

**Шалапко Ю.І.**Хмельницький національний університет,  
м. Хмельницький, Україна**РЕОЛОГІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ КОНТАКТНОЇ  
ПОВЕРХНІ ПРИ ТАНГЕНЦІАЛЬНОМУ  
НАВАНТАЖЕННІ І ПЕРЕХОДІ ДО КОВЗАННЯ****Вступ**

Згідно еволюційної моделі малоамплітудного фретингу [1], стан інтерфейсу контактної пари постійно трансформується під час циклічного навантаження в напрямку від сталого абсолютного зчеплення до мікропроковзування з утворенням „третього тіла”. Ресурс посадки вичерпується не тільки за рахунок зношування та окислення, а й від втрати спроможності контакту перебувати у стані статичного тертя. Тоді відбувається перехід від сили статичного тертя до кінематичного.

Під третім тілом ми вважаємо весь комплекс пружно-пластичного деформування контактної поверхні разом з фрикційними явищами на поверхні розділу двох тіл. Як об’єкт дослідження і моделювання „третє тіло” може виступати тільки тоді коли будуть чітко визначені його просторові границі, фізико-механічні властивості та статистичні параметри мікрогеометрії.

Властивості третього тіла на першому етапі циклічного навантаження в цілому залежать від початкової шорсткості поверхонь, об’єму між контактного простору і рівня деформації при нормальному навантаженні. Для моделі тертя при переході від режиму зчеплення (рис.1, а) до проковзування важливим є визначення залежності швидкості відносного зміщення двох тіл від характеристики мікрогеометрії контактної поверхні. Вважаючи те, що циклічне збурення контакту відбувається за гармонічним законом, то припустимо що й швидкість зростає за законом синуса або косинуса. При набуванні швидкості критичного зчеплення  $\vartheta$  відбувається проковзування поверхонь. Для малих швидкостей відносного переміщення поверхонь, час перебування окремих плям контакту в стані зчеплення може бути досить суттєвим по зрівнянню з одним періодом режиму зчеплення-проковзування. Тому слід очікувати, що сила тертя буде зростати у відповідності зі зростанням фактичної площини контакту. Остання формується за рахунок передеформування окремих нерівностей та збільшення кількості нових контактів при тангенціальному зміщенні поверхонь. Очевидно, що закон розподілу мікронерівностей веде до стохастичних ефектів, які слід очікувати при малих відносних швидкостях. Нестійкість коливального руху двох шорстких поверхонь виникає тоді, коли баланс сил на поверхні розділу стає багатозначним на границі областей зчеплення-проковзування (рис.1, б), як в межах номінальної площини контакту, так і в границях взаємодії окремих нерівностей. Якщо шорсткість твердої поверхні достатньої велика, то взаємне зміщення окремих частин інтерфейсу буде відбуватися стрибкоподібно.

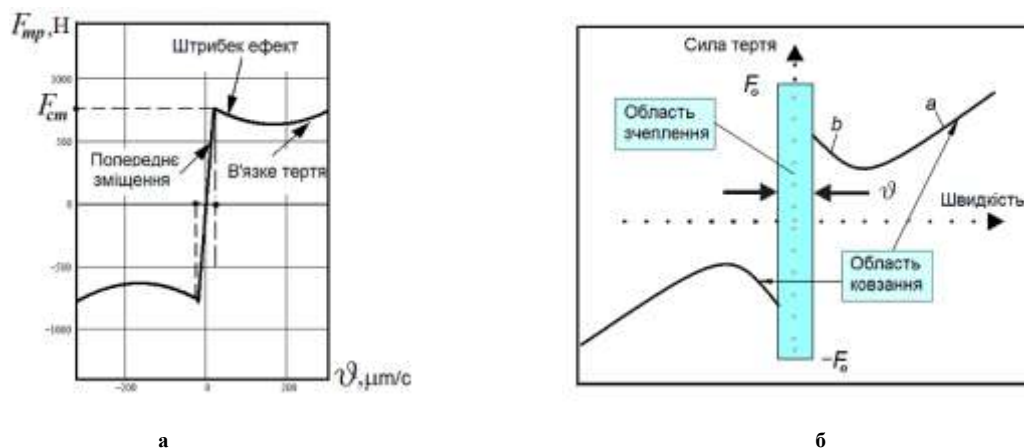


Рис. 1 – Характеристики сили тертя з врахуванням пружної тангенціальної деформації у попередньому зміщенні, Штрибек-ефекту та в'язкого тертя (а), параметри моделі тертя (б)

Зрозуміло, що коефіцієнт тертя в умовах статичного тертя не є сталою величиною, а є повільно зростаючою функцією тривалості перебування контакту в стані нерухомості. В момент переходу до проковзування коефіцієнт тертя для достатньо малих відносних швидкостей є повільно падаючою функцією. В роботі [2] автори визначають границю «малої» швидкості у 0,01 ... 100 м/с.

**Характеристика тертя в момент втрати контактом номінальної нерухомості**

В умовах сталого нормального тиску Rice та Ruina [3] запропонували наступну феноменологічну модель тертя, яка успішно описує бифуркації у станах існування номінально-нерухомого фрикційного

контакту (ННФК), а саме сталого ковзання, режиму динамічного зчеплення – проковзування (РДЗП), абсолютного зчеплення. Модель описує залежність сили тертя від миттєвої швидкості відносного проковзування  $\mathfrak{G}$  та динамічної характеристики  $\Phi$ , яка напряму залежить від шорсткості поверхонь. На відмінність від багатьох моделей тертя, це єдина залежність, яка включає в себе характеристику мікрогеометрії ННФК:

$$F_{mp}(\mathfrak{G}, \Phi) = P_n \cdot \left[ \mu_0 + A \ln \left( \frac{\mathfrak{G}_m}{\mathfrak{G}_0} \right) + B \ln \left( \frac{\mathfrak{G}_m \Phi}{D_0} \right) \right], \quad (1)$$

де  $\mathfrak{G}_0$  – швидкість збурення основи;

$\mathfrak{G}_m$  – абсолютна швидкість тіла, що знаходиться в контакті з основою;

$\mathfrak{G} = \mathfrak{G}_o - \mathfrak{G}_m$  – швидкість ковзання тіла по основі;

$\mu_0$  – коефіцієнт тертя в стані стійкого ковзання поверхонь при сталій швидкості;

$D_0$  – середньостатистична величина мікропроковзування на рівні мікронерівностей;

$A$  і  $B$  – позитивні постійні в границях  $10^{-2}$  ( $B > A$ ).

Динамічна характеристика  $\Phi$  інтерпретується як тривалість контактування й механічної взаємодії окремої мікронерівності. Наприклад, при стаціонарній швидкості ковзання  $\mathfrak{G}$  одна конфігурація мікроконтактів замінюється іншою за час  $\Phi = \frac{D_0}{\mathfrak{G}}$ , де  $D_0$  – характерна довжина зміщення поверхонь, що відповідає мікропроковзуванню окремих мікронерівностей в момент переходу до проковзування по всій номінальній площині (рис. 2).

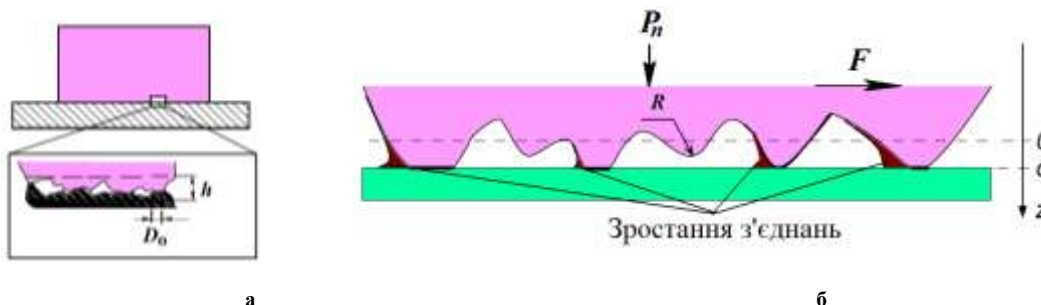


Рис. 2 – Елементарна пляма контакту на якій відбувається одиничне мікро проковзування (а) та зростання ФПК при зближенні та зсуві поверхонь на величину (б).

Згідно Табора [4] сила тертя з врахуванням мікрогеометрії контакту визначається наступним чином:

$$F_{mp} = \tau \cdot \Sigma_{\phi}(\Phi, P_n), \quad (2)$$

де  $\tau$  – тангенціальні напруження зсуву в контакті;

$\Sigma_{\phi}(\Phi, P_n)$  – фактична площа контакту.

Далі визначимо:

$$\Sigma_{\phi}(\Phi, N) = \Sigma_0(P_n) \cdot \left[ 1 + m \ln \left( \frac{\Phi \mathfrak{G}_m}{D_0} \right) \right], \quad (3)$$

де  $\Sigma_0(P_n)$  – фактична площа контакту при  $\Phi_0 = \frac{D_0}{\mathfrak{G}_0}$  і лінійно залежить від нормального тиску  $P_n$ .

Зусилля в контакті:

$$\tau(\mathfrak{G}) = \tau_0 \left[ 1 + \eta \cdot \ln \left( \frac{\mathfrak{G}_m}{\mathfrak{G}_0} \right) \right]. \quad (4)$$

В рівняннях (2), (3), (4):

$$\mu_0 = \frac{\tau_0 \cdot \Sigma_0}{N}; \quad m = \frac{B}{\mu_0}; \quad \eta = \frac{A}{\mu_0}; \quad m, \eta \ll 1.$$

Рівняння (2) практично не відрізняється від (4). Розкриваючи складові (2) отримуємо наступний вираз:

$$F_{mp} = \sum_0(N) \cdot \tau_0 \left[ 1 + \frac{B}{\mu_0} \ln \frac{\Phi \vartheta_m}{D_0} \right] \cdot \left[ 1 + \frac{A}{\mu_0} \ln \frac{\vartheta_m}{\vartheta_0} \right], \quad (5)$$

$$F_{mp} = F_0 \left[ 1 + \frac{B}{\mu_0} \ln \frac{\Phi \vartheta_m}{D_0} \right] \cdot \left[ 1 + \frac{A}{\mu_0} \ln \frac{\vartheta_m}{\vartheta_0} \right],$$

де  $F_0$  – сила сталого тертя при швидкості збурення  $\vartheta = v_{зб}$ , коли  $(v_m) = 0$ .

Формула (2) дає можливість визначити силу тертя в залежності від швидкості проковзування та характеристики мікрогеометрії  $D_0$ . З (2) отримуємо залежність для динамічного коефіцієнту тертя:

$$\mu(\vartheta) = \mu_0 + B \ln \frac{\Phi \vartheta}{D_0} + A \cdot \ln \frac{\vartheta_m}{\vartheta_0}.$$

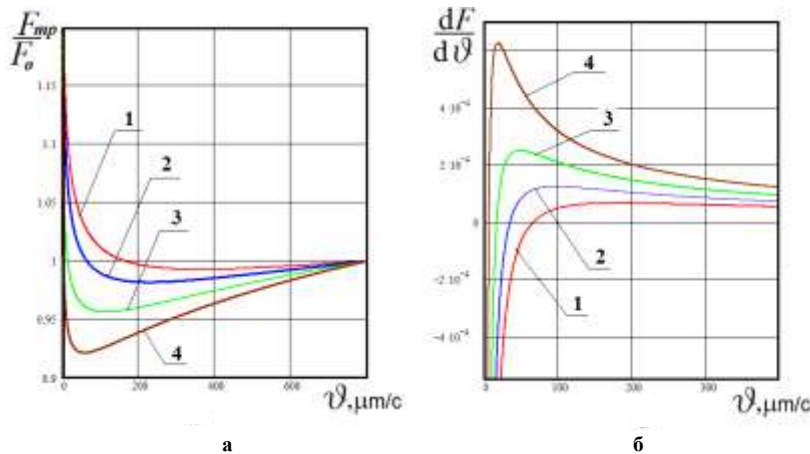


Рис. 3 – Вплив характерної величини проковзування  $D_0$  на характеристику тертя (а):  
1 –  $D_0 = 0,04 \mu\text{m}$ ; 2 –  $0,1 \mu\text{m}$ ; 3 –  $0,4 \mu\text{m}$ ; 4 –  $0,1 \mu\text{m}$ ; Градієнти сил тертя для різних якісних показників поверхонь в залежності від відносної швидкості проковзування (б).  
Параметри характеристики тертя  $\vartheta_{зб} = 800 \mu\text{m/s}$ ;  $\mu_0 = 0,36$ ;  $a = 0,02$ ,  $b = 0,075$ ;  $\mu = 0,4$ ;  $\Phi = 10^{-3}$  с.

Проаналізуємо вплив якості поверхні на динаміку зміщення поверхонь від стану зчеплення до моменту проковзування. M.Shillor, M.Sofonea, J.Telega [5] визначили характерну довжину проковзування, на протязі якої діють закони малої швидкості:

$$D_0 = \frac{v \cdot \vartheta}{P_n \cdot R_a},$$

де  $v$  – в'язкість поверхневого шару при тангенціальному деформуванню зі швидкістю  $\vartheta$ ;

$P_n$  – нормальний тиск в контактї;

$R_a$  – параметр шорсткості.

Для сухих металевих поверхонь при  $R_a = 0,04 \dots 1,5 \mu\text{m}$ ,  $D_0 = 0,04 \dots 1,5 \mu\text{m}$ .

Продемонструємо реологічні властивості ННФК в момент проковзування в залежності від величини відносного зміщення поверхонь на протязі якого встановлюється сталий режим ковзання (рис.3).

Підвищення якості поверхонь контактної пари веде до зменшення сили статичного тертя. Перехід до ковзання характеризується більшим градієнтом надання сили динамічного тертя. Це можна пояснити тим, що більш шорстка поверхня в режимі попереднього зміщення за рахунок зчеплення окремих мікронерівностей має більшу силу статичного тертя і при переході до ковзання за рахунок вступу в контакт нових мікронерівностей має менший градієнт падіння чим для більш гладкої поверхні. Для останніх характерно збільшення тертя після досягнення мінімуму. Таким чином, шорстка поверхня більш вигідна з точки зору стійкості РДЗП. Однак, при збільшенні амплітуди проковзування, а разом з тим й відносної швидкості, більш якісна поверхня при цьому має деякий запас сили тертя (область зростання залежності на рис. 1). Знайдемо градієнти сил тертя в момент переходу до проковзування в залежності від якості поверхні:

$$\frac{dF}{d\vartheta} = \frac{A}{\mu V} \left( 1 + \frac{B}{\mu} \ln \vartheta \left( \frac{D_0}{\tau_0} \right) \right) + \frac{A}{\mu^2} \ln \left( \frac{\vartheta}{\vartheta_0} \right) \frac{B}{\vartheta}. \quad (6)$$

На рис. 3, б зображені градієнти сил тертя для різних значень характеристики  $D_0$ . Для гладких поверхонь нестійкість руху виражається у швидкій зміні сил тертя за малий проміжок часу. З точки зору забезпечення номінальної нерухомості збільшення шорсткості поверхонь зменшує стрибки сил тертя, а разом й стійкість ННФК в момент переходу до РДЗП. Однак, в період попереднього зміщення за рахунок зменшення тангенціальної жорсткості, збільшення міжконтактного простору й зменшенню нормального тиску, мікронерівності знаходяться в стані "розхитування". Останні знаходяться в стані фактичної відносної нерухомості контакту. Так як якість поверхонь відповідальних деталей машин та конструкцій доволі висока, то слід зауважити, що для таких номінально-нерухомих фрикційних з'єднань можливість переходу до РДЗП, власне, до малоамплітудного фретингу, є більш небезпечно з погляду подальшої експлуатації, чим для більш шорстких поверхонь. Тобто, чим якісніша поверхня, тим більш впливовий є Штрибек-ефект в момент переходу до проковзування (рис. 3, б).

Вплив природи матеріалів представлений на рис. 4. Природно, що збільшення коефіцієнту тертя веде до зменшення впливу якості поверхонь на реологію ННФК. Можна припустити, що при цьому збільшується адгезійна складова сили тертя. Великий коефіцієнтах тертя в момент проковзування обумовлений міцністю на зріз місць зварювання окремих мікронерівностей. При відносно малих коефіцієнтах тертя сила тертя перевищує тертя при сталому режимі ковзання  $F_0$  на протязі всього часу її встановлення (криві 1, 2, рис. 4, а).

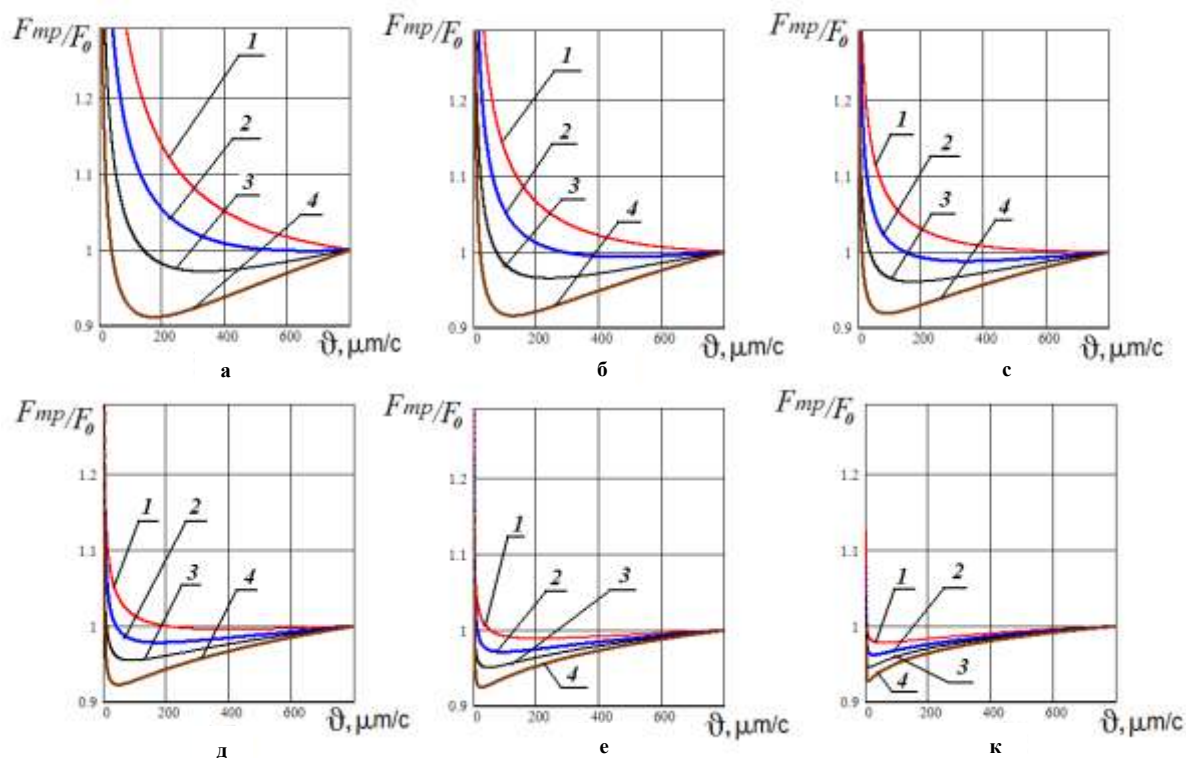
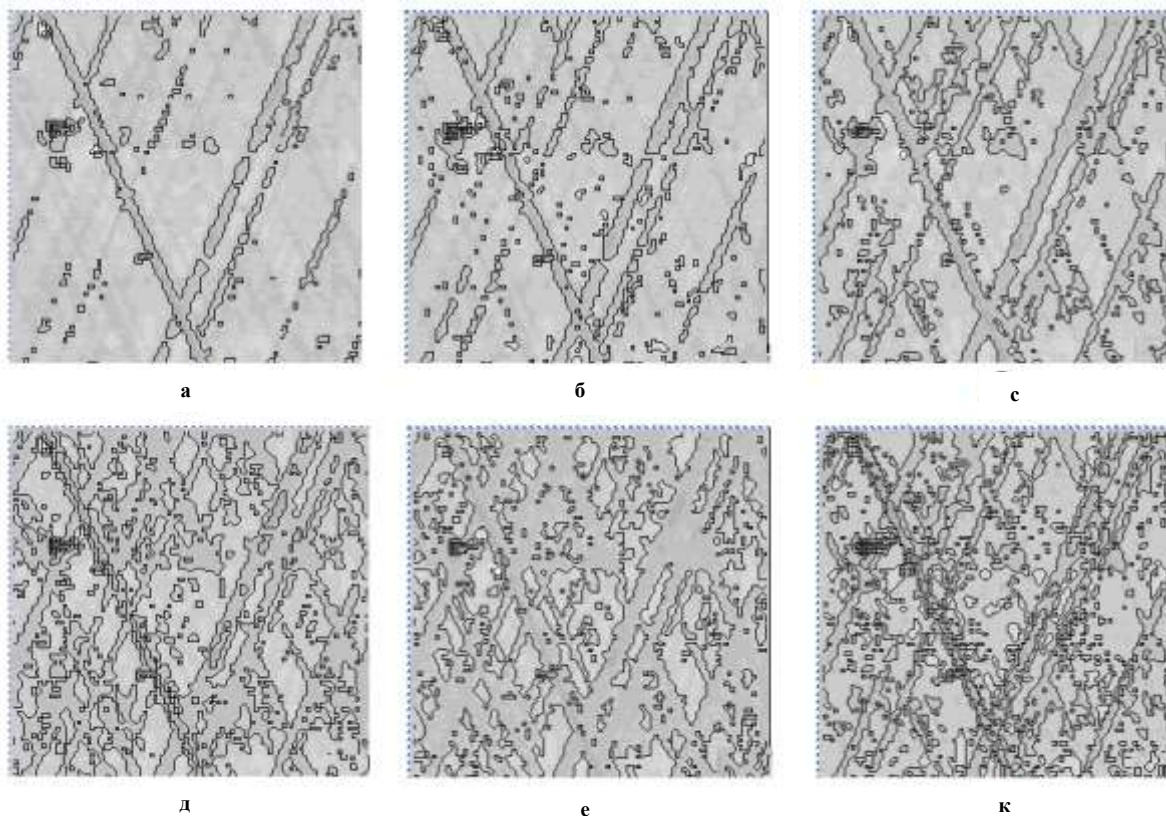


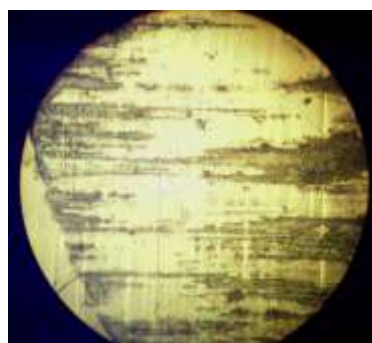
Рис. 4 – Вплив коефіцієнту тертя та величини  $D_0$  на характеристику ННФК в момент втрати номінального зчеплення при  $v_0 = 800 \mu\text{m/s}$ :  
 а –  $\mu = 0,02$ ; б –  $0,25$ ; с –  $0,3$ ; д –  $0,4$ ; е –  $0,5$ ; к –  $0,6$ ;  
 1 –  $D_0 = 0,02 \mu\text{m}$ ; 2 –  $0,1 \mu\text{m}$ ; 3 –  $0,5 \mu\text{m}$ ; 4 –  $1,5 \mu\text{m}$

Слід врахувати, що встановлення величини зміщення  $D_0$ , на протязі якого активізуються реологічні ефекти, залежить від зростання елементарних плям контакту під час тангенціального зміщення та першого акту проковзування поверхонь. Збільшується кількість та розміри елементарних, а разом з ними й фактична площа контакту (ФПК). Як відмічали Ф.П.Боуден і Д.Тейбор [6], зростання з'єднання відбувається до того моменту поки не втрачена міцність одиночного контакту на зріз. Автори також висунули гіпотезу, що фактичний тиск в контакті при тангенціальному навантаженні повинен зменшитись по зрівнянню з чисто нормальним навантаженням.

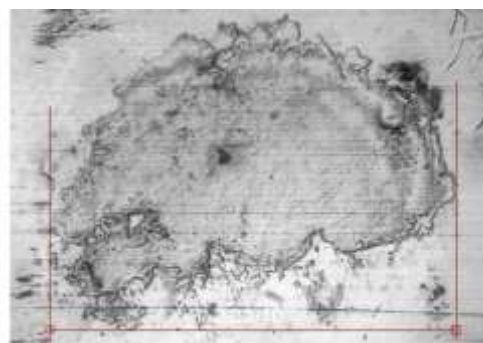
Зростання ФПК показано на рис. 5. Поверхня навантажувалась нормальною силою, а потім прикладалось тангенціальне зусилля в межах 60...70 % від зусилля при якому відбувається зсув кульки відносно поверхні.



**Рис. 5 – Зростання ФПК для шорсткої поверхні сталі 45 в залежності від виду та ступені навантаження,  $R_a = 0,14 \mu\text{m}$ :**  
 а – нормальне навантаження  $F_n = 5 \text{ Н}$ , тангенціальне навантаження  $F_t = 0$ ;  
 б –  $F_n = 8 \text{ Н}$ ,  $F_t = 0$ ; с –  $F_n = 10 \text{ Н}$ ,  $F_t = 0$ ;  
 д –  $F_n = 10 \text{ Н}$ ,  $F_t = 2 \text{ Н}$ ; е –  $F_n = 10 \text{ Н}$ ,  $F_t = 4 \text{ Н}$  – проковзування;  
 к –  $F_n = 10 \text{ Н}$ ,  $F_t = 4,5 \text{ Н}$  – 100 циклів тангенціального руху з амплітудою 15  $\mu\text{m}$



а



б

**Рис. 6 – Малоамплітудний фретинг на рівні контурних плям контакту при X800 (а).  
 Одиначний пластично-деформований фактичний контакт металевих поверхень після 1200 циклів тангенціального навантаження (б)**

Сумарна площа мікроконтактів на поверхні, яка була деформована кулькою діаметром 12,4 мм, вимірювались за допомогою лазерного мікро-нанопрофілографа «Talyscan» і обраховувалась у співпраці з професором Любимовим В.Е (Жешувська Політехніка, Польща).

Перші плями контакту виникають на більш високих мікронерівностях профілю, які залишаються після механічної обробки. Після прикладання тангенціального зусилля відбувається не тільки зростання кількості плям контакту, а й їх злиття. Картина фактичного контакту, що зображалось на рис. 4 не враховує пружні контакти поверхонь, так як після розкриття контакту фіксуються тільки zdeформовані вершини мікронерівностей. Після 100 циклів тангенціального зміщення пляма контакту практично в цілому деформується пластично. На рис. 6 представлені поверхні мікро контактів отриманих за допомогою оптичної та електронної мікроскопії.

### Висновки

На початку тангенціального руху основи контакту знаходяться в стані зчеплення  $\vartheta_o = \vartheta_m$ , де  $\vartheta_o$  швидкість основи пр її збуренні (рис. 2),  $\vartheta_m$  - швидкість тіла.

Відносна швидкість  $\mathcal{G} = 0$ , а сила тертя є максимальною і сформована в часі перебування контакту в режимі попереднього зміщення. При досягненні абсолютного проковзування в контакті тіло зупиняється відносно лабораторної системи координат ( $\vartheta_m = 0$ ). Тоді сила тертя вирівнюється і стає сталою, як і при одно направленому чистому ковзанні. При малих швидкостях проковзування тертя більшою частиною обумовлено місцевою адгезією та локальним зрізом в місцях фактичного контакту.

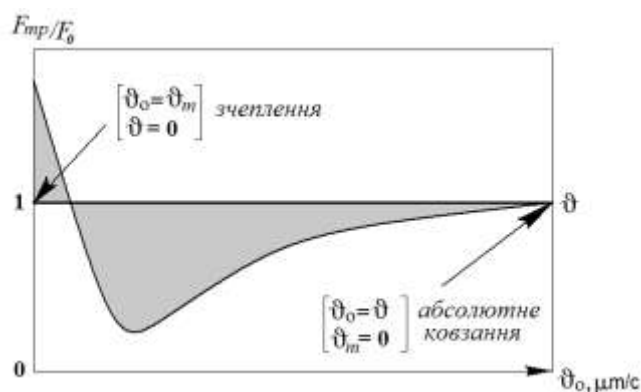


Рис. 7 – Характеристика тертя в момент мікро проковзування

Експериментальні дані показали збільшення ФПК при тангенціальному зміщенні контакту в 3 ... 4 разів. В залежності від якості поверхонь можна збільшувати час перебування поверхонь в стані номінального зчеплення, а при переході до проковзуванні зменшити вплив динамічного фактору. Це дає можливість в залежності від умов експлуатації(частоти вібрації) та властивостей матеріалу зменшити розсіювання енергії в контакт і забезпечити фретингостійкість при амплітудах зміщення (1...15  $\mu\text{m}$ ).

### Література

1. Шалапко Ю.І. Еволюційна модель фрикційної взаємодії поверхневих шарів при фретингу //Вісник двигунобудування. – 2006. – № 4. – С.44-49.
2. T. Baumberger, P. Berthoud, and C. Caroli , Shear response of a frictional interface to a normal load modulation// Phys. Rev. B 60, 3928 (1999)
3. J. R. Rice, and A. L. Ruina, J. Appl. Mech. 105 (1983) 343.
4. Tabor D. A simplified account of surface topography and the contact between solids//Wear.-1975-v.32.-2.p.269-271
5. M.Shillor, M.Sofonea, J.Telega. Rewiew of Recent Results on Quasistatic Contact: Models and Variational Analysis. // Inst. Fund. Res. Warsawa.- Grant 8T11F01718 – DRAFT.- 2003. - p. 164.
6. Ф.П.Боуден, Д.Тейбор. Трени и смазка твердых тел. М.: Машиностроение. – 1968. –544.–С.33.

Надійшла 15.10.2007