

УДК 621.891

О. І. ДУХОТА, А. О. КОРНІЄНКО, В. В. ХАРЧЕНКО, Н. О. НАУМЕНКО,
І. В. КОСТЕЦЬКИЙ, М. А. ГЛОВИН

Національний авіаційний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ГЕОМЕТРІЇ КОНТАКТУ ЕЛЕМЕНТІВ ТРИБОПАРИ НА ФРЕТИНГ-КОРОЗІЙНЕ ЗНОШУВАННЯ

Розглянуті питання залежності інтенсивності зношування матеріалів пар тертя від схеми і розміру контакту елементів трибопари, а також від амплітудно-навантажувальних параметрів фретингу. Дослідження проводились за схемою контакту «площина-циліндр» та площинного кільцевого контакту суцільного і приривчастого кільця з торцевою поверхнею циліндра, на зразках із титанових сплавів VT20, VT8, VT22 та алюмінієвого сплаву Д16Т. Аналіз результатів порівняльних випробувань за схемою «площина-циліндр» зразків із сплавів VT20, VT8 і Д16Т показав, що зі збільшенням параметра відносного зміцнення поверхонь, інтенсивність зношування зростає. За допомогою електронно-мікроскопічного та рентгеноспектрального аналізу досліджено механізм формування на поверхні тертя захисних вторинних структур. Критична амплітуда фретингу вище якої інтенсивність зношування різко зростає, буде меншою для такого типу контакту, який забезпечує кращі можливості відведення із зони тертя продуктів зношування.

Ключові слова: геометрія контакту, фретинг-корозія, відносне вібропереміщення, захисні структури, зношування

Вступ. При вирішенні проблеми забезпечення високого рівня надійності і довговічності трибомеханічних систем однією із найбільш важливих задач є визначення для заданих умов тертя і поєднання матеріалів у трибопарі оптимальної схеми і розмірів контакту. При зношуванні в умовах фретинг-корозії внаслідок малих амплітуд відносних переміщень руйнування поверхонь відбувається на ділянках дійсного контакту, а продукти зношування залежно від співвідношення геометричних параметрів контакту і амплітуди відносного переміщення можуть вільно видалятися або накопичуватись в зоні тертя. Очевидно, що в такому випадку характер і інтенсивність зношування будуть суттєво залежати як від форми та розміру ділянки контакту, так і від амплітуди вібропереміщення.

Для визначення взаємного впливу зазначених факторів на інтенсивність фретинг-корозії проведені дослідження залежності величини фретинг-зносу від параметра K_z , який характеризує ступінь відносного зміцнення спряжених поверхонь і визначається відношенням амплітуди фретингу A до напівширини ділянки контакту у напрямі вібропереміщення $K_z = A/l$. Важливість урахування параметра K_z для трибосистем, що піддаються фретинг-корозійному зношуванню, визначається тим, що із зміною його величини змінюються умови виходу продуктів зношування із зони тертя, проникнення в зону тертя зовнішнього середовища, а відповідно змінюються і умови фрикційно-контактної взаємодії поверхонь елементів трибопари [1, 2-4].

Матеріали та методика досліджень. Дослідження проводились на вібраційному трибометрі ІМФ за схемою контакту «площина-циліндр» [6] та на модернізованій машині тертя МФК-1 [1] за схемою кільцевого площинного конта-

кту і контакту «площина-циліндр». В якості матеріалів зразків використовувались титанові сплави ВТ20, ВТ8, ВТ22 і алюмінієвий сплав Д16Т.

При випробуванні за схемою контакту «площина-циліндр» на вібраційному трибومترі ІМФ для мінімізації впливу зміни форми контртіла внаслідок зношування на умови експерименту, в якості матеріалу контрзразків використовувалась азотована сталь 30ХГСНА підвищеної зносостійкості.

Випробування проводились за звичайних атмосферних умов без мащення. Сила нормального навантаження на одиницю довжини контакту у всіх експериментах була постійною і становила 4,1 Н/мм, амплітуда вібропереміщення $A=500$ мкм, частота коливань $f = 50$ Гц, база випробувань $N = 0,9 \cdot 10^5$ цикл та $N=1,8 \cdot 10^5$ цикл. За результатами випробувань визначався лінійний знос зразків в зонах максимального випрацювання вздовж доріжки тертя. Також в ході експерименту реєструвався сигнал від п'єзоелектричного датчика системи вимірювання зусилля опору переміщення контрзразка, величина якого пропорційна силі тертя.

Умови випробувань на машині тертя МФК-1 за схемою площинного кільцевого контакту і контакту «площина-циліндр» наведені відповідно у підрисункових написах рис.7 і рис.8.

Результати досліджень та їх обговорення. Характер зміни усереднених значень величини максимального лінійного зносу H_{max} , його дисперсії і величини сигналу датчика U залежно від параметра відносного зміщення K_z , представлено на рис. 1. Із аналізу отриманих залежностей можна зробити наступні висновки:

1. За умови постійної амплітуди фретингу величина зносу буде тим більшою, чим більше параметр K_z наближається до 1. Причому найбільш швидко знос зростає коли величина параметра K_z перевищує деяке порогове значення, яке лежить в області $K_z \geq 0,5 \dots 0,6$. В цьому ж діапазоні значень параметра K_z спостерігається різке зростання сигналу п'єзоелектричного датчика, що можна ототожнити із збільшенням сили тертя та відповідно із підвищенням фрикційної навантаженості матеріалу поверхневого шару.

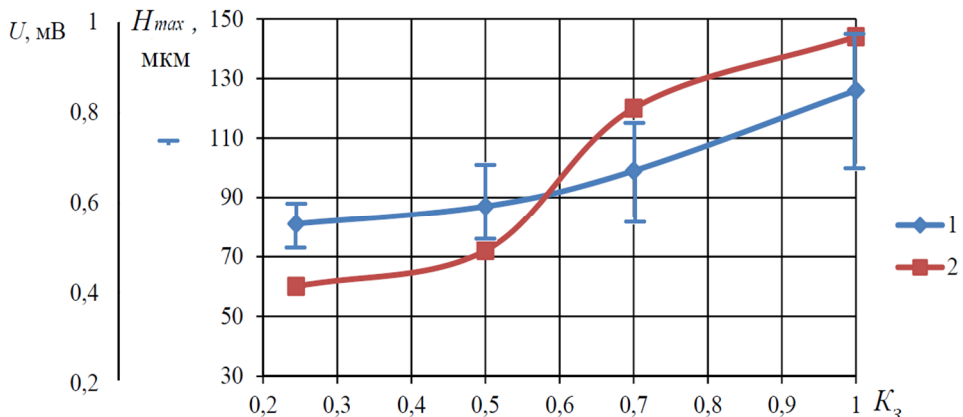


Рис. 1. Залежність величини максимального лінійного зносу H_{max} (1) і величини сигналу п'єзоелектричного датчика U (2) від параметра відносного зміщення поверхонь зразка і контрзразка K_z при випробуванні на зношування в умовах фретинг-корозії

2. За умови постійної амплітуди фретингу величина зносу буде тим більшою, чим більше параметр K_3 наближається до 1. Причому найбільш швидко знос зростає коли величина параметра K_3 перевищує деяке порогове значення, яке лежить в області $K_3 \geq 0,5 \dots 0,6$. В цьому ж діапазоні значень параметра K_3 спостерігається різке зростання сигналу п'єзоелектричного датчика, що можна ототожнити із збільшенням сили тертя та відповідно із підвищенням фрикційної навантаженості матеріалу поверхневого шару.

3. Другий важливий висновок полягає в тому, що більшим значенням параметра K_3 відповідає більш висока дисперсія величини зносу. Тобто, із збільшенням відносного зміщення поверхонь елементів трибопари підвищується ступінь стохастичності процесів, що відповідають за фретинг-корозійне зношування матеріалу.

За прийнятої схеми контакту при $K_3 \geq 1$ в кожному циклі відносного переміщення всі точки поверхні тертя контртіла (рухомий елемент трибопари) виходять із дотику з поверхнею зразка (нерухомий елемент трибопари). В цьому випадку відбувається повне розкриття поверхні тертя контртіла і створюються найбільш сприятливі умови для виходу із зони тертя вільних частинок продуктів зношування. В той же час кожна точка поверхні тертя зразка постійно знаходиться у контакті із контртілом. Цей випадок буде характеризуватися малою швидкістю утворення і регенерації в процесі тертя захисних оксидних і адсорбованих плівок на поверхні зразка і великою їх швидкістю на поверхні контрзразка.

При наближенні K_3 до 0, що характерно для поверхонь з великою протяжністю ділянок контакту у напрямку вібропереміщення та для малих амплітуд фретингу, швидкість виходу продуктів зношування із зони тертя зменшується. Таку закономірність можна розглядати як процес зміни характеру фрикційно-контактної взаємодії елементів трибосистеми за якої за рахунок формування між поверхнями тертя більш ефективного прошарку продуктів зношування зменшується вірогідність контактування і фрикційної взаємодії елементів трибопари через ділянки з безпосереднім міжметалевим контактом. Очевидно, що за таких умов буде знижуватись динамічна навантаженість фрикційного контакту, а інтенсивність зношування матеріалу значною мірою буде визначатись співвідношенням швидкостей трьох взаємозв'язаних трибологічних процесів:

трибоактивація та трибохімічна взаємодії матеріалів трибопари з активними компонентами навколишнього середовища і між собою →

→ руйнування поверхонь тертя, відокремлення вільних частинок продуктів зношування →

→ накопичення та видалення із зони тертя продуктів зношування.

Вплив кожного із зазначених процесів на інтенсивність фретинг-корозії буде залежати як від природи матеріалів контактної пари, так і від геометричних параметрів контакту. Причому роль останніх може суттєво змінюватись залежно від схеми початкового контакту і від стадії розвитку фретинг-процесу.

Для схеми контакту «площина-площина» епюра розподілу питомого контактного навантаження за умови дії постійної нормальної зовнішньої сили на всіх стадіях фретингу залишається незмінною ($p = const$), а відносне зміщення спряжених поверхонь для більшості реальних трибовузлів буде характеризуватися дуже малими величинами ($K_3 \rightarrow 0$). В цьому випадку центральні ділянки контакту мають меншу можливість доступу в зону тертя зовнішнього середовища і

видалення із зони тертя продуктів зношування ніж периферійні. У зв'язку з цим для периферійних ділянок на першому етапі фретингу найбільш імовірною буде реакція активованих поверхневих шарів металу з киснем з утворенням пасивувальних оксидних плівок та розвиток зношування за корозійно-втомним механізмом.

Для центральних ділянок в наслідок обмеження надходження кисню можна очікувати активізацію реакцій твердофазної взаємодії та зношування матеріалів трибопари за механізмом адгезійного зношування. Поступово, у результаті підвищення шорсткості та зменшення щільності прилягання поверхонь, фронт реакцій трибохімічного окиснення буде розповсюджуватись від периферійних до центральних ділянок контакту.

У відкритих трибосистемах де швидкість виходу продуктів зношування із зони тертя дорівнює швидкості їх утворення, фрикційна взаємодія елементів трибопари буде здійснюватись через сформований із продуктів зношування прошарок. Це повинно сприяти деконцентрації локальних контактних напружень на ділянках фактичного контакту, зниженню фрикційного навантаження поверхонь тертя та відповідно зниженню інтенсивності зношування.

У закритих трибосистемах, де швидкість утворення продуктів зношування перевищує швидкість видалення їх із зони тертя, для матеріалів трибопари, які мають сумарний коефіцієнт прирощення об'єму матеріалу при перетворенні зношеного об'єму металу в оксиди більший одиниці, тиск у трибосистемі поступово буде підвищуватись. Як уже зазначалось, [7] наслідком розвитку фретинг-процесу у цьому випадку може стати втрата рухомості і заклинення з'єднання.

На відміну від контакту «площина-площина» у спряженнях із локальним точковим та лінійним контактом зношування елементів трибосистеми супроводжується збільшенням номінальної контактної площі. Одночасно будуть знижуватись діючі у спряженні питомі контактні навантаження. На початковому етапі фретингу забезпечується вільне надходження повітря в зону тертя, що дає можливість інтенсивного протікання реакцій трибохімічної взаємодії активованих поверхневих шарів металу з киснем. Цей же період характеризується відносно вільним виходом із зони тертя продуктів зношування. За таких умов високі питомі напруження, що виникають у локальному контакті навіть за малих значень зовнішньої нормальної сили, будуть стимулювати процес руйнування оксидних плівок та розвиток фретинг-корозії за механізмом адгезійного зношування.

В подальшому можна очікувати, що зі збільшенням кількості циклів фретингу характер процесів фрикційно-контактної взаємодії у трибосистемах з локальним точковим і лінійним контактом все більше буде набувати ознак притаманних трибосистемам із площинним контактом.

З позиції встановлених особливостей впливу геометрії контакту на розвиток фретинг-корозійного зношування можна дати пояснення результатам порівняльних випробувань з визначення фретингостійкості двох різних за рівнем міцності і фізико-хімічними властивостями конструкційних сплавів – титанового сплаву BT8 і алюмінієвого сплаву Д16Т. Як видно із табл. 1, не дивлячись на значно вищу об'ємну статичну і циклічну міцність, за прийнятої схеми контакту і умов фрикційно-контактної взаємодії, опір зношуванню сплаву BT8 нижчий ніж сплаву Д16Т.

Більш високу фретингостійкість сплаву Д16Т, в даному випадку, можна пояснити формуванням в процесі фретинг-корозії на алюмінієвих сплавах комбі-

нованого захисного прошарку із втілених у поверхню твердих частинок оксиду алюмінію Al_2O_3 , що входить до складу продуктів зношування [1]. Наявність таких структур підтверджується результатами електронномікроскопічного і рентгеноспектрального аналізу (рис. 2–4).

Таблиця 1

Механічні властивості і результати порівняльних випробувань на зношування в умовах фретинг-корозії зразків титанового сплаву ВТ8 і алюмінієвого сплаву Д16Т

| № пор. | Матеріал зразка | $\sigma_{0,2}$, МПа | σ_{-1} , МПа | Величина максимального лінійного зносу H_{max} , мкм* | |
|--------|-----------------|----------------------|---------------------|---|-----------|
| | | | | $K_3=0,3$ | $K_3=0,6$ |
| 1 | Сплав ВТ8 | 100...120 | 45...50 | 120,0 | 140,0 |
| 2 | Сплав Д16Т | 45 | 15 | 105,0 | 135,0 |

*Умови випробувань: $A = 300$ мкм; $p = 4,1$ Н/мм; $f = 50$ Гц; $N = 1,8 \cdot 10^5$ цикл. Контртіло – сталь 30ХГСНА азотована.

II I II —

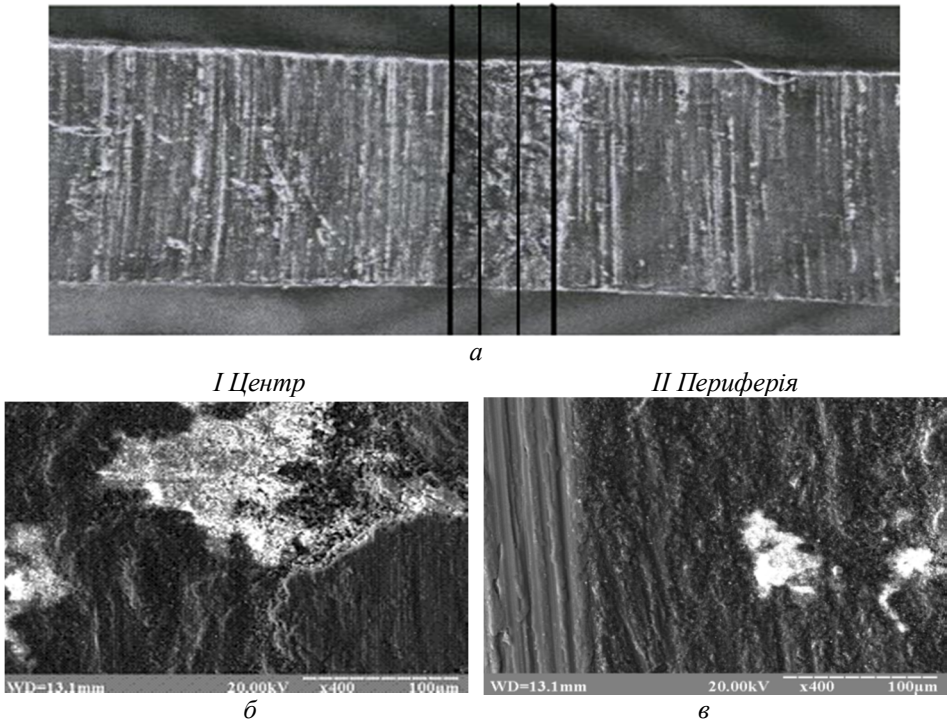


Рис. 2 Загальний вигляд (*a*, $\times 8$) та електронномікроскопічне зображення поверхні доріжки тертя зразка сплаву Д16Т після випробувань на фретинг-зношування (*b*; *c* – зображення у вторинних електронах)

За площею менша щільність шаржованої оксидними частинками поверхні спостерігається у периферійних ділянках контакту де умови для виходу продуктів зношування із зони тертя більш сприятливі ніж у центральних. Очевидно, що аналогічний ефект стає причиною помітного зниження фретингостійкості сплаву Д16Т за умов випробування при $K_3=0,6$.

На поверхні тертя сплаву ВТ8 подібних за механізмом утворення структур не спостерігається, що може бути пов'язано з меншим співвідношенням твердо-

сті основного металу до твердості його оксидів у титанових сплавах ніж у сплавах на основі алюмінію.

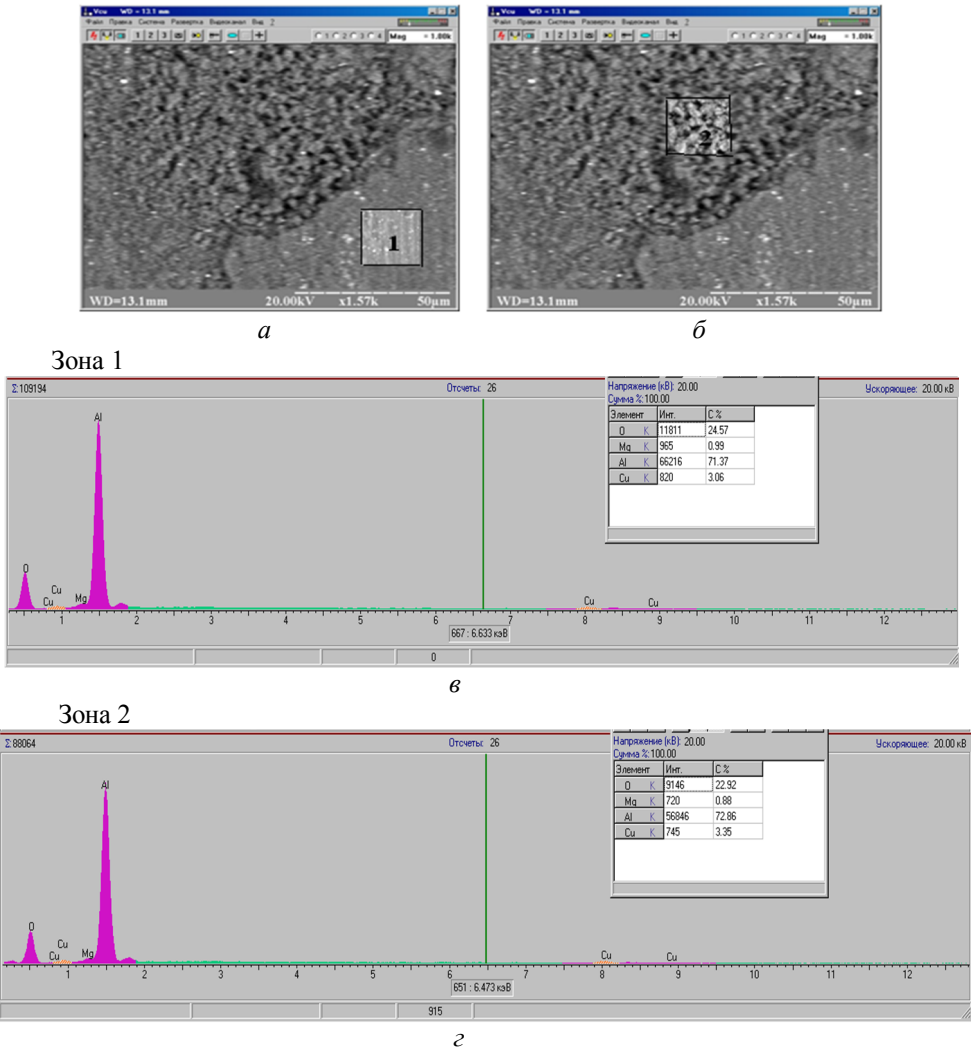


Рис. 3. Зони сканування (а; б) та результати рентгеноспектрального аналізу відсоткового розподілу хімічних елементів на поверхні тертя сплаву Д16Т після випробувань на фретинг-зношування. Центральна ділянка контакту

Натомість на доріжці тертя зразків сплаву ВТ8 фіксуються поверхневі структури чорного, світло- та темно-сірого кольору (рис. 5). За вмістом основних хімічних елементів і кисню (табл. 2) їх можна ідентифікувати як фази, що знаходяться на різних стадіях окиснення титану.

Відносно невелика питома площа таких структур як у центральних, так і у периферійних ділянках контакту, свідчить про їх низьку адгезійно-когезійну міцність. Основну захисну роль, в цьому випадку, буде відігравати проміжний прошарок, сформований між поверхнями тертя із вільних частинок продуктів зношування. Закономірно, що ефективність захисної дії такого прошарку при більших значеннях K_3 буде меншою. З цієї причини, очевидно, і збільшується інтенсивність зношування сплаву ВТ8 із збільшенням параметра відносного зміщення поверхонь (табл. 1).

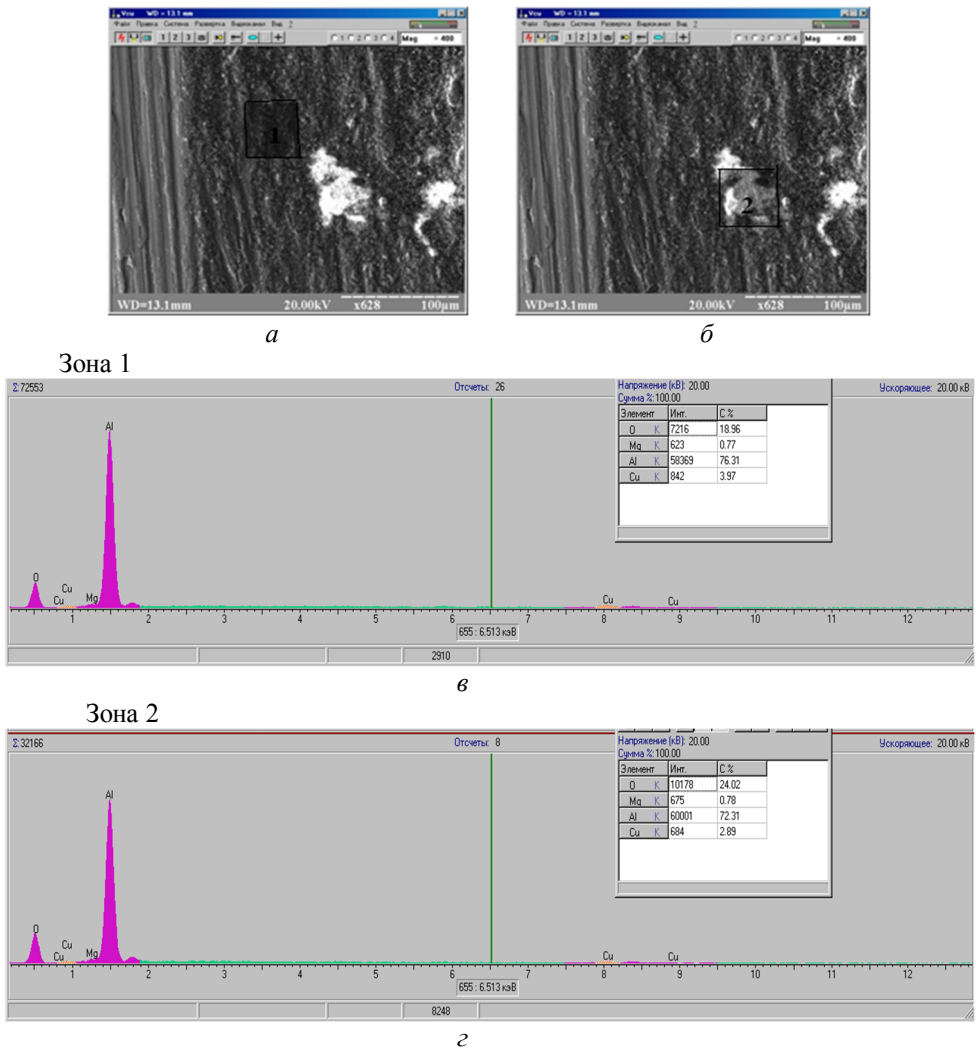


Рис. 4. Зони сканування (*a*; *б*) та результати рентгеноспектрального аналізу відсоткового розподілу хімічних елементів (*в*; *г*) на поверхні тертя сплаву Д16Т після випробувань на фретинг-зношування. Периферійна ділянка контакту

Таблиця 2

Результати рентгеноспектрального аналізу відсоткового розподілу хімічних елементів на поверхні тертя сплаву VT8 після випробувань на зношування в умовах фретинг-корозії

| Мікроділянки сканування | Вміст хімічного елементу, % мас. | | | |
|-------------------------|----------------------------------|------|-------|------|
| | O | Al | Ti | Mo |
| I. Центральна ділянка | | | | |
| 1 | 15,90 | 6,01 | 75,57 | 2,52 |
| 2 | 39,10 | 4,60 | 54,40 | 1,91 |
| 3 | 45,20 | 4,20 | 49,13 | 1,40 |
| II. Периферійна ділянка | | | | |
| 1 | 13,67 | 4,66 | 79,62 | 2,05 |
| 2 | 38,92 | 3,40 | 56,16 | 1,52 |
| 3 | 34,21 | 3,71 | 60,57 | 1,51 |

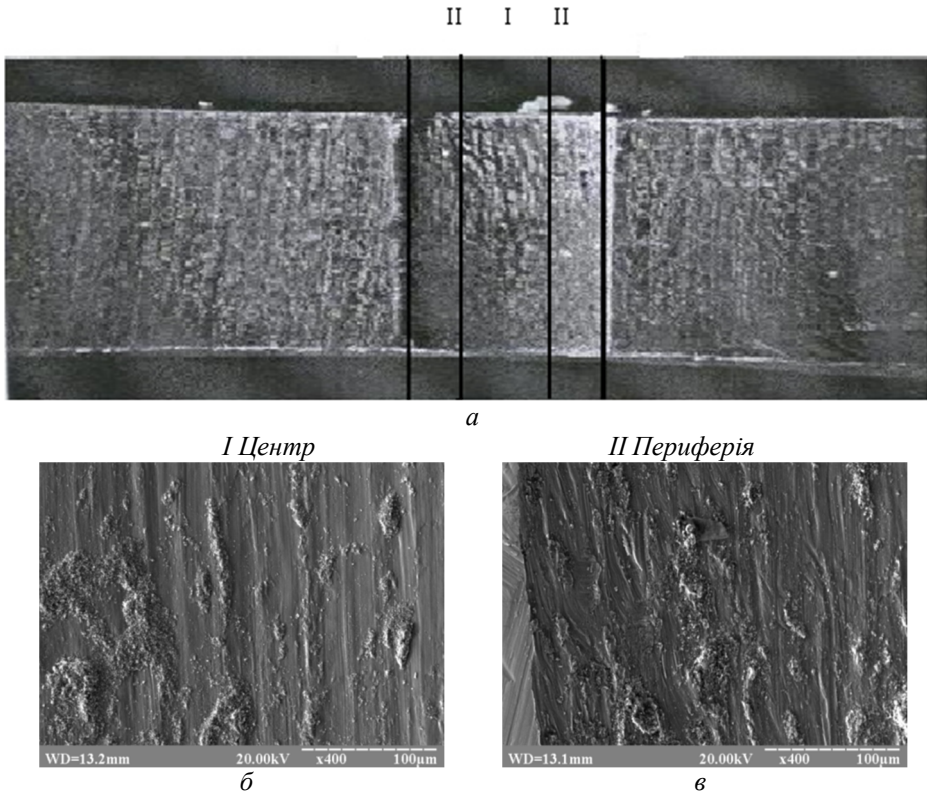


Рис. 5. Загальний вигляд (*a*, $\times 8$) та електромікроскопічне зображення поверхні доріжки тертя зразка сплаву ВТ8 після випробувань на зношування в умовах фретинг-корозії: *б* – зображення у вторинних електронах; *в* – зображення у відбитих електронах

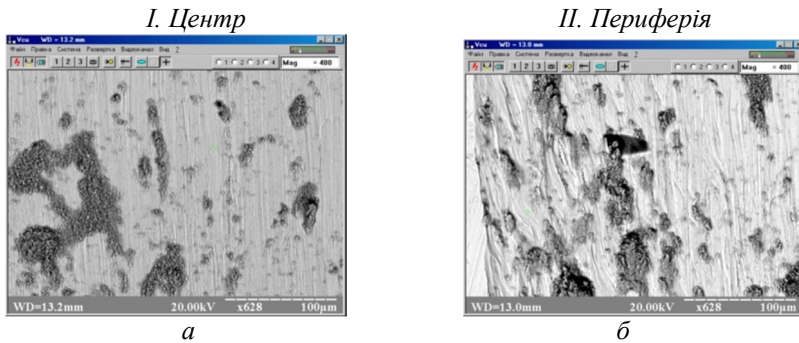


Рис. 6. Мікроділянки сканування при рентгеноспектральному аналізі поверхні тертя сплаву ВТ8 після випробувань на зношування в умовах фретинг-корозії

Для визначення впливу геометрії контакту на залежність величини зносу від амплітуди фретингу проводились дослідження із застосуванням трьох варіантів схем контакту елементів трибопари: площинний контакт суцільного кільцевого торця рухомого циліндричного контрзразка по торцю циліндричного нерухомого зразка; переривчастий контакт кільцевого сегментованого рухомого циліндричного контрзразка по торцю циліндричного нерухомого зразка; контакт плоскої поверхні нерухомого зразка з початковою циліндричною поверхнею рухомого зразка. Схеми початкового контакту, умови випробувань і результати експериментів представлені на рис. 7 – рис. 8.

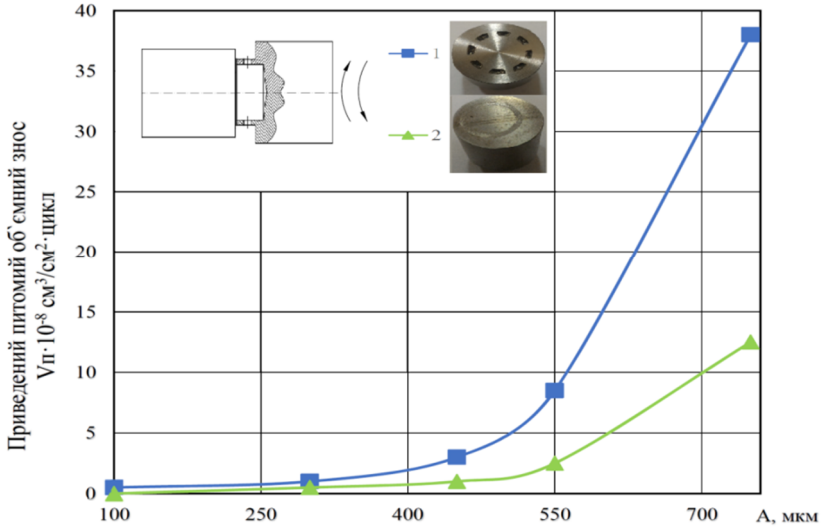


Рис. 7. Залежність приведенного питомого об'ємного зносу сплаву ВТ8 від амплітуди фретингу: 1 – сегментований кільцевий контакт; 2 – площинний суцільний кільцевий контакт. Умови випробувань: $P = 19,6 \text{ МПа}$; $V = 30 \text{ Гц}$; 1 – $N = 5 \cdot 10^4 \text{ цикл}$; 2 – $N = 5 \cdot 10^3 \text{ цикл}$; $T = 293 \text{ К}$, пари однойменні

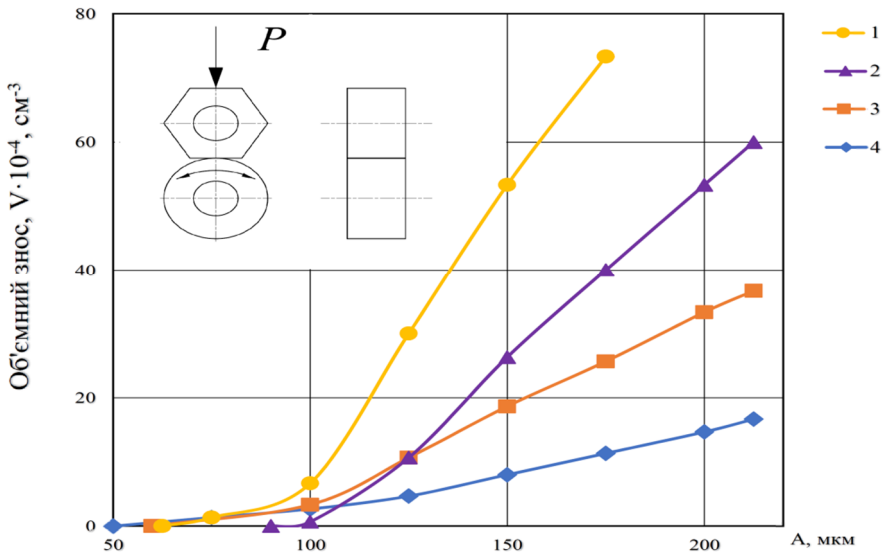


Рис. 8. Залежність об'ємного зносу сплаву ВТ22 від амплітуди фретингу. Початковий контакт «площина-циліндр». Умови випробувань: 1 – $P = 130 \text{ Н/мм}$; 2 – $P = 65,8 \text{ Н/мм}$; 3 – $P = 13 \text{ Н/мм}$; 4 – $P = 6,5 \text{ Н/мм}$; $V = 30 \text{ Гц}$; $T = 293 \text{ К}$. Матеріал контрзразка – сталь ШХ15

Із аналізу отриманих залежностей можна зробити висновок, що критична амплітуда фретингу вище якої інтенсивність зношування різко зростає, буде меншою для такого типу контакту, який забезпечує кращі можливості відведення із зони тертя продуктів зношування. За такої умови місцеположення перехідної області від малих до високих значень величин фретинг-зносу буде визначатись спільним впливом параметрів геометрії контакту та амплітудно-навантажувальних параметрів фретингу на фізико-хімічні процеси, що відпові-

дають за формування фізичного контакту елементів трибопари і його перехід від фрикційної взаємодії переважно через прошарок продуктів зношування до безпосередньої фрикційної взаємодії поєднаних в парі тертя матеріалів

Висновки. За результатами випробувань на зношування в умовах фретинг-корозії, отримано залежність, яка показує, що із збільшенням параметра відносного зміщення поверхонь елементів трибопари підвищується фретинг-корозійне зношування поверхневого шару, найбільш швидке зростання зносу спостерігається, коли параметр відносного зміщення перевищує деяке погове значення, яке для прийнятої схеми контакту і умов фретингу лежить в області $K_3 \geq 0,5 \dots 0,6$. Визначено вплив схеми контакту елементів трибопари на залежність величини фретинг-зносу від амплітуди фретингу. Показано, що критична амплітуду фретингу, вище якої інтенсивність зношування різко зростає, буде меншою для такого типу контакту, який забезпечує кращі можливості відведення із зони тертя продуктів зношування.

Список літератури

1. Голего Н. Л. Фретинг-коррозия металлов / Н. Л. Голего, А. Я. Аляб'єв, В. В. Шевеля. – К.: Техніка, 1974. – 272 с.
2. Шевеля В. В. Фретинг-усталость металлов / В. В. Шевеля, Г. С. Калда. – Хмельницький: Поділля, 1998. – 299 с.
3. Лозовский В. Н. Схватывание в прецезионных парах трения / В. Н. Лозовский. – М.: Наука, 1972. – 83 с.
4. Лозовский В. Н. Надежность гидравлических агрегатов / В. Н. Лозовский. – М.: Машиностроение, 1974. – 320 с.
5. Лозовский В. Н. Предотвращение схватывания деталей при вибрационном трении / В. Н. Лозовский // Тезисы докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. «Технологическое управление триботехническими характеристиками узлов машин». – М. – 1983. – С. 108.
6. Аяотс М. Э. Нанис М. Х. Ускоренная оценка износостойкости подшипниковых материалов с помощью вибрационного трибометра / М. Э. Аяотс, М. Х. Нанис. // Труды Таллинского политехнического института. – Талин. – 1985. - № 597. - С. 41-51.
7. Комплексний підхід до вибору матеріалів пар тертя, що піддаються фретинг-корозійному зношуванню / О.І. Духота, М.В. Кіндрачук, Н.О. Науменко, Л.Р. Кіндрачук, В.В. Харченко // Проблеми тертя та зношування. – 2014. - №4 (65). – С. 19 – 28.

Стаття надійшла до редакції 26.02.2018

Духота Олександр Іванович — канд. техн. наук, старший науковий співробітник, доцент кафедри технологій відновлення авіаційної техніки Національного авіаційного університету. nau12@ukr.net

Корнієнко Анатолій Олександрович — канд. техн. наук, старший науковий співробітник, доцент кафедри машинознавства Національного авіаційного університету. nau12@ukr.net

Харченко Володимир Володимирович — аспірант кафедри машинознавства Національного авіаційного університету. nau12@ukr.net

Науменко Ніла Олександрівна — провідний інженер.

Костецький Іван Володимирович — студент Національного авіаційного університету.

Гловин Михайло Андрійович — студент Національного авіаційного університету.

O. I. DUKHOTA, A. O. KORNIENKO, V. V. KHARCHENKO, N. O. NAUMENKO,
I. V. KOSTETSKYI, M. A. HLOVYN

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF FRICTION PAIR ELEMENTS CONTACT GEOMETRY ON FRETTING-CORROSION WEAR PROCESS

Questions of dependence of wear intensity of friction pairs material on the scheme and the contact size of friction pair elements, and also on the amplitude-loading fretting parameters are considered. The research was carried out on samples made of titanium alloys VT20, VT8, VT22 and aluminum alloy D16T in accordance with the "plane-cylinder" contact scheme and the plane annular contact of continuous and discontinuous ring with cylinder end face. Analysis of results of comparative tests by the "plane-cylinder" contact scheme of samples made of alloys VT20, VT8 and D16T showed that the increasing of the surface relative strengthening parameter leads to the wear intensity increase. The mechanism of formation of protective secondary structures on the friction surface was investigated using by electron microscopic and X-ray spectral analyses. The critical fretting amplitude above which the wear intensity increases sharply is lower for the type of contact, which provides better possibilities of wearing products removing from the friction zone.

Keywords: contact geometry, fretting corrosion, relative vibrational displacement, protective structures, wear.

References

1. Holeho N. L. Frettynh-korroziya metallov / N. L. Holeho, A. Ya. Aliabev, V. V. Shevelia. – K.: Tekhnika, 1974. – 272 s.
2. Shevelia V. V. Frettynh-ustalost metallov / V. V. Shevelia, H. S. Kalda. – Khmelnytskyi: Podillia, 1998. – 299 s.
3. Lozovskij V. N. Shvatyvanie v precezionnyh parah trenija / V. N. Lozovskij. – M.: Nauka, 1972. – 83 s.
4. Lozovskij V. N. Nadezhnost' gidravlicheskih agregatov / V. N. Lozovskij. – M.: Mashinostroenie, 1974. – 320 s.
5. Lozovskij V. N. Predotvrashhenie shvatyvaniya detalej pri vibracionnom trenii / V. N. Lozovskij // Tezisy dokl. Vsesojuzn. nauch.-tehn. konf. «Tehnologicheskoe upravlenie tribotekhnicheskimi harakteristikami uzlov mashin». – M. – 1983. – S. 108.
6. Ajaots M. Je. Nanis M. H Uskorennaja ocenka iznosostojkosti podshipnikovyh materialov s pomoshh'ju vibracionnogo tribometra / M. Je. Ajaots, M. H. Nanis. // Trudy Tallinskogo politehnicheskogo instituta. – Talin. – 1985. – № 597. – S. 41–51.
7. Kompleksnyi pidkhid do vyboru materialiv par tertia, shcho piddaiutsia frettynh-koroziiinomu znoshuvanniu / O.I. Dukhota, M.V. Kindrachuk, N.O. Naumenko, L.R. Kindrachuk, V.V. Kharchenko // Problemy tertia ta znoshuvannia. – 2014. – №4 (65). – S. 19 – 28.