

УДК 621.891

М. В. КІНДРАЧУК, О. І. ДУХОТА, В. Є. МАРЧУК, В. В. ХАРЧЕНКО,
Н. О. НАУМЕНКО

Національний авіаційний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ФОРМУВАННЯ ДИСКРЕТНО-ТЕКСТУРОВАНИХ МАСТИЛОЄМНИХ ПОВЕРХОНЬ НА ФРЕТИНГОСТІЙКІСТЬ ТРИБОСИСТЕМ

Виконано дослідження з визначення ефективності підвищення фретингостійкості трибосистем формуванням дискретно-текстурованих маслоємних поверхонь у вигляді регулярно розташованих мікрозаглиблень. Феномологічно такі поверхні розглядалися як дискретно-текстуровані, а мікрозаглиблення – як резервуари, що забезпечують постійну регенерацію граничних мастильних шарів в зоні фрикційного контакту. Формування дискретно-текстурованих поверхонь у вигляді системи лункових пірамідальних і сферичних мікрозаглиблень з заданими параметрами текстури на робочій поверхні зразків здійснювалось методом ударно-пластичного деформування. Досліджувались пари тертя з різним розташуванням матеріалів в парі за твердістю. Пари, у яких дискретно-текстурована поверхня формувалась на зразках з більшою твердістю, ніж твердість контртіла, умовно називали прямими парами. Пари з меншою твердістю дискретно-текстурованої поверхні ніж твердість контртіла називали оберненими. Встановлено, що у разі тертя шліфованих поверхонь за прийнятих умов фретингу мащення не забезпечує суттєвого підвищення фретингостійкості досліджуваних матеріалів як у прямих, так і у обернених парах тертя, що свідчить про недостатньо високу стійкість на таких поверхнях межових мастильних шарів. За таких же умов фретингу і умов мащення стійкість до фретинг-корозійного зношування пар тертя із дискретно-текстурованими поверхнями помітно зростає. Найбільший ефект підвищення зносостійкості досягається у прямих парах при сферичному профілі лунок. У порівнянні з базовим варіантом за абсолютним значенням величини зносу знос зразків із сферичним профілем лунок у прямих парах зменшився більш ніж у 6 разів. Одночасно помітно зменшився також знос контрзразків і сумарний знос пари. Очевидно, що за прийнятих параметрів формування дискретно-текстурованих поверхонь і параметрів фретингу, сферичний профіль забезпечує найбільшу змащувальну ефективність мікрозаглиблень у порівнянні із призматичним профілем. За результатами експерименту проведено статистичний аналіз та побудовано регресивні моделі залежностей величини зносу від технологічних параметрів формування дискретно-текстурованих поверхонь і параметрів фретингу.

Ключові слова: *фрикційно-контактна взаємодія, маслоємні поверхні, мащення, фретинг, зношування, механічна енергія.*

Вступ. Одним із традиційних способів забезпечення антифрикційності і зниження інтенсивності зношування деталей вузлів тертя є мащення. Тертя в умовах мащення знижує фрикційне навантаження деталей, а також за рахунок наявності у складі мастильного матеріалу спеціальних активних присадок сприяє формуванню на поверхні фрикційного контакту більш стійких до зношування вторинних структур не кисневого походження [1]. Разом з тим у номінально нерухомих з'єднаннях, що піддаються вібраційним навантаженням, при застосуванні традиційних способів фінішної механічної обробки деталей рідинні і навіть консистентні пластичні мастильні матеріали малоефективні. В таких з'єд-

наннях позитивний ефект мастильної дії спостерігається тільки на початковому, інкубаційному періоді фретингу, коли сформований мастильним матеріалом граничний мастильний шар зберігає цілісність.

Ідея, покладена в основу способу підвищення фретингостійкості трибосистем, ґрунтується на реалізації принципу мінімізації підведеної до трибосистеми механічної енергії та зниження динамічної навантаженості поверхонь шляхом забезпечення умов для регенерації граничних мастильних шарів в зоні трибоконтакту. Для номінально нерухомих з'єднань найбільш ефективно ця задача може бути вирішена формуванням мастилоємних поверхонь з регулярно розташованими мікрозаглибленнями. Феномонологічно такі поверхні нами розглядалися як дискретно-текстуровані, а мікрозаглиблення – як резервуари, що забезпечують утримання мастильного матеріалу в зоні фрикційного контакту [2–7].

Механізм впливу дискретно-текстурованих мастилоємних поверхонь на процеси тертя та зношування в умовах фретингу на сьогодні вивчено недостатньо. Очевидно, що основну роль в формуванні триботехнічних властивостей пар тертя в цьому випадку будуть відігравати параметри дискретної поверхні. Оптимальне розташування, форма і розміри мікрозаглиблень будуть сприяти проникненню мастильного матеріалу в зони безпосереднього фрикційного контакту, знижувати їх фрикційне навантаження і відповідно рівень підведеної до трибосистеми механічної енергії. У зв'язку з цим метою роботи було провести випробування пар тертя з різною формою профіля мікрозаглиблень і провести статистичний аналіз та побудувати регресивні розрахункові моделі залежностей величини зносу від досліджуваних параметрів.

Для визначення ефективності методу формування дискретно-текстурованих мастилоємних поверхонь в умовах фретинг-корозійного зношування на першому етапі проводились тестові порівняльні випробування з визначенням триботехнічних характеристик пар тертя з нетекстурованими поверхнями, сформованими шліфуванням, та з дискретно-текстурованими лунковими поверхнями за фіксованих параметрів фретингу.

Матеріали та методика досліджень. Випробування проводились на машині тертя МФК-1 на зразках виготовлених відповідно до ГОСТ 23.211-80. Формування дискретно-текстурованих поверхонь у вигляді системи лункових мікрозаглиблень з заданими параметрами текстури здійснювалось на робочій поверхні зразків методом ударно-пластичного деформування. Попередньо робоча поверхня зразків, а також робоча поверхня контрзразків піддавались механічній обробці шліфуванням із забезпеченням параметра шорсткості поверхні $Ra \sim 0,32$ мкм.

Для тестових випробувань було підготовлено пари тертя з різною формою профіля мікрозаглиблень і різним розташуванням матеріалів в парі за твердістю. Пари, у яких дискретно-текстурована поверхня формувалась на зразках із більшою твердістю ніж твердість контртіла, умовно називали прямими парами. Пари з меншою твердою дискретно-текстурованої поверхні ніж твердість контртіла, називали оберненими. Відомості про матеріали досліджуваних пар тертя представлено у табл. 1. На рис. 1 та у табл. 2 відповідно наведено технологічні схеми формування та параметри сформованих на досліджуваних зразках дискретно-текстурованих мастилоємних поверхонь.

Базовим варіантом для порівняння слугували пари тертя із таких же матеріалів з шліфованими робочими поверхнями. Випробування проводили в умовах тертя без мащення та з змащенням в режимі мастильного голодування при разо-

вому нанесенні на робочу поверхню зразків консистентного мастильного матеріалу ЦІАТИМ-201. Параметри віброконтактного навантаження при тестових випробуваннях складали:

- амплітуда відносного переміщення – $A = 175$ мкм;
- питоме контактне навантаження $P = 19,8$ МПа;
- частота коливань – $\nu = 25$ Гц;
- база випробувань – $N = 5 \cdot 10^5$ цикл.

Таблиця 1

Матеріали досліджуваних пар тертя

№ з/п	Пара тертя		Матеріал	Твердість, HRC
1.	Пряма	зразок	сталь 45, загартована	50...52
		контрзразок	сталь 45, нормалізована	20...22
2.	Обернена	зразок	сталь 30ХГСА, у стані постачання	18...20
		контрзразок	сталь 45, загартована	50...52

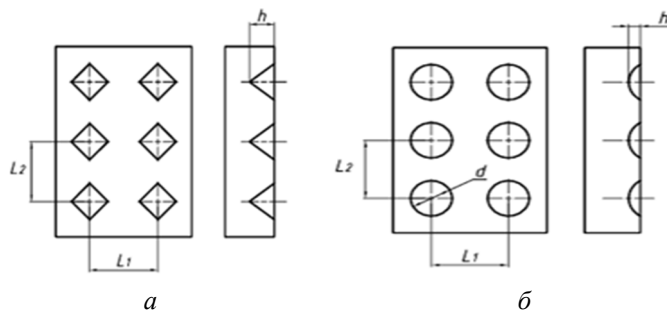


Рис. 1. Схеми формування дискретно-текстурованих мастилоємних поверхонь. Форма профілю мікрозаглиблень: а – празматична; б – сферична

Таблиця 2

Технологічні параметри дискретно-текстурованих поверхонь досліджуваних пар тертя

Варіант поверхні	Профіль лунки	Відстань між лунками в ряду, L_1 , м	Відстань між рядами лунок L_2 , м	Глибина лунки h_l , м	Об'єм лунки V_l , мм ³
1.	Празматичний	$2,0 \cdot 10^{-3}$	$2,0 \cdot 10^{-3}$	$0,15 \cdot 10^{-3}$	0,006
2.	Сферичний	$2,0 \cdot 10^{-3}$	$2,0 \cdot 10^{-3}$	$0,08 \cdot 10^{-3}$	0,021

Результати досліджень та їх обговорення. Отримані за результатами тестових випробувань величини зносу досліджуваних пар тертя в абсолютних значеннях, визначені ваговим методом за втратою маси зразків представлені діаграмами на рис. 2.

Як видно (рис. 2), у разі тертя шліфованих поверхонь за прийнятих умов фретингу мащення не забезпечує суттєвого підвищення фретингостійкості досліджуваних матеріалів як у прямих, так і у обернених парах тертя, що свідчить про недостатньо високу стійкість на таких поверхнях межових мастильних шарів.

За таких же умов фретингу і умов мащення стійкість до фретинг-корозійного зношування пар тертя із дискретно-текстурованими поверхнями помітно зросла.

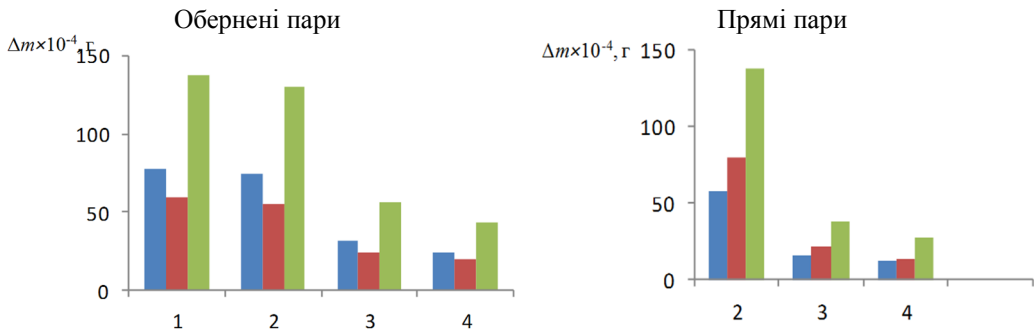


Рис. 2. Діаграма абсолютних значень величин вагового зносу зразків, контрзразків і сумарного зносу пар тертя при випробуванні на зношування в умовах фретинг-корозії. Варіанти підготовки поверхонь зразків: 1 – шліфування, без мащення; 2 – шліфування, мащення ЦІАТИМ-201; 3 – дискретно-текстурована поверхня № 1, мащення ЦІАТИМ-201; 4 – дискретно-текстурована поверхня № 2, мащення ЦІАТИМ-201

Найбільший ефект підвищення зносостійкості досягається у прямих парах при сферичному профілі лунок. У порівнянні з базовим варіантом за абсолютним значенням величини зносу знос зразків із сферичним профілем лунок (табл.1, варіант № 2) у прямих парах зменшився більш ніж у 6 разів. Одночасно помітно зменшився також знос контрзразків і сумарний знос пари. Очевидно, що за прийнятих параметрів формування дискретно-текстурованих поверхонь і параметрів фретингу, сферичний профіль забезпечує найбільшу змащувальну ефективність мікрозаглиблень у порівнянні із призматичним профілем. До того ж, як видно із рис.3 мікрозаглиблення із сферичним профілем характеризуються найменшою швидкістю зменшення мастилоємності (об'єму) в міру зростання лінійного зносу зразків.

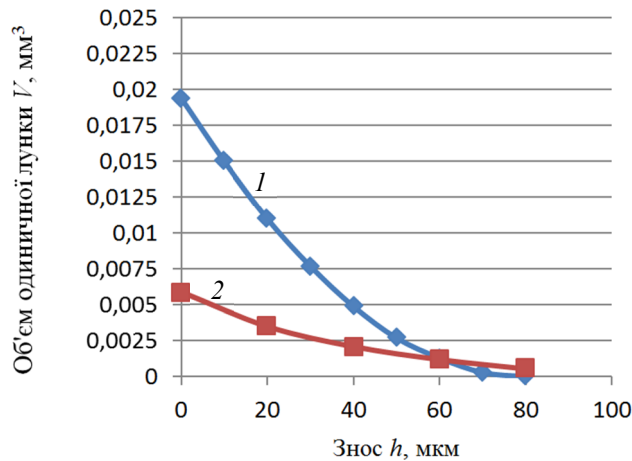


Рис. 3. Розрахункові залежності зміни об'єму однієї лунки у прямих парах від величини лінійного зносу. Профіль лунки: 1 – призматичний; 2 – сферичний. Параметри дискретно-текстурованих поверхонь тотожні наведеним у табл. 2.

Таким чином, можна сказати, що формування дискретно-текстурованих поверхонь з розвинутою системою мікрозаглиблень, навіть у разі відносно невеликої твердості одного із елементів пари тертя, може бути простим і ефективним способом підвищення зносостійкості і ресурсу трибосистем при фретингу в умовах мастильного голодування. Механізм підвищення триботехнічних властивос-

тей трибосистем з дискретно-текстурованими поверхнями, як і передбачалось, пов'язаний із створенням більш сприятливих умов для утримання і регенерації граничних мастильних шарів в зоні трибоконтакту. Навантаження, що діють на трибосистему, при цьому, сприймаються через шар мастильного матеріалу, який розташовується у міжлунковому просторі і запобігає безпосередньому контакту металів пари тертя. Оскільки опір зсуву граничних мастильних шарів значно нижчий ніж у металів, створення умов для їх постійної регенерації забезпечує стабільно низькі коефіцієнти тертя і відповідно низький рівень фрикційного навантаження трибосистеми. З реологічної точки зору такий підхід означає збільшення дисипативної здатності змащеного фрикційного контакту [8], що забезпечує збільшення частки розсіяваної трибосистемою енергії і зменшення частки енергії, яка іде на розвиток процесів поверхневого руйнування і зношування.

Дослідження з визначення впливу параметрів дискретно-текстурованих поверхонь і параметрів фретингу на стійкість до фретинг-корозійного зношування трибосистеми за вище визначених умов мащення проводили для поєднання матеріалів у оберненій парі тертя (табл. 1) з призматичним профілем мікрозаглиблень як найменш сприятливим варіантом у відношенні інтенсивності зношування. Для дослідження використано метод багатофакторного планування експерименту та математичної обробки даних, який дозволяє отримати відповідні функціональні залежності вихідних параметрів (величини зносу) від вхідних (геометричні параметри формування дискретно-текстурованих поверхонь; параметри віброконтактного навантаження при фретингу). Побудова математичної моделі проводилась за наступними етапами: формалізація задачі, побудова плану експерименту, попередній статистичний аналіз результатів експерименту, побудова математичних моделей за результатами експерименту, аналіз достовірності отриманої моделі, отримання розрахункових залежностей з використанням отриманої моделі.

За результатами експерименту проведено статистичний аналіз та побудовано регресивні моделі залежностей величини зносу (функція відгуку Y) від досліджуваних параметрів, межі вирівнювання яких представлені у таблиці 3.

Розрахунок моделей здійснюється за допомогою пакета прикладних програм «Планування, регресія і аналіз моделей». В якості початкових даних використовувалася матриця планування та отримані за результатами експерименту дані.

Таблиця 3

Кодові значення і межі вирівнювання параметрів дискретно-лункових поверхонь та параметрів фретингу

№ пор	Параметри варіювання	Кодове позначення	Межі варіювання
1.	Параметри дискретно-лункових поверхонь: відстань між рядками, $\times 10^{-3}$ м відстань у рядку (крок), $\times 10^{-3}$ м глибина лунок (хід деформуючої головки) $\times 10^{-4}$ м	X1 X2 X3	1,5...3,0 1,5...3,0 0,5 – 1,5
2.	Параметри фретингу: питоме нормальне навантаження на контакт, МПа амплітуда відносного проковзування зразків, мкм	X4 X5	10...30 100...300

Необхідно сказати, що особливістю обраної методики побудови математичної моделі процесу є те, що в ній вдалось позбавитися в значній мірі від двох основних недоліків класичної теорії планування експерименту та регресивного аналізу, які обмежують їх використання – планування та обробки моделей заздалегідь заданої структури та обов'язкового використання стандартної області планування.

За результатами виконаних обчислень отримані математичні моделі, що описують в кодових значеннях залежність величини вагового зносу конструкційної сталі 30ХГСА у стані постачання з дискретно-текстурованою поверхнею з призматичним профілем мікрозаглиблень (зразок), конструкційної загартованої середньовуглецевої сталі 45 (контрзразок) і сумарного вагового зносу пари тертя фретингу в умовах граничного тертя в режимі мастильного голодування від параметрів дискретної поверхні та амплітудно-навантажувальних параметрів фретингу:

- ваговий знос зразка

$$Y_5 = 0.00524817 - 0.0015448x_3 + 0.00172928x_5 + 0.00101434x_4x_5 + 0.000970422x_4 + 0.000572524x_1z_3 + 0. \quad (1)$$

- ваговий знос контрзразка

$$Y_6 = 0.00439672 - 0.00182549x_3 + 0.00150567u_1z_2 - 0.000541859x_2 + 0.000827717u_2z_5 - 0.000784443z_2x_4 + 0.00340455z_2u_5 + 0.00097213x_5 \quad (2)$$

- сумарний ваговий знос пари

$$Y_7 = 0.00971511 - 0.00387282x_3 + 0.00299399u_1z_2 - 0.00142182x_2 - 0.00182509z_2x_4 + 0.00165128u_2z_5 + 0.00693571z_2u_5 + 0.00184508x_5 \quad (3)$$

У рівняннях матричної моделі входять тільки найбільш статично значимі складові, що визначають вплив досліджуваних параметрів на величину зносу. Перехід від кодових значень параметрів математичної моделі до натуральних визначається наступними співвідношеннями:

- для моделі 1

$$\begin{aligned} x_1 &= 1.21429 \cdot (x_1 - 2.17647); \\ z_1 &= 2.54839 \cdot ((x_1^2) - 0.168779 \cdot x_1 - 0.47449); \\ x_2 &= 1.33333 \cdot (X_2 - 2.25); \\ x_3 &= 1.78947 \cdot (X_3 - 0.941176); \\ z_3 &= 2.07161 \cdot ((x_3^2) - 0.0649836 \cdot x_3 - 0.452299); \\ x_4 &= 0.0944444 \cdot (X_4 - 19.4118); \\ x_5 &= 0.00839506 \cdot (X_5 - 180.882). \end{aligned}$$

- для моделі 2

$$\begin{aligned} x_1 &= 1.21429 \cdot (X_1 - 2.17647); \\ z_1 &= 2.54839 \cdot ((x_1^2) - 0.168779 \cdot x_1 - 0.47449); \\ u_1 &= 3.90963 \cdot ((x_1^3) - 0.189796 \cdot (x_1^2) - 0.756232 \cdot x_1 + 0.00997241); \\ x_2 &= 1.33333 \cdot (X_2 - 2.25); \\ z_2 &= 1.25753 \cdot ((x_2^2) - 0.148148 \cdot x_2 - 0.352941); \\ u_2 &= 3.25018 \cdot ((x_2^3) + 0.0290983 \cdot (x_2^2) - 0.856163 \cdot x_2 - 0.0625576); \\ x_3 &= 1.78947 \cdot (X_3 - 0.941176); \\ z_3 &= 2.07161 \cdot ((x_3^2) - 0.0649836 \cdot x_3 - 0.452299); \\ u_3 &= 3.74653 \cdot ((x_3^3) - 0.345437 \cdot (x_3^2) - 0.705516 \cdot x_3 + 0.126849); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}x4 &= 0.0944444*(X4 - 19.4118); \\z4 &= 1.73772*((x4^2) - 0.0806452*x4 - 0.574074); \\x5 &= 0.00839506*(X5 - 180.882); \\z5 &= 2.01996*((x5^2) - 0.191268*x5 - 0.313672); \\u5 &= 4.85425*((x5^3) - 0.328812*(x5^2) - 0.575278*x5 + 0.0431438).\end{aligned}$$

- для моделі 3

$$\begin{aligned}x1 &= 1.21429*(X1 - 2.17647); \\z1 &= 2.54839*((x1^2) - 0.168779*x1 - 0.47449); \\u1 &= 3.90963*((x1^3) - 0.189796*(x1^2) - 0.756232*x1 + 0.00997241);\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}x2 &= 1.33333*(X2 - 2.25); \\z2 &= 1.25753*((x2^2) - 0.148148*x2 - 0.352941); \\u2 &= 3.25018*((x2^3) + 0.0290983*(x2^2) - 0.856163*x2 - 0.0625576);\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}x3 &= 1.78947*(X3 - 0.941176); \\z3 &= 2.07161*((x3^2) - 0.0649836*x3 - 0.452299); \\u3 &= 3.74653*((x3^3) - 0.345437*(x3^2) - 0.705516*x3 + 0.126849);\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}x4 &= 0.0944444*(X4 - 19.4118); \\z4 &= 1.73772*((x4^2) - 0.0806452*x4 - 0.574074); \\x5 &= 0.00839506*(X5 - 180.882); \\z5 &= 2.01996*((x5^2) - 0.191268*x5 - 0.313672); \\u5 &= 4.85425*((x5^3) - 0.328812*(x5^2) - 0.575278*x5 + 0.0431438).\end{aligned}$$

Отримані залежності перевірені на адекватність, відповідність та інформативність за критеріями математичної статистики. Результати повторних досліджень, що проведені в однакових умовах, перевірялися на статистичну відповідність за G критерієм Кохрена. Для всіх регресійних залежностей розрахункове значення G критерія менше табличного при $\alpha = 0,05$. Тому ступінь розсіювання результатів за рядками матриці однакова, а результати відповідні.

Перевірка гіпотези на адекватність отриманих моделей результатів експерименту проводилась з використанням F – критерію Фішера. Для отримання моделей при прийнятому рівні значимості $\alpha = 0,05$ $F_{\text{розн}} < F_{\text{табл}}$, тому модель адекватно відображає результат експерименту.

Оцінка якості отриманих математичних моделей проводилась шляхом визначення коефіцієнта множинної кореляції. Коефіцієнт множинної кореляції R показує величину статистичного зв'язку по рівнянню множинної регресії Y_i і початковими експериментальними результатами. В отриманих математичних моделях коефіцієнти множинної кореляції статистично значимі, тобто $F_{\text{розн}} > F_{\text{табл}}$ при прийнятому рівні значимості, отже моделі інформативні і несуть корисну інформацію про процес, що моделюється.

На основі отриманих результатів за допомогою побудови відповідних геометричних поверхонь (сімейства графіків часткових рівнянь регресії) отримується наочне уявлення про графічний образ функції відгуку. По горизонталі обирають змінну, залежність фікції відгуку від бажаної дослідити. Опорною (такою, що приймає декілька значень) обирають змінну, що (або) входить у взаємодію з раніше обраною, або має важливе значення при дослідженні. Решту змінних фіксують на визначених рівнях.

Візуальний аналіз графіків дозволяє провести детальний аналіз впливу факторів на значення функції відгуку та визначити ті значення факторів, які протягом всього часу впливу здійснюють найбільший чи найменший ефект.

Таким чином, в результаті статистичного аналізу встановлено, що отримані регресійні залежності адекватні та інформативні, результати відтворювані, коефіцієнти b_0 і b_1 статистично значущі. Це говорить про те, що регресійні залежності адекватно описують процес і їх можна використовувати для аналізу й оптимізації технологічного процесу формування дискретно-текстурованих поверхонь деталей які працюють в умовах фретинг-корозійного зношування та граничного тертя. В досліджуваній області факторного простору із технологічних параметрів, що впливають на фретингостійкість трибосистеми, найбільш значущими є глибина мікрозаглиблень та щільність їх розташування, яка характеризується ефектом парної взаємодії параметрів X_1 та X_2 .

Відмінною особливістю трибологічних процесів при вібраційному проковзуванні, як уже наголошувалось, є малі амплітуди відносного переміщення поверхонь, малі швидкості ковзання і нестационарний динамічний характер діючих навантажень [9-11]. За таких умов тривалість захисної дії граничних мастильних шарів (тривалість латентного періоду) контролюється співвідношенням швидкостей процесів їх руйнування та відновлення і визначається як властивостями самого мастильного матеріалу, так і природою та станом твердих поверхонь елементів трибопари. Враховуючи, що процеси тертя та зношування у трибосистемах з дискретно-текстурованими мастилоємними поверхнями протікають на ділянках контакту, що розташовані у міжлунковому просторі [12], механізм руйнування тертьових поверхонь таких трибосистем в умовах розвитку фретинг-процесу можна подати наступною трьохстадійною моделлю (рис. 4).

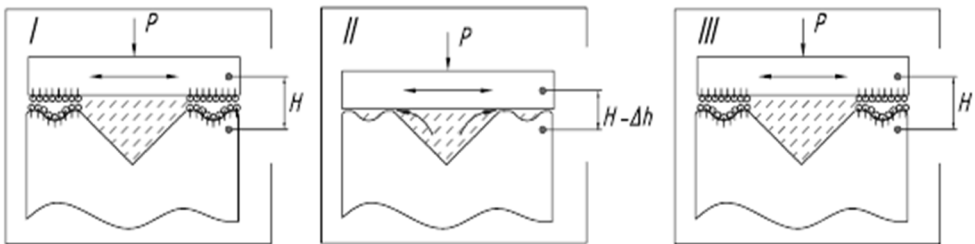


Рис. 4 Модель перебігу трибологічних процесів в зоні окремої ділянки контакту трибосистеми з дискретно-текстурованою мастилоємною поверхнею за умов фретинг-корозійного зношування: *I* – стадія формування первинного граничного змащувального шару; *II* – стадія руйнування граничної мастильної плівки та розвитку фретинг-корозійного зношування поверхонь трибоконтакту; *III* – стадія відновлення цілісності граничної мастильної плівки.

Перша стадія – стадія формування первинного граничного змащувального шару. На цій стадії на спряжених металевих поверхнях в результаті пластичної деформації по вершинах мікровиступів відбувається руйнування природних оксидних і адсорбованих плівок. Утворені локальні ювелірні мікродільниці поверхні металу, активовані багаторазовим пружно-пластичним передеформуванням, відіграють роль активних центрів для адсорбції полярних молекул поверхнево активних речовин, що надходять із мастильного матеріалу. Цей процес закінчується формуванням моно- або полімолекулярного шару граничної змащувальної плівки. Такі шари згідно [13], володіють високим опором до стиснення і низь-

ким опором тангенціальному зміщенню, що забезпечує даній стадії ефективний захист поверхні металів від руйнування.

На другій стадії на ділянках силового контакту під дією нормальних і вібраційних тангенціальних навантажень та одночасній каталітичній дії поверхні металу в мастильному матеріалі відбуваються складні незворотні процеси перебудови структури, які супроводжуються якісною зміною реологічних характеристик матеріалів у трибоконтакті [14, 15] і в кінцевому результаті призводять до деструкції і прогресуючого руйнування граничного мастильного шару. Одночасно в місцях порушення цілісності граничної мастильної плівки розвиваються акти руйнування металевих поверхонь трибоконтакту, які протікають за звичайними для фретинг-корозії механізмами.

Якщо спряження змоделювати у вигляді кінцевого числа трибоелементів [16], то розвиток елементарних актів руйнування поверхонь контакту на другій стадії викличе зменшення розмірів елементів трибопари на величину Δh в напрямку перпендикулярному до поверхні. Відповідно до зменшення об'єму мікрозаглиблень, надлишок мастильного матеріалу витісняється в між лунковий простір.

Третя стадія пов'язана з відновленням (регенерацією) цілісності граничної мастильної плівки.

Зазначені стадії трибологічного процесу, що розвиваються в зоні фрикційного контакту, будуть періодично повторюватись доти, доки в результаті зносу мікрозаглиблення не втратять змащувальну здатність. Очевидно, що в цьому плані трибосистеми з дискретно-текстурованими мастилоємними поверхнями можна розглядати як адаптивні самовідновлювальні трибосистеми.

Висновки. Найбільший ефект підвищення зносостійкості досягається у прямих парах при сферичному профілі лунок. У порівнянні з базовим варіантом за абсолютним значенням величини зносу знос зразків із сферичним профілем лунок у прямих парах зменшився більш ніж у 6 разів. Одночасно помітно зменшився також знос контрзразків і сумарний знос пари. Очевидно, що за прийнятих параметрів формування дискретно-текстурованих поверхонь і параметрів фретингу, сферичний профіль забезпечує найбільшу змащувальну ефективність мікрозаглиблень у порівнянні із призматичним профілем. Таким чином, можна сказати, що формування дискретно-текстурованих поверхонь з розвинутою системою мікрозаглиблень, навіть у разі відносно невеликої твердості одного із елементів пари тертя, може бути простим і ефективним способом підвищення зносостійкості і ресурсу трибосистем при фретингу в умовах мастильного голодування.

Список літератури

1. Костецкий Б. И. Поверхностная прочность материалов при трении / Б. И. Костецкий, И. Г. Носовский, А. К. Караулов и др. - К. : Техніка, 1976. - 296 с.
2. Марчук В. Є. Фретингостійкість дискретних поверхонь в умовах граничного тертя / В. Є. Марчук, О. І. Духота, Ю. О. Градинський, О. М. Єнін // Вісник Харківського НТУСГ ім. Петра Василенка. – Харків: Вид-во Харківського НТУСГ ім. Петра Василенка, 2010. – Вип. 1000. – С. 147-152.
3. Марчук В. Є. Дослідження зносостійкості електроіскрових покриттів в умовах фретинг-зношування / В. Є. Марчук, О. І. Духота, Н. О. Науменко // Проблеми тертя та зношування: наук.-техн. зб. – К.: НАУ, 2011. – Вип. 56. – С. 84-93.
4. Фретинг-утома сталі 30ХГСА з дискретно-орієнтованою легеневою поверхнею / Г. В. Цибаньов, В. Є. Марчук, О. І. Духота, Ю. О. Градинський // Вопросы проек-

тирования и производства конструкций лётальных аппаратов: сб. науч. тр. / Нац. Аэрокосм. Ун-т им. Н.Е. Жуковского "ХАИ". – 2012. – Вып. 3 (71). – С. 124 – 127.

5. Марчук В.С. Вплив параметрів дискретно-лункових поверхонь контакту на фреттингостійкість конструкційної сталі в умовах граничного навантаження / В. С. Марчук, А. П. Кудрін, О. І. Духота // Проблеми тертя та зношування: наук.-техн. зб.. –К.: НАУ, 2012. – Вип. 58. – С. 58 – 64.

6. Захист поверхонь тертя дискретними поверхнями / В. С. Марчук, Б. А. Ляшенко, М. В. Кіндрачук, О. І. Духота // Проблеми тертя та зношування. – 2013. – №2 (61). – С. 80 – 87.

7. Процеси зношування у трибосистемах з дискретно-текстурованою поверхнею / В.Е. Марчук, Б.А. Ляшенко, О.І. Духота, В.І. Морозов, І.С. Будьоний / АВІА-2013: XI Міжнародна наук.техн.конф., 21-23 травня 2013 р., Київ: матеріали. – К.: НАУ, 2013. – Т. 3. – С. 15.45-15.46.

8. Шевеля В.В. Диссипативные свойства и фреттингостойкость пластичных смазок / В.В. Шевеля, В.О. Орлович, В.А. Кирилков, В.П. Федына // Проблеми трибології. – 2007. – № 13. – С. 55-66.

9. Голего Н.Л. Фреттинг-коррозия металлов / Н. Л. Голего, А. Я. Алябьев, В. В. Шевеля. – К. : Техніка, 1974. – 272 с.

10. Уотерхауз Р. Б. Фреттинг-коррозия. – Л. : Машиностроение, 1974. – 272 с.

11. Шевеля В.В. Фреттинг-усталость металлов / В. В. Шевеля, Г. С. Калда. – Хмельницький : Поділля, 1998. – 299 с.

12. Марчук В.Е. Зносостійкість текстурованих лункових поверхонь з дискретно орієнтованою структурою в умовах граничного навантаження // В.Е. Марчук, О.І. Духота, В.І. Морозов // Проблеми тертя та зношування. – 2012. – № 57. – С. 128–138.

13. Ахматов А.С. Молекулярная физика граничного трения / А. С. Ахматов. – М.: Гос. изд-во физ.-мат. л-ры, 1963. – 472 с.

14. Дмитриченко М. Ф. Триботехніка та основа надійності машин / М.Ф. Дмитриченко, Р.Г. Мнацаканов, О.О. Мікосянчик. – К.: ІНФОРМАВТОДОР, 2006. – 216 с.

15. Сорокатый Р.В. Моделирование поведения трибосистем методом трибоэлементов / Р.В. Сорокатый // Трение и износ. – 2002. – Т. 23. – № 1. – С. 16–22.

16. Верхотуров А.Д. Формирование поверхностного слоя металлов при электроионном легировании. – Владивосток: Дальнаука, 1995. – 323 с.

Стаття надійшла до редакції 20.05.2018

Кіндрачук Мирослав Васильович — член-корреспондент НАНУ, докт. техн. наук, професор, завідувач кафедри машинознавства, Національний авіаційний університет, пр. Космонавта Комарова, 1, м. Київ, Україна, 03058, тел/факс: +38 044 406 77 73, E-mail: nau12@ukr.net.

Духота Олександр Іванович — канд. техн. наук, старший науковий співробітник, доцент кафедри технологій відновлення авіаційної техніки, Національний авіаційний університет.

Марчук Володимир Єфремович — докт. техн. наук, професор кафедри логістики, Національний авіаційний університет

Харченко Володимир Володимирович — аспірант кафедри машинознавства, Національний авіаційний університет.

Науменко Ніла Олександрівна — провідний інженер.

M. V. KINDRACHUK, O. I. DUKHOTA, V. Ye. MARCHUK, V. V. KHARCHENKO, N. O. NAUMENKO

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF DISCRETE-TEXTURED OIL-BASED SURFACES FORMATION ON THE TRIBOSYSTEMS FRETTING RESISTANCE.

A study was carried out to determine the effectiveness of increasing the fretting resistance of tribosystems by the formation of discrete-textured oil-based surfaces in the form of regularly located microcavities. Phenomonologically, such surfaces were considered as discrete-textured, and micro-depressions - as reservoirs, providing a permanent regeneration of the boundary lubricating layers in the zone of frictional contact. The formation of discrete-textured surfaces in the form of a system of hollow pyramidal and spherical microcavities with given texture parameters on the sample working surfaces was carried out by the method of shock-plastic deformation. The friction pairs with different location of materials in pairs according to hardness were studied. The pairs with discretely textured surfaces formed on a sample harder than the counterbody conventionally referred to as direct pairs. The pairs with discrete-textured surfaces formed on a sample of lower hardness than the counterbody hardness were called inverse pairs. It has been established that in the case of friction of polished surfaces in accordance with the accepted conditions, lubrication does not provide a significant increase in the fretting resistance of the investigated materials in both direct and inverse friction pairs, which testifies to insufficiently high resistance of the boundary lubricating layers on such surfaces. Under the same conditions of fretting and lubrication, the resistance to fretting-corrosive wear of friction pairs with discrete-textured surfaces has increased significantly. The greatest effect of wear resistance increasing is achieved in direct pairs with the spherical microcavities profile. Compared to the base version the absolute value of wear of samples with spherical microcavities profile in direct pairs decreased by more than 6 times. At the same time, the counterbody wear and the total wear of pair also decreased noticeably. It is obvious that according to the accepted parameters of discrete-textured surfaces formation and parameters of fretting, the spherical profile provides the greatest lubricating efficiency of the microcavities compared with the prismatic profile. According to the results of the experiment, a statistical analysis was carried out and the regressive models of the dependence of wear on technological parameters of the discrete-textured surfaces formation and fretting parameters were developed.

Keywords: friction-contact interaction, oil-based surfaces, lubrication, fretting, wear, mechanical energy.

References

1. Kosteckij B. I. Poverhnostnaja prochnost' materialov pri trenii / B. I. Kosteckij, I. G. Nosovskij, A. K. Karaulov i dr. – K. : Tehnika, 1976. – 296 s.
2. Marchuk V. Ye. Fretynhostiikist dyskretnykh poverkhon v umovakh hranychnoho tertia / V. Ye. Marchuk, O. I. Dukhota, Yu. O. Hradynskiy, O. M. Yenin // Visnyk Kharkivskoho NTUSH im. Petra Vasylenka. – Kharkiv: Vyd-vo Kharkivskoho NTUSH im. Petra Vasylenka, 2010. – Vyp. 1000. – S. 147-152.
3. Marchuk V. E. Doslidzhennia znosostiikosti elektroiskrovykh pokryttiv v umovakh fretynh-znoshuvannia / V. E. Marchuk, O. I. Dukhota, N. O. Naumenko // Problemy tertia ta znoshuvannia: nauk.-tekhn. zb. – K.: NAU, 2011. – Vyp. 56. – S. 84-93.
4. Fretynh-utoma stali 30KhHSA z dyskretno-orientovanoi lehenevoi poverkhnei / H. V. Tsybanov, V. E. Marchuk, O. I. Dukhota, Yu. O. Hradynskiy // Voprosy proektyrovaniya y proyvodstva konstruksii letalnykh apparatov: sb. nauch. tr. / Nats. Aërokosm. Un-t ym. N.E. Zhukovskoho “KhAY”. – 2012. – Выр. 3 (71). – S. 124 – 127.
5. Marchuk V.Ie. Vplyv parametriv dyskretno-lunkovykh poverkhon kontaktu na fretyn-hostiikist konstruksiiinoi stali v umovakh hranychnoho mashchennia / V. Ye. Marchuk, A. P. Kudrin, O. I. Dukhota // Problemy tertia ta znoshuvannia: nauk.-tekhn. zb.. –K.: NAU, 2012. – Vyp. 58. – S. 58 – 64.

-
6. Zakhyst poverkhon tertia dyskretnymy poverkhniamy / V. Ye. Marchuk, B. A. Liashenko, M. V. Kindrachuk, O. I. Dukhota // Problemy tertia ta znoshuvannia. – 2013. – №2 (61). – S. 80 – 87.
 7. Protsesy znoshuvannia u trybosystemakh z dyskretno-teksturovanoiu poverkhnei / V.E. Marchuk, B.A. Liashenko, O.I. Dukhota, V.I. Morozov, I.S. Budonyi / AVIA-2013: XI Mizhnarodna nauk.tekhn.konf., 21-23 travnia 2013 r., Kyiv: materialy. – K.: NAU, 2013. – T. 3. – S. 15.45-15.46.
 8. Shevelja V.V. Dissipativnye svoystva i frettingostojkost' plastichnyh smazok / V.V. Shevelja, V.O. Orlovich, V.A. Kirilkov, V.P. Fedyna // Problemi tribologii. – 2007. - № 13. – S. 55-66.
 9. Golego N .L. Fretting-korroziya metallov / N. L. Golego, A. Ja. Aljab'ev, V. V. Shevelja. – K. : Tehnika, 1974. – 272 s.
 10. Uoterhauz R. B. Fretting-korroziya. – L. : Mashinostroenie, 1974. – 272 s.
 11. Shevelja V V. Fretting-ustalost' metallov / V. V. Shevelja, G. S. Kalda. – Hmel'nic'kij: Podillja, 1998. – 299 s.
 12. Marchuk V.E. Znosostiikist teksturovanykh lunkovykh poverkhon z dyskretno oriietovanoiu strukturoiu v umovakh hranychnoho mashchennia // V.E. Marchuk, O.I. Dukhota, V.I. Morozov // Problemy tertia ta znoshuvannia. – 2012. - № 57. – S. 128-138.
 13. Ahmatov A.S. Molekuljarnaja fizika granichnogo trenija / A. S. Ahmatov. – M.: Gos. izd-vo fiz.-mat. l-ry, 1963. – 472 s.
 14. Dmytrychenko M. F. Trybotekhnika ta osnova nadiinosti mashyn / M.F. Dmytrychenko, R.H. Mnatsakanov, O.O. Mikosianchyk. – K.: INFORMA VTODOR, 2006. – 216 s.
 15. Sorokatyj R.V. Modelirovanie povedenija tribosistem metodom triboelementov / R.V. Sorokatyj // Trenie i iznos. – 2002. – T. 23. - № 1. – S. 16-22.
 16. Verhoturov A.D. Formirovanie poverhnostnogo sloja metallov pri jelektroiskrovom legirovanii. – Vladivostok: Dal'nauka, 1995. – 323 s.