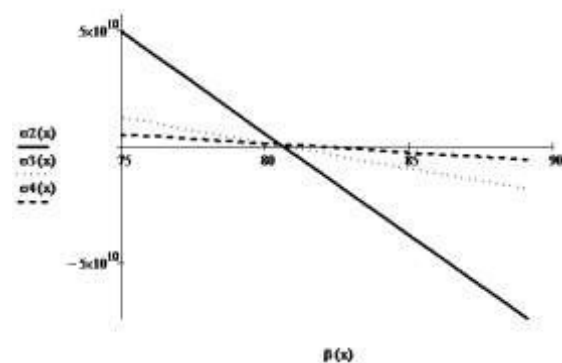


Рис. 4. Графік зміни напруженого стану в основі мікронерівності

Висновок

Отже, в процесі аналітичного дослідження виявлено, що напруга вигину відповідно до умов формування та розвитку сталої мікротріщини в зоні перехідної кривої (рис. 4) виникає на обмеженій ділянці руху рухої мікронерівності вздовж поверхні нерухої.

Величина напруги вигину залежить від геометрії мікронерівності та величини зближення мікронерівностей в сполученні.

Література

1. Демкин Н. Б., Рыжов Э.В. Качество поверхности и контакт деталей машин. Москва: Машиностроение, 1981. 244 с.
2. Rabinovicz E. Friction and wear of materials. John Wiley and Sons, 1965. 244 p.
3. Practical Expressions of Elastoplastic Contact between Rough Surfaces. Int. J. of modeling and Optimization / Tian H., Zhao C., Zhu D., Qin H. Practical Expressions of Elastoplastic Contact between Rough Surfaces. Int. J. of modeling and Optimization. 2012. Vol. 2. No.3. 2012.
4. Ибагуллин И. Д. Кинетика усталостной повреждаемости и разрушения поверхностных слоев. Самара: СГТУ, 2008. 387 с.

5. Демкин Н. Б. Контактное шероховатых поверхностей. Москва: Наука, 1970. 226 с.
6. Суслов А. Г. Качество поверхности деталей машин. Москва: Машиностроение, 2000. 320 с.
7. Суслов А. Г. К вопросу трения и изнашивания деталей машин. Трение и износ. 1990. № 5. С. 801–807.
8. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия: пер. с англ. Москва: Мир, 1989. 510 с.

References

1. Demkin N. B., Ryzhov E.V. Kachestvo poverhnosti i kontakt detalej mashin. Moskov: Mashinostroenie, 1981. 244 s.
2. Rabinovicz E. Friction and wear of materials. N.Y.: John Wiley and Sons, 1965. 244 p.
3. Tian H., Zhao C., Zhu D., Qin H. Practical Expressions of Elastoplastic Contact between Rough Surfaces. Int. J. of modeling and Optimization. 2012. Vol. 2, No. 3.
4. Ibatullin I. D. Kinetika ustalostnoj povrezhdanosti i razrusheniya poverhnostnyh sloev. Samara: SGTU, 2008. 387 s.
5. Demkin N. B. Kontaktirovanie sherohovatykh poverhnostej. M.: Nauka, 1970. 226 s.
6. Suslov, A. G. Kachestvo poverhnosti detalej mashi.– Moskov: Mashinostroenie, 2000. 320 s.
7. Suslov A.G. K voprosu treniya i iznashivaniya detalej mashin. Trenie i iznos. 1990. №5. S. 801–807.
8. Dzhonson K. Mehanika kontaktnogo vzaimodejstviya: per. s angl. Moskov: Mir, 1989. 510 s.

Косолапов Віктор Борисович, к.т.н., доцент,
+380(97) 535-64-78,
Харківський національний автомобільно-
дорожній університет

Model of formation of a local stress state at the base of microroughnesses in their interaction

Abstract. Modeling of the local stress state at the base of microroughness during its interaction with mobile microroughness is considered, taking into account the degree of their overlap and the magnitude of the external load in the interface. The solution of the problem using the Mathcad application is considered, a graph of the change in the value of the local stress state at the base of microroughness is obtained.

Keywords: local stress state, microroughness, surface roughness.

Kosolapov Viktor. PhD, Associate Professor, +380(97) 535-64-78, dr.tribolog@gmail.com. Kharkiv National Automobile and Highway University

Модель формирования локального напряженного состояния в основании микронеровностей при их взаимодействии

Аннотація. Рассмотрено моделирование локального напряженного состояния в основании микронеровности при ее взаимодействии с подвижной микронеровностью с учетом степени их перекрытия и величины внешней нагрузки в сопряжении. Рассмотрено решение задачи с использованием приложения Mathcad, получен график изменения значения локального напряженного состояния в основании микронеровности.

Ключевые слова: локальное напряженное состояние, микронеровность, шероховатость поверхности.

Косолапов Виктор Борисович, к.т.н., доцент,
+380(97) 535-64-78,
Харьковский национальный автомобильно-
дорожный университет