

МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНОГО РУХУ В ІНТЕРФЕЙСІ КОНТАКТНИХ ПОВЕРХОНЬ ПРИ ВІБРАЦІЙНИХ МІКРОПЕРЕМІЩЕННЯХ

Як відомо, при мікропроковзуванні поверхонь номінально-нерухомого фрикційного контакту (ННФК) відносна швидкість поверхонь змінюється дуже швидко, а координата системи залишається майже незмінною[1]. Мікропроковзування, що мають місце в інтерфейсі двох тіл, являють собою відповідний стрибок властивостей у її динамічному стані. Дисипація енергії у вигляді теплоутворення виражена в значно меншій мірі ніж від пружно-пластичної деформації приконтактної області. В іншому випадку, чим менше той проміжок часу, для якого відповідає зростання енергії на визначену величину, тим відповідно більше потужність динамічної системи з тертям. Загалом коливальний фрикційний процес описується балансом трьох чинників: роботи сили тертя, кінетичної енергії тіл та потенційної енергії пружно-пластичного деформування поверхневого шару. Так як під час циклічних навантажень змінюється стан поверхонь, а разом з цим характеристика тертя, амплітуда зміщення і тангенціальна жорсткість, контактна пара постійно знаходиться в стані балансування енергій.

Еволюція системи може проходити по різних сценаріях, однак в цілому веде до збільшення енергії системи, що виражається у розбалансуванні системи в сторону зростання кінетичного фактору (збільшенні амплітуди проковзування) й зменшення потенційного (пружних контактних деформацій).

З точки зору фретингостійкості ННФК головними чинниками трибології процесу є параметри сили тертя, амплітуди та контактної жорсткості. Для врахування динаміки процесу було введено масу циклічно-деформованого поверхневого шару. Для початкового стану зчеплення ця маса є більшою у порівнянні зі станом сталого відносного проковзування поверхні. Еволюційне моделювання починається з вихідних умов: координата основи, маса контактного шару і маса всієї деталі, сила тертя, яка формується при стисканні поверхонь, жорсткості у тангенціальному напрямку й параметрами характеристики тертя[2, 3]. Надалі масу, що контактує з основою названо малою масою m , масу деталі - великою M . Дослідження стосуються характеру руху в системі при змінні того чи іншого еволюційного параметру. Математично це можна формалізувати диференціальним рівнянням, права частина якого залежить від деякого параметру p .

$$\frac{dx}{dt} = f(x, p)$$

Розв'язок диференціальних рівнянь описаний у роботі [4]. Характеристика тертя (рис.4) задавалась для різних параметрів пластичності n для кривої напруження деформації[5]. По якій з траєкторій буде рухатись система при тому чи іншому еволюційному параметрі в загальному випадку відповісти не можна, так як не відома сама зміна параметру в часі. Але при достатній зміні параметру (повільного у порівнянні зі швидкістю точки зображення на фазовій траєкторії) це можна дослідити.

Комп'ютерне моделювання мікропереміщень у ННФК було порівняно з оптичними спостереженнями контактних мікродеформацій. Початковий стан поверхонь було зафіксовано як номінально-нерухомих, тобто без видимих відносних мікропереміщень. Умови експерименту представленні у табл. 1, а результати моделювання на рис. 1. Як і при моделюванні, так і при експерименті важко визначити різницю в траєкторіях відносно руху двох тіл, які майже не відрізняються одне відносно іншого.

Таблиця 1

Умови комп'ютерної симуляції та фізичного експерименту.

	Амплітуди сили тертя, Н	Амплітуда вимушених коливань, μm	Тангенціальна жорсткість Н/ μm	Частота, Гц	Матеріал	Маса деформованого шару, г
Експеримент	30	5	10	10	Сталь 30ХГСА загартована	-
Моделювання	30	5	10	10	-	0,0137

Однак, більш детальніше дослідження фазових портретів показує деяку розбіжність у траєкторіях руху основи і поверхні, що з нею контактує. На протязі першого періоду відбувається одиничний імпульс мікропроковзування, який фіксується на фазових траєкторіях (рис. 2) та на перебігу відносної швидкості J (рис. 3). Для пружного контакту ($n = 0$) й пружно-пластичного ($n > 0$) характеристика тертя показана на рис. 4 а, рис. 4 б, відповідно.

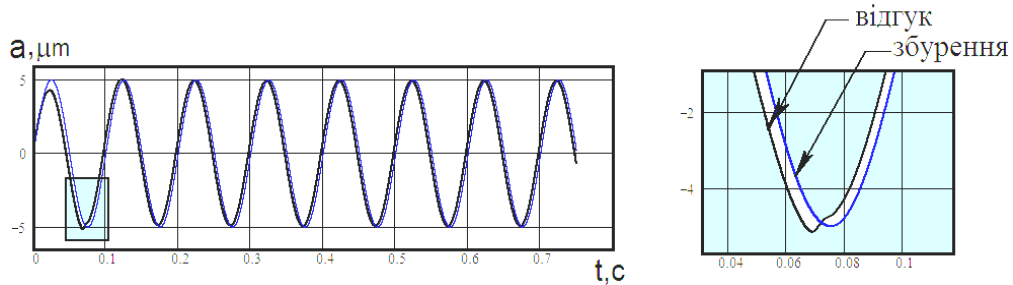


Рис. 1. Відносний рух двох поверхонь в режимі попереднього зміщення. Параметр пластичності $n=0$

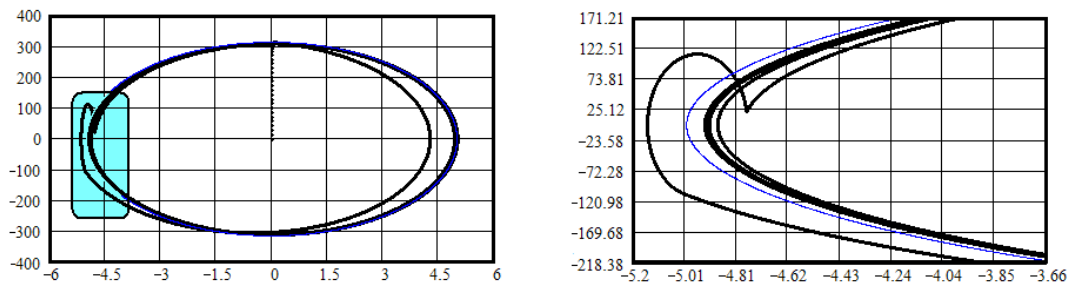


Рис. 2. Фазова діаграма динамічного коливального руху у ННФК в умовах попереднього зміщення.

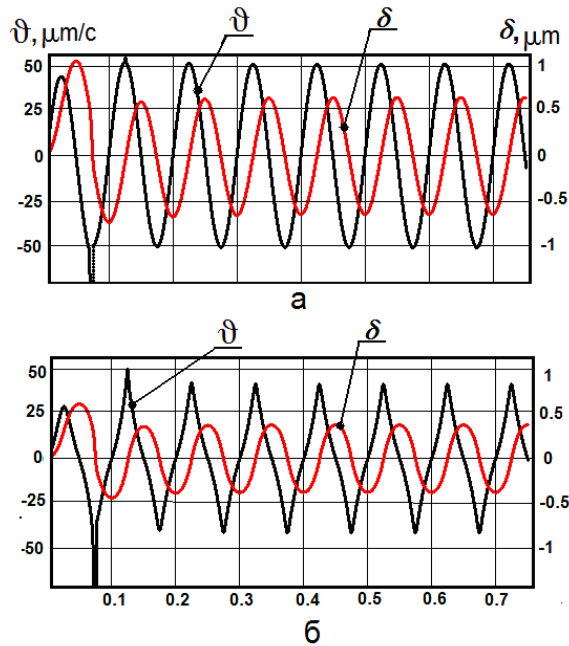


Рис. 3. Перебіг відносних швидкостей при параметрі пластичності $n = 0$ - а, $n = 6$ - б.

Аналіз отриманих віброграм цілком відповідають реальним умовам контактування. Фізичний експеримент проводився по схемі кулька-площина. Враховуючи те, що деформований шар під кулькою має діаметр 550...670 μm й товщину 40...45 μm , то прийнята маса m є близькою до реальної.

Вплив параметру пластичності полягає, в першу чергу, у зменшенні впливу динамічного фактора на ННФК. Якщо при пружному контакті відносна швидкість змінюється за тим же законом що й збурення, то при пластичному зростає нелінійність ковзання. Крім того, абсолютні амплітуди відносних мікрозміщень та швидкостей зменшуються (рис. 5).

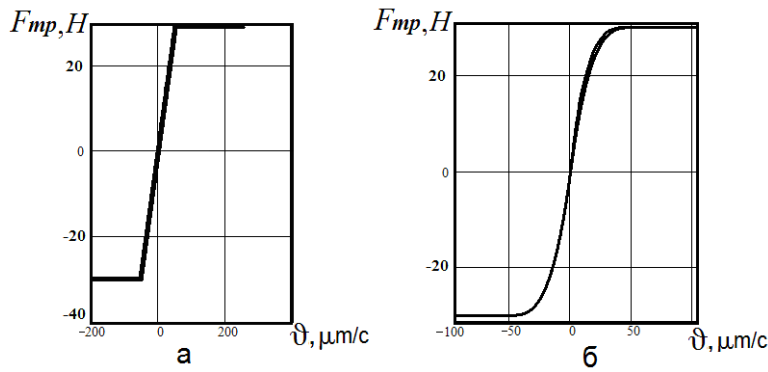


Рис. 4. Характеристика тертя для пружного ($n=0$) та пружно-пластичного контакту ($n=6$).

В характеристиці тертя важливим є функція відносної швидкості ΔJ поверхонь ННФК під час перебування у стані попереднього зміщення. Фундаментальні дослідження теорії попереднього зміщення, що представлені Костогризом С.Г. вперше дали можливість визначити час, за який досягається критичне значення мікропереміщення в момент переходу до ковзання[3]:

$$t(w) = \frac{1}{w} \left[\arcsin \frac{q \cdot m}{t_a \cdot |W_{ik}(iw)|} \right] \quad (1)$$

де t_a - амплітуда питомої зсувної сили, яка змінюється по гармонічному закону;
 q - нормальний тиск;
 m - коефіцієнт тертя;

$|W_{ik}(iw)|$ - модуль амплітудно-фазової частотної характеристики (АФЧХ) у функції безрозмірної частоти $a = \frac{w}{\Omega_t}$;

w - частота збурення;

Ω_t - власна частота контакту у тангенціальному напрямку;

АФЧХ визначаємо за формулою:

$$|w_{tk}(iw)| = \frac{\sqrt{x(n)^2 + \left(\frac{d}{p}\right)^2 x(n)a^2}}{\sqrt{[x(n) - a^2]^2 + \left(\frac{d}{p}\right)^2 x(n)a^2}}$$

де $d = \frac{4n}{(2n+1)(n+1)+n}$ - еквівалентний логарифмічний декремент коливань, n - параметр пластичності,

$x = \frac{(n+1)^{\frac{n+1}{n}}}{(n+1)^{\frac{n+1}{n}}}$ - коефіцієнт, який встановлює яку частину повної сили тертя займає тангенціальне навантаження в границях повного зміщення за умовою:

$$t_k(w) \leq x(n)qm. \quad (2)$$

Формула (1) дозволяє оцінити час перебування контакту на протязі першої чверті циклу у стані номінальної нерухомості. Умова (2) має місце тоді, коли номінальна дотичне напруження в контакті не перевищує ту частину граничної сили статичного тертя, яке відповідає пружній частині повного попереднього зміщення. У випадку коли $t_k(w) = q \cdot m$ тангенціальні напруження приймають своє максимальне значення, відбувається перехід до повного проковзування по всій площині контакту.

Амплітудно-фазова частотна характеристика $|W_{tk}(iw)|$ отримана шляхом вирішення диференційного рівняння руху у ННФК методом прямих перетворень Лапласа при нульових початкових умовах. АФЧХ в Лапласовому зображенні є передаточною функцією між рівнем відносної деформації e та тангенціальним напруженням. На сьогодні вираз (1) є єдиною можливістю оцінити в межах лінеаризованої моделі час пружного тангенціального контакту в

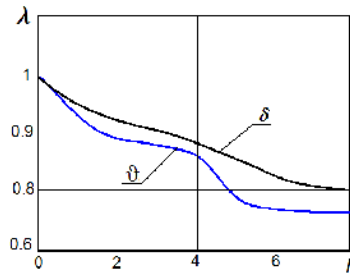


Рис. 5. Порівняльна характеристика мікро переміщень та швидкостей в стані попереднього зміщення в залежності від параметру пластичності, де $\lambda = \frac{\dot{\vartheta}_{sp}}{\dot{\vartheta}_{mn}}$ - відношення швидкості зміщення поверхонь у пружному стані до пружно-пластичного

залежності від частоти збурення, тангенціальної жорсткості, маси деформованого шару та параметру пластичності. Для умов моделювання та фізичного експерименту отримані наступні залежності $t(\omega)$ (рис. 6).

Аналіз залежностей на рис. 6. показує, що для даних умов контактування мінімальне значення часу $t(\omega)$ не залежить від частоти збурення і пластичності контакту. При характерній довжині $D_0 \approx 1 \mu\text{m}$, та $t(\omega)=0,01$ параметр швидкості $\Delta J \approx 100 \mu\text{m}/\text{c}$. Це підтверджує інтуїтивне оцінювання цієї величини багатьма дослідниками, які використовували максимальне значення $\Delta J=100 \mu\text{m}/\text{c}$ для побудови теорії статичного тертя та мультитактної взаємодії поверхонь. На рис. 7 визначений час в залежності від безрозмірної частоти $a = \frac{W}{\Omega_t}$. Встановлено, що при деякій частоті коливаний

збурення втрачається вплив параметру пластичності на тривалість часу $t(\omega)$. В даному випадку при $\alpha=0,783$. Особливо це помітно в умовах набування контактом пружних характеристик ($n < 1$) (рис. 5.7,а). При пластичному контакті ($n > 1$) така фіксована частота вимушених коливань відсутня.

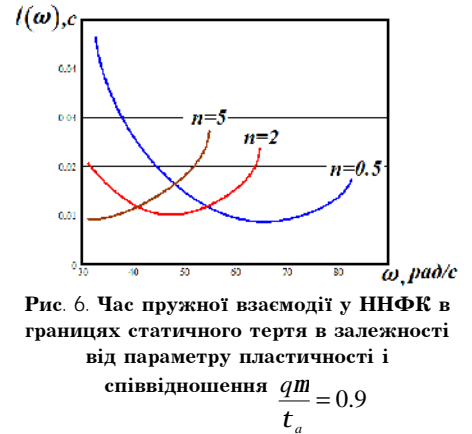


Рис. 6. Час пружної взаємодії у ННФК в границях статичного тертя в залежності від параметру пластичності і співвідношення $\frac{qm}{t_a} = 0.9$

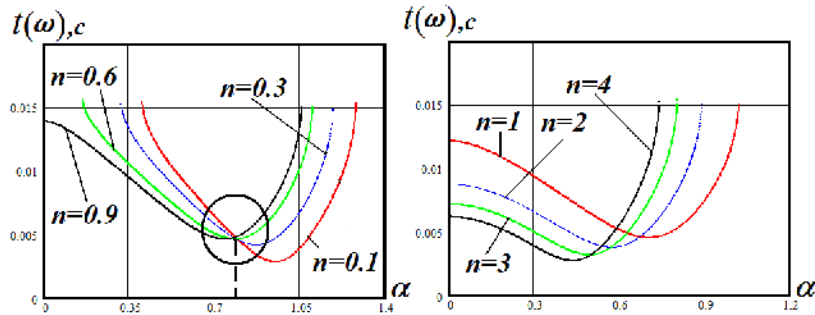


Рис. 7. Вплив параметру пластичності на тривалість часу переддеформування контакту у тангенціальному напрямку при збуренні зусиллям $t(t) = t_a \sin \omega t < q \cdot m$

З врахуванням того, що традиційні частоти при яких працюють ННФК є досить малими, можна констатувати, що час перебування взаємного розташування елементів з'єднання у стані попереднього зміщення знаходиться в границях 0,075...0,015 секунди. Таким чином, враховуючи мікрогеометрію контактних поверхонь, зростання з'єднань, пружно-пластичну характеристику, частоту збурення можна визначити характерну мікрошвидкість ΔJ у характеристиці тертя при якій відбувається перехід від абсолютного спокою до попереднього зміщення й наступного ковзання.

З врахуванням особливостей відомих методів опису процесу „напруження-деформація” у нелінійних механічних системах при циклічному тангенціальному навантаженні, важко визначити дійсну амплітуду малоамплітудного фретингу. Особливо на границі переходу до ковзання, коли відбувається миттєва зміна характеристики тертя. Еволюція параметрів контакту у випадку режиму динамічного зчеплення проковзування(РДЗП) породжує автоколивання, що накладаються на основну гармоніку фретинг-процесу, а наявність спадаючої характеристик тертя до зменшення тангенціального опору однієї поверхні відносно іншої, так зване „розріднення” тертя. Слід зауважити, що в рамках поставленої задачі особливе місце займає характеристика тертя, так як тертя є єдиною рушійною силою що призводить до відносного переміщення в елементах контактної пари. На відміну від різних за природою зовнішніх силових або вібраційних факторів, ті чи інші закони тертя безпосередньо діють між елементами контактної пари. Тому значним досягненням є врахуванням початкового стану контакту з врахуванням шорсткості поверхні, так як відносні мікропереміщення співрозмірні з геометричними розмірами мікронерівностей. Циклічного навантаження контакту в межах попереднього зміщення нагадує процес розхитування поверхонь на окремих ділянках, що складають фактичну площу контакту. Будь-яка мала зміна одного з чинників стану ННФК призводить до реалізації різних сценаріїв динамічного руху системи. Оптичні дослідження поверхонь, які знаходились під дією циклічних тангенціальних навантажень, показали велике різноманіття рушійних механізмів руйнування поверхонь від дії малоамплітудного-фретингу.

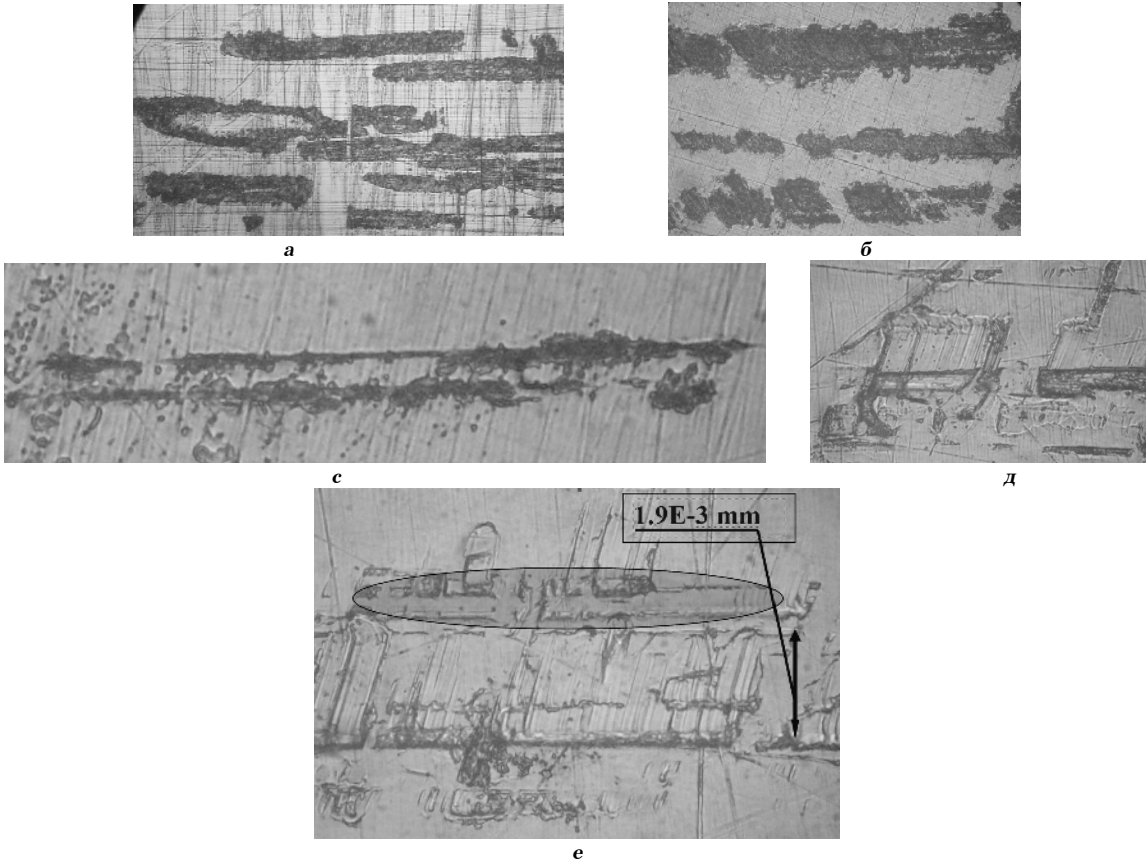


Рис. 9. Наслідки мікропроковзувань та розвитку малоамплітудного фретингу на поверхні номінального зчеплення в режимі попереднього зміщення. а, б, с – мало амплітудний фретинг в границях окремих плям контакту. д, е – після очистки поверхні від окислів ортофосфорною кислотою. Виділена область показує сліди від проковзування на перших циклах навантаження

Враховуючи вище згадане, покажемо як впливає на характер динамічного руху характерна швидкість ΔJ та параметр пластичності n в режимі попереднього зміщення. На рис 10 представлена порівняльна характеристика сили тертя, відносної швидкості та переміщень під час тангенціального навантаження контакту силою 30 Н й частотою 10 Гц.

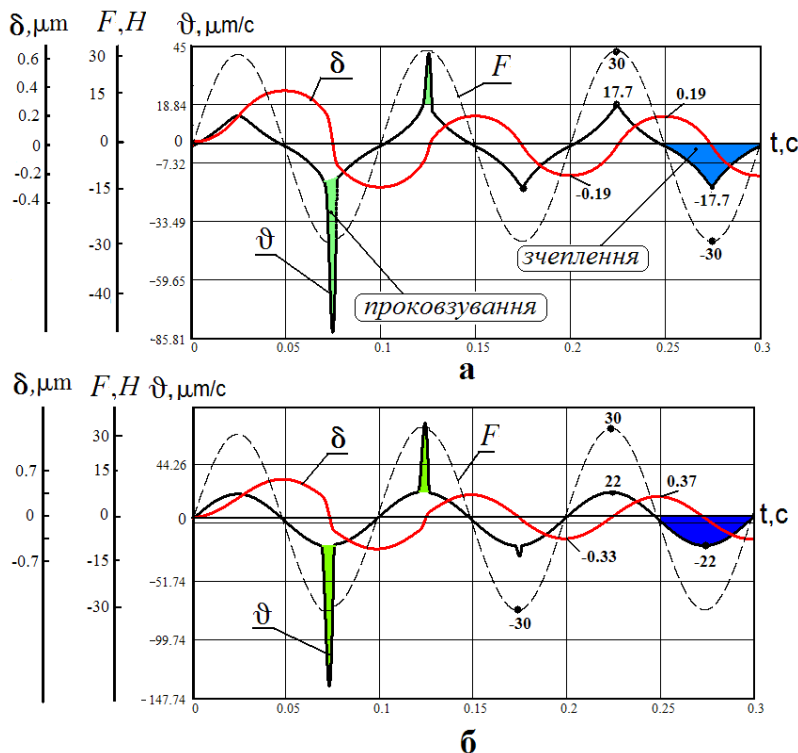


Рис. 10. Діаграми динамічної та фрикційної поведінки ННФК в умовах номінальної нерухомості пружно-пластичного (а) $n = 3,5$ та пружного контакту (б) $n=0$. Параметр $DJ=22 \text{ мкм/с}$

Більш наочно вплив пластичності показаний на рис. 11. Амплітуда у контактних переміщеннях для пружного контакту може збільшуватися в 1,5...2 рази по зрівнянню з пластичним. Це дає можливість керуючись поверхневими властивостями деталей збільшити тривалість номінальної цілісності з'єднань. Однак, це стосується помірних нормальних та тангенціальних зусиль.

На рис. 12 показаний вплив показника характеристики тертя ΔJ на динаміку контактного розхитування. Для відповідного стану ННФК параметр ΔJ є тою максимальною відносною швидкістю, при якій контакт не переходить до глобального ковзання.

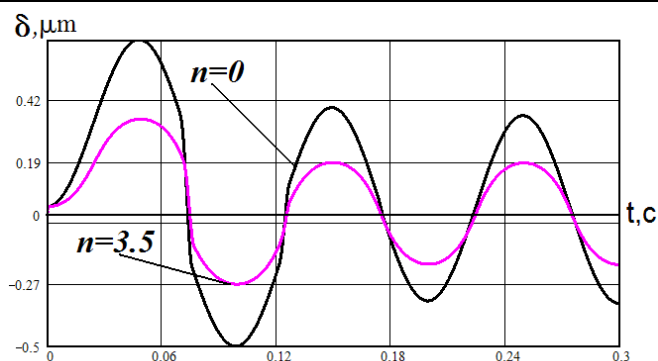


Рис. 11. Порівняльна характеристика відносного зміщення контактної пари в залежності від степені пластичності

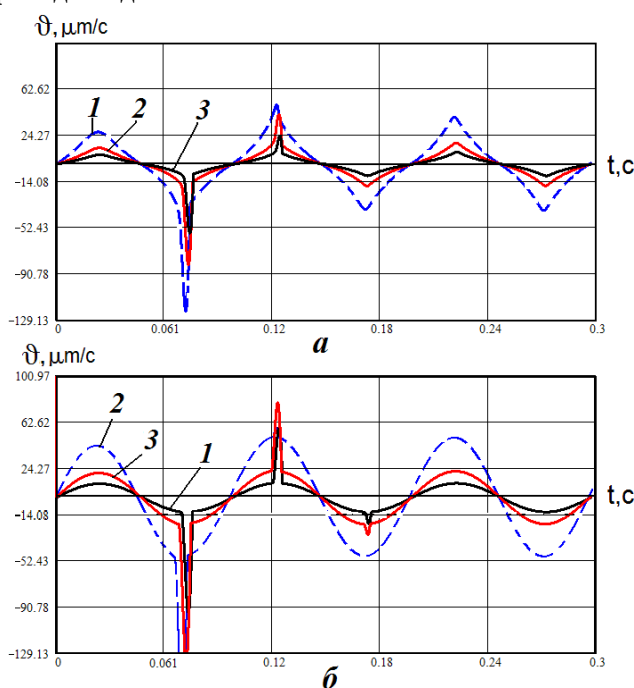


Рис. 12. Вплив максимально можливої швидкості відносного мікро- переміщення у ННФК в стані квазістатичного тертя на відносну швидкість динамічного зміщення при $n = 3,5$ (а), $n = 0$ (б), частоті збурення 10 Гц. Тут $DJ = 12$ $\text{mm}/\text{c} - 1$, $DJ = 22$ $\text{mm}/\text{c} - 2$, $DJ = 50$ $\text{mm}/\text{c} - 3$.

Таким чином, запропонована модель цілком коректно відображає динамічну картину руху поверхонь у випадку квазістатичного тертя. Будь-яка відмінність у характері перебігу відносного переміщення контакту модель адекватно реагує стрибком швидкостей.

Література

1. Шалапко Ю.І. Динамічні та фрикційні чинники зчеплення поверхонь в умовах вібраційного навантаження // Вісник Технологічного університету - 2006.- №1, с. 80 – 84
2. Шалапко Ю.І. Вейвлет-аналіз еволюційних задач динаміки систем з сухим тертям та фретинг-корозією. // Вісник двигунобудування-2006.-№2 - с.22-28
3. Шалапко Ю.І. Вплив Штрибек ефекту на нелінійний осцилятор з сухим тертям при кінематичному збудженні // Вісник Технологічного університету - 2005.- №1, с. 35 – 43
4. Шалапко Ю.І. Еволюційна модель фрикційної взаємодії поверхневих шарів при фретингу // Вісник двигунобудування-2006.-№4
5. Амплитудно-частотные соотношения для фреттинга за пределами предварительного смещения / С.Г.Костогрыз, В.В.Ковалевский // Трение и износ.- 1992.- Т. 14, № 2.-С. 308-312.

Надійшла до редакції
15.6.2008 р.