

ПОВЕРХНЕВІ ЯВИЩА У ЗМІЩАНОМУ НОМІНАЛЬНО-НЕРУХОМОМУ ФРИКЦІЙНОМУ КОНТАКТІ

Відомо, що визначення властивостей номінально-нерухомих фрикційних з'єднань (ННФЗ) в умовах тангенційного знакозмінного навантаження викликає певні труднощі, пов'язані зі значною тривалістю проведення таких досліджень а також зв'язаними з цим розбіжностями в отриманих результатах. В роботі розглянуто методи проведення досліджень та визначення ключових параметрів роботи ННФЗ.

Загальновідомо, що перехід номінально-нерухомого контакту зі стану зчеплення до проковзування займає досить тривалий час і полягає у трансформації дільниці зчеплення. Перехід до проковзування для відповідних умов контактування кульки з площиною може відбутися протягом значного проміжку часу (декілька діб безперервної роботи фрикційного контакту). Такий тривалий час динамічного контактування призводить до значного розсіювання експериментальних даних з визначення дійсного терміну перебування контакту в стані відносної нерухомості (рис. 1).

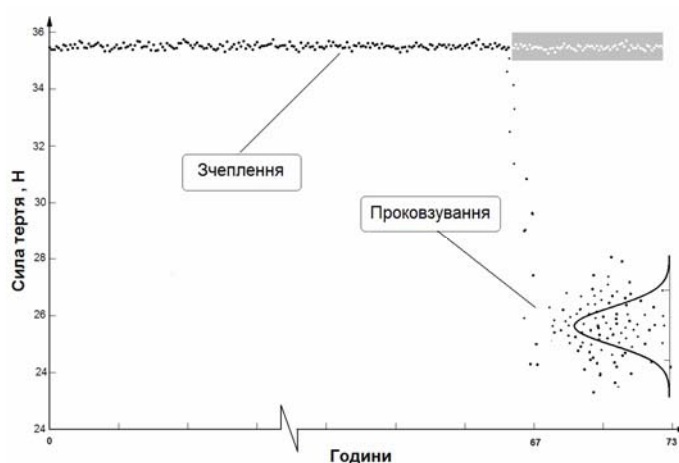


Рис. 1. Перебіг сили тертя в часі перебування у стані зчеплення та фіксація тертя у момент переходу до повного проковзування контакту. Контакт сталі 30ХГСА з кулькою ШХ15 частота 100 Гц, $P_n = 85$ Н

Тривалість перебування контакту в стані номінальної нерухомості визначається мікрофретингом на границях плям контакту та контактною втомою області зчеплення. Для визначення здатності конструкційних матеріалів, що використовуються у літакобудуванні та інших галузях, які потребують відповідальних з'єднань витримувати динамічні тангенціальні навантаження без втрати цілісності ННФЗ, була проведена серія експериментів за наступною схемою:

- визначено силу та коефіцієнт тертя зворотно-поступального ковзання при амплітуді 50...100 μm ;
- поступово збільшують нормальне навантаження до моменту зчеплення поверхонь;
- збільшення нормального навантаження на 25 %;
- витримка контактної пари до моменту переходу до повного проковзування;
- визначення сили тертя та відносного проковзування.

Для прискорення досліджень було використано інший план випробувань. Контакт витримувався в стані квазістатичного тертя визначений час, а далі збільшувалась амплітуда збурення до початку проковзування. Вигляд осцилограм для кожного зі станів показаний на рис. 2.

Таким чином, для характеристики фретингостійкості ННФК маємо наступні експериментальні дані: коефіцієнт тертя сталого ковзання μ_k , мінімальна нормальна сила P_{\min} , що забезпечує номінальну нерухомість контакту, сила тертя в момент переходу до проковзування (режим динамічного зчеплення-проковзування), відносні мікропереміщення δ , час перебування у стані зчеплення, амплітуда збурення, при якій відбувається відрив поверхонь у тангенціальному напрямку.

Варто відмітити такі особливості фретинг-процесу як динамічна поведінка його чинників. При зворотно-поступальному русі сила тертя чітко відповідає закону Амонтона-Кулона, осцилограма руху тіла має прямокутну форму. У квазістатичному стані (рис. 2,б) осцилограми руху поверхонь не відрізняються одна від одної.

Момент початку мікропроковзування фіксувався за появою відмінностей у осцилограмах переміщень одного зразка відносно іншого, як показано у виділеному фрагменті на рис. 2,в. При цьому відносні фрикційні зміщення в абсолютному вимірюванні дають значення до 10 μm (рис. 2,в). Всі експериментальні динамічні

характеристики, які були отримані у трьох станах: повного зчеплення номінальних площин, мікропроковзування – перехід до режиму динамічного зчеплення – проковзування (РДЗП) та зворотно-поступального руху; повністю відповідають аналогічному розв’язку диференційних рівнянь руху динамічної системи [1, 2].

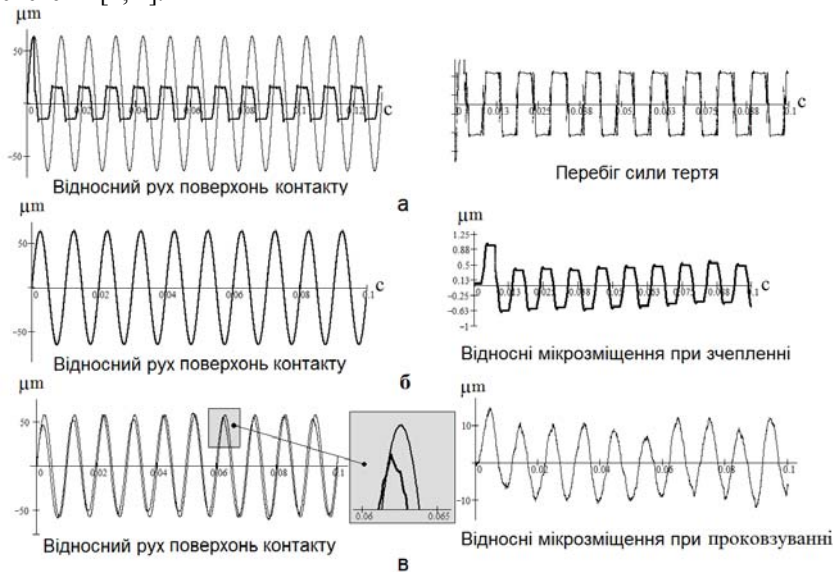


Рис. 2. Осцилограми кожного етапу випробувань номінально-нерухомого фрикційного контакту (ННФК) на витривалість в умовах динамічного навантаження загартованої сталі 30ХГСА: а – мікропереміщення та сила тертя у контактній парі при ковзанні; б – переміщення та відносні зміщення поверхонь у стані зчеплення; в – початок мікропроковзування у контактній площині. Частота коливань 100 Гц, амплітуда збурення $A=64 \mu\text{m}$, нормальний тиск $\sigma_n = 125 \text{ МПа}$

На рис. 3, 4 представлено РДЗП при накладанні відносних швидкостей та переміщень. Горизонтальні ділянки вброграм переміщень відповідають зчепленню, вертикальна – проковзуванню. Таким чином, будь-який стан інтерфейсу контактної пари можна адекватно описати за експериментальними даними. Головними чинниками з енергетичної точки зору є функція сили тертя в часі та проковзуванні (рис. 5, а), а також сили тертя відносно швидкості проковзування (рис. 5, б). Тоді потужність сил тертя можна визначити як

$$P_i = \sum_{t_1}^{t_2} \Delta F_i \Delta \vartheta,$$

де $t_i = t_2 - t_1$ – тривалість імпульсу проковзування (рис. 5).

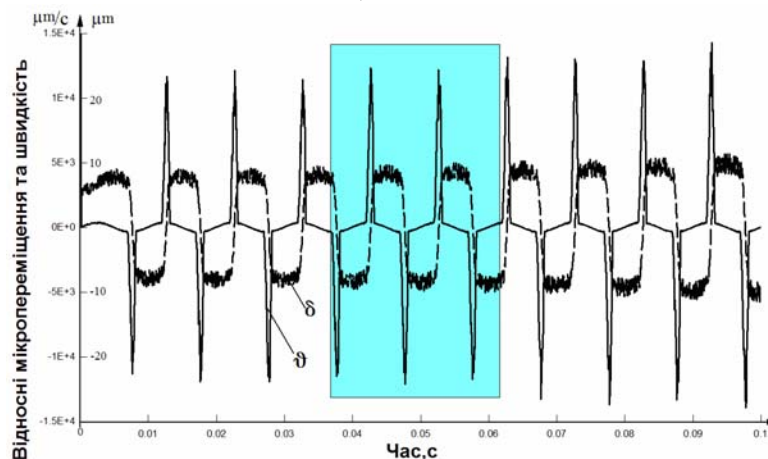


Рис. 3. Процес динамічного зчеплення-проковзування у перебігу відносних швидкостей та переміщень

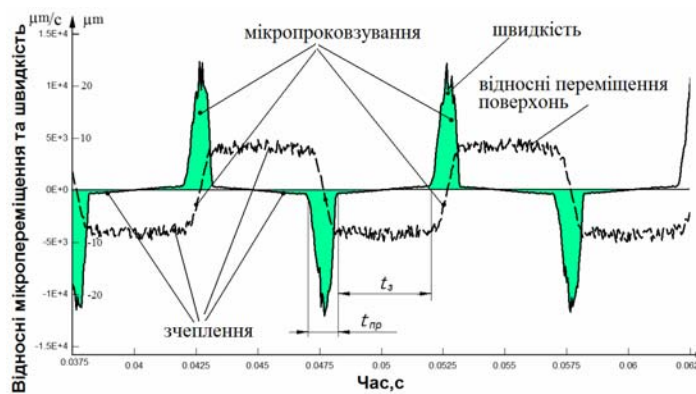


Рис. 4. Часовий розподіл тривалості імпульсів проковзування (t_{np}) та зчеплення (t_{34}) у РДЗП (виділена область рис. 3)

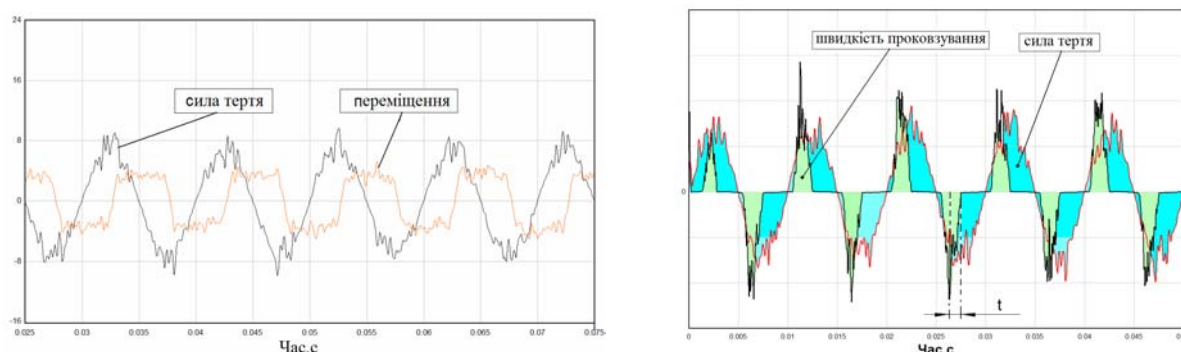


Рис. 5. Функція сили тертя у порівнянні з перебігом відносного мікропереміщення та швидкості

Графічним інтегруванням одержано числові значення потужності пружного деформування та сил тертя за один цикл коливань. Аналогічно, для визначення роботи фрикційної взаємодії у тому чи іншому режимі фретинг-процесу. Так, для амплітуди проковзування 10 μm , сили тертя 35...45 Н й частоти 100 Гц потужність динамічної фрикційної взаємодії за цикл досягає $\Pi=12 \cdot 10^{-5}$ Вт/цикл. Фретингостійкість й динамічна цілісність ННФК була визначена для відповідного класу конструкційних матеріалів, що використовують у літакобудуванні та підприємствах енергетичної галузі промисловості (табл. 1). Ці матеріали відносяться до класу корозійностійких, жаростійких, жароміцних сталей та сплавів.

Таблиця 1

Матеріали та покриття, що досліджувались на фретингостійкість	
Корозійностійкі	Склад
X18H10ET	Cr18 %,Ni10 %,Se1 %,Ti1 %
1X17H2	C1 %,Cr17 %,Ni2 %
20X13	0,2 %C, Cr13 %
Жароміцні	Склад
ХН30ВМТ	Cr1 %,Ni30 %,W1 %,Mo1 %,Ti1 %
ХН78Т	Cr1 %,Ni7,8 %,Ti1 %
Леговані	Склад
40ХН2	0,4 %C, Cr1 %,Ni2 %
30ХГСА	0,3 %C, Cr1 %,Mn1 %,Si1 %
Сплави титану	Склад
ОТ-4	4 %Al, 1,4 %Mn
Лазерне поверхнєве оплавлення та легування	Nb, WC-Co (BK8)

З врахуванням площини контакту питома потужність сил тертя, що втрачається на одне i -е проковзування

$$\Pi_s = \frac{1}{S} \Pi_i,$$

де S – площа контакту, m^2 .

Результуюча потужність по номінальній площині контакту дорівнює сумі потужностей всіх елементарних сил тертя для кожної з N плям контакту $\Pi = \sum_{i=1}^n F_i g_i$, де n – кількість плям контакту. Робота сил тертя за N періодів

$$A = \int_0^t F_i \cdot d\delta = \int_0^{nT} F_i \cdot g_i dt,$$

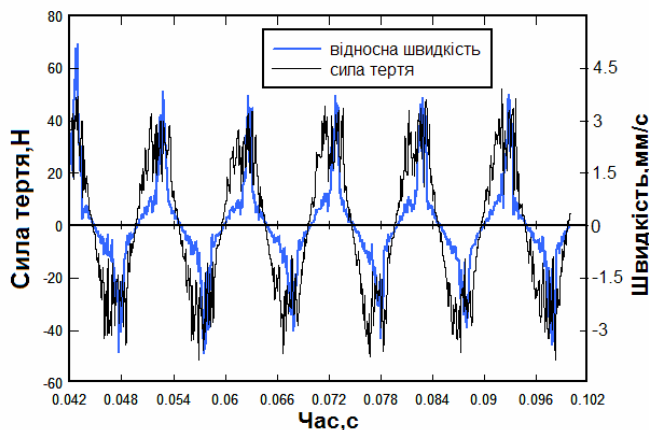
де $d\delta$ – елементарне відносне мікропроковзування, g_i – відносна швидкість, T – період, n – кількість циклів.

На рис. 6 представлений результат експериментального визначення середньої роботи сил тертя за десять циклів проковзування. У таблиці 2 представлені підсумкові дані по характеристиці фретинг-процесів вибраних контактних пар.

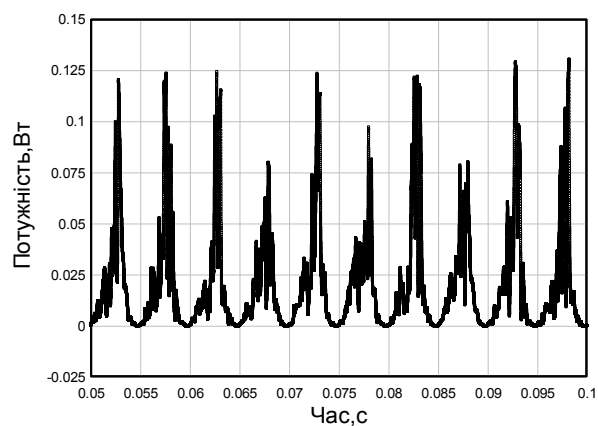
Так як робота сил тертя рівномірно розподілена по нормальній теоретичній поверхні, то природно оперувати значеннями питомої потужності та роботи за один цикл, як відношення інтегральних показників до площини контакту. Цілісність квазістатичного (змішаного) контакту (С) визначаємо як відношення кількості циклів коливань до моменту переходу у РДЗП, що витримують дослідні пари (N), та циклів еталонної контактної пари. Фретингостійкість дослідної поверхні визначаємо як втрати об'єму матеріалу в області проковзування у РДЗП (F). Зносостійкість контактної пари при зворотно-поступальному сталому ковзанні поверхонь (Z) визначаємо як втрати об'єму матеріалу. Відповідно маємо:

$$C = \frac{N}{N_m}, F = \frac{\Delta V_F}{A_\Sigma}, Z = \frac{\Delta V_z}{A_z},$$

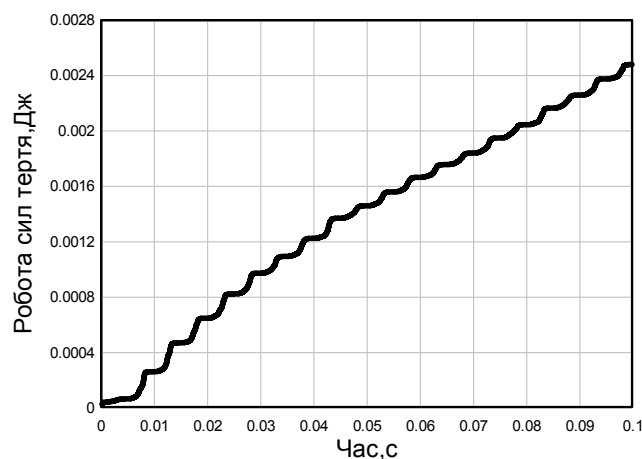
де A_Σ – робота сил тертя за відповідний час спостереження.



а



б



в

Рис. 6. Перебіг сил тертя та відносної швидкості проковзування для інтерфейсу сталі ХН30ВМТ у контакті з кулькою ШХ15 при частоті коливань 100 Гц, амплітуді збурення 10 $\mu\text{м}$, амплітуді проковзування 3 $\mu\text{м}$ (а), потужності сил тертя у часі проковзування (б), робота сил тертя за 10 циклів коливань (в)

З таблиці 2 можна зробити висновок, що лазерне опромінювання сталі з покриттям WC-Co забезпечує достатню цілісність контакту не тільки у РДЗП, а й у режимі зворотно-поступального тертя. Для збереження номінальної нерухомості твердих поверхонь необхідно прикласти більші нормальні навантаження. Тому сила тертя априорі є більшою. На початку проковзування велике значення має напружено-деформований стан поверхонь, розподіл контактних плям та характеристика тертя, які є суттєво індивідуальні для того чи іншого матеріалу. Так на рис. 8 показані осцилограми РДЗП для різних контактних пар. Для більш м'яких цілісність контакту втрачається за розрахунок формозміни поверхні розділу, а для твердих – мікрозношенням.

Середнє значення потужності за відповідний інтервал часу визначено за формулою:

$$\Pi = \frac{1}{t_0 - t_1} \int_{t_0}^{t_1} \Pi(t) dt$$

**Енергетичні та міцнісні характеристики фретинг-процесів для конструкційних матеріалів
при переході до режиму динамічного зчеплення-проковзування**

Матеріал	P_S , Вт/мм ²	A_S , Дж/мм ²	$\mu_{ст}$	$\mu_{кін}$	C_S	$F_S \cdot 10^{-6}$ мм ³ /Дж	$Z_S \cdot 10^{-6}$ мм ³ /Дж
Сталь 45	0,29	0,041	0,78	0,64	1	3,57	236,78
Сталь 45 (лазерна обробка)	0,18	0,031	0,62	0,52	1,76	4,25	176,11
X18H10ET (гартування 970 ⁰ C)	0,16	0,024	0,65	0,51	2,1	2,07	169,88
20X13 (гартування 1050 ⁰ C)	0,20	0,029	0,67	0,58	2,95	1,96	1439,11
ХН30ВМТ ()	0,21	0,030	0,69	0,55	2,01	2,11	156,34
ХН78Т	0,27	0,035	0,69	0,58	2,35	2,34	182,18
40ХН2 (гартована 840 ⁰ C)	0,22	0,040	0,74	0,67	1,87	3,01	196,85
30ХГСА (нормалізована та гартована 870 ⁰ C)	0,25	0,038	0,75	0,66	1,15	2,86	212,16
Сталь 45+WC-Co+ лазерне опромінування	0,12	0,026	0,64	0,41	4,36	1,15	80,87
Сталь 45+WC-Co	0,21	0,022	0,82	0,68	3,08	1,56	130,64
OT4 Відпал 680 ⁰ C	0,24	0,032	0,88	0,72	5,08	3,14	170,58

Розподіл потужностей сил тертя у сигналі, що отриманий з експерименту, показаний на рис. 7

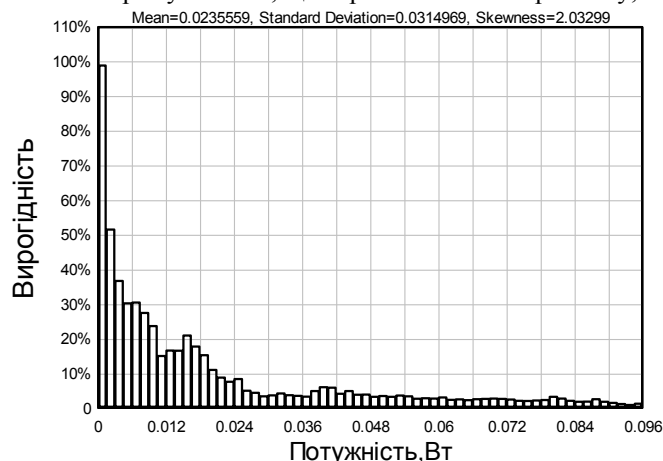


Рис. 7. Гістограма розподілу потужності сил тертя при РДЗП модельної сталі 45 (HRC – 41...42) на плямі контакту радіусом 0.16 мм

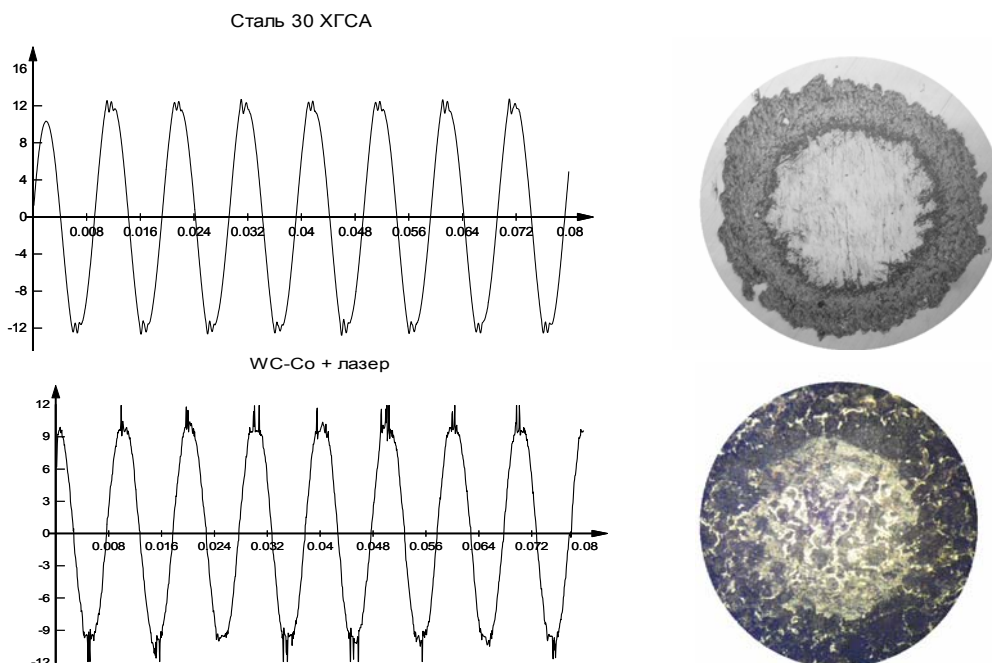


Рис. 8. Осцилограми мікропереміщень контактних пар залежно від матеріалу та картини руйнування однойменної плями контакту

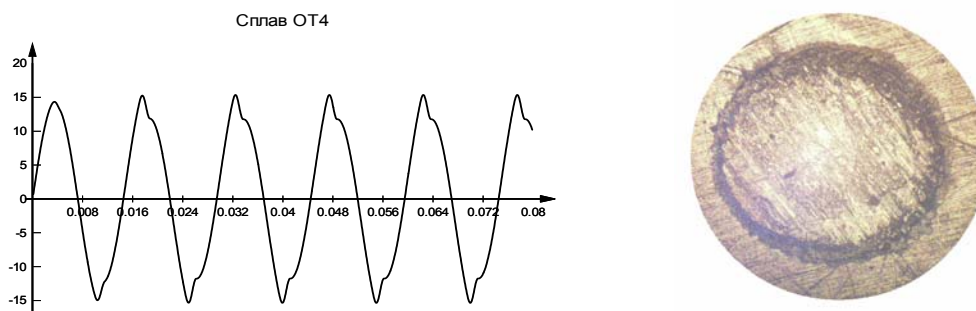


Рис. 8. Осцилограми мікропереміщень контактних пар залежно від матеріалу та картини руйнування однойменної плями контакту (продовження)

Висновки

Дослідження виявили, що питома потужність сил тертя в контакті для більш м'яких матеріалів вища (досягає $0,29 \text{ Вт/мм}^2$), а отже для більш м'яких конструкційних матеріалів цілісність нерухомого фрикційного контакту втрачається за розрахунок формозміни поверхні розділу, а для твердих – мікрозношуванням. Таку залежність можна прослідкувати на осцилограмах відносного мікропереміщення поверхонь та зображеннях робочої зони контакту. Врахування цієї залежності при проектуванні вузлів устаткування дозволить уникнути передчасного руйнування поверхонь з'єднань, а отже збільшити термін експлуатації обладнання.

Література

1. Шалапко Ю.І. Моделювання та особливості тертя при переході від зчеплення до проковзування // Вісник Хмельницького національного університету – 2007. – № 1. – С. 234-241
2. Шалапко Ю.І. Динамічні та фрикційні чинники зчеплення поверхонь в умовах вібраційного навантаження // Вісник Хмельницького національного університету. – 2006. – № 1. – С. 80-84

Надійшла 20.5.2008 р.

УДК 621

Ю.И. ШЕВЧЕНКО

Киевский национальный университет строительства и архитектуры

ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДИНАМИЧЕСКОГО УРАВНОВЕШИВАНИЯ ВЫСАДОЧНОГО МЕХАНИЗМА ГВОЗДИЛЬНОГО АВТОМАТА

Проволочно-гвоздильные автоматы представляют собой довольно сложную динамическую систему, которой присуща активизация вибрационных процессов при увеличении скоростных режимов. Один из наиболее прогрессивных методов уменьшения вибрации – это эффективное уравнивание динамических систем.

На примере проволочно-гвоздильного автомата рассмотрим уравнивание отдельных его частей.

Главный исполнительный механизм проволочно-гвоздильного автомата (рис. 1) – кривошипно-ползунный. Статическое уравнивание ползуна предусмотрено с помощью противовеса, который закреплен на кривошипном валу в противофазе кривошипу (рис. 2).

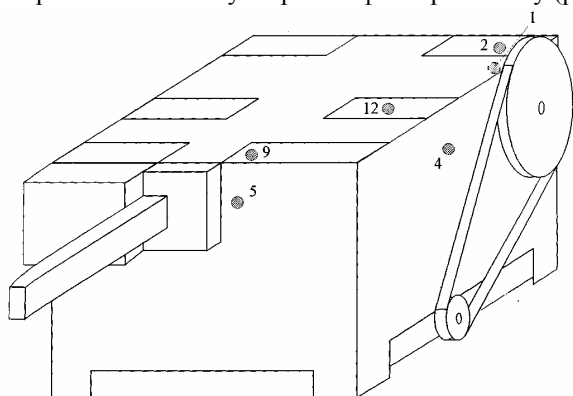


Рис. 1. Эскиз проволочно-гвоздильного автомата А-4216 с указанием мест установки вибродатчиков

Такая система обеспечивает уравнивание от 0,5 до 0,7 максимальной величины горизонтальной составляющей силы инерции ползуна, однако, настолько же увеличивает вертикальную составляющую. Для тихоходных автоматов, которые жестко крепятся к массивному фундаменту, это вполне допустимо, поэтому критерием, ограничивающим возможность применения данного способа уравнивания, принимается лишь величина остаточной максимальной горизонтальной составляющей силы инерции, которая не должна превышать части веса автомата, а момент относительно края подошвы автомата не должен превышать части момента от веса автомата относительно того же края.

Если же предполагается увеличение производительности автомата за счет роста скоростей a , значит, и инерционных нагрузок или же установка автомата на виброизолирующие опоры, увеличение вертикальной