

УДК 621.891

В.Є. Марчук, к.т.н., доц.

ЗНОСОСТІЙКІСТЬ ДИСКРЕТНИХ ПОВЕРХОНЬ В УМОВАХ ФРЕТИНГ-ЗНОШУВАННЯ

Національний авіаційний університет
E-mail: sunduk_2005@ukr.net

Наведено результати експериментальних досліджень фретинг-зносоустійкості дискретних поверхонь на сталі 30ХГСА. Установлено, що дискретні поверхні перевищують фретингостійкість у 1,8–2,44 рази гладку (не дискретну) поверхню. Вивчено кінетику процесу фретинг-зношування дискретних поверхонь. Сформовано фізичну модель їх зношування, яка складається з трьох періодів розвитку.

Приведены результаты экспериментальных исследований фретинг-износостойкости дискретных поверхностей на стали 30ХГСА с разными параметрами лунок. Установлено, что дискретные поверхности превышают фретингостойкость в 1,8-2,44 раза гладкую (не дискретную) поверхность. Изучена кинетика процесса фретинг-износа дискретных поверхностей. Сформирована физическая модель их изнашивания, которая состоит из трех периодов развития.

Experimental researches of fretting-wearproofness of discrete surfaces are presented on the steel 30ХГСА. Determined that discrete surfaces exceed a wearproofness 1,8-2,44 times on the smooth (not discrete) surface. Kinetics of process of fretting-wearproofness of discrete surfaces is studied and the physical model of their wear, which consists of three periods of development is formed.

Постановка проблеми

Фретинг-зношування являє собою прискорене руйнування поверхні, що відбувається на межі контактуючих поверхонь за наявності вібрацій з малими переміщеннями, неоднакового теплового розширення металів чи при релаксаціях напружень.

Результатом фретинг-зношування є утворення зношених ділянок, що відшарувалися. У разі їх видалення виникає втрата необхідної посадки, яка може стати додатковою причиною зношування в інших частинах вузлів техніки.

Більш суттєвим наслідком цього явища є зародження тріщин утоми, що можуть розвиватися, спричиняючи руйнування деталі. Таке руйнування може спостерігатися:

- у різних комбінаціях конструкційних матеріалів;
- у деталях пресової посадки;
- у шліцьових з'єднаннях;
- у листових ресорах;
- у кулькових і роликових підшипниках;
- у електричних контактах;
- болтових і заклепувальних з'єднаннях.

Утомне руйнування контактуючих поверхонь проявляється у вигляді [1]:

- заїдання;
- утрати посадки.

На ділянках поверхневого шару трибосполучень, пошкоджених фретинг-корозією, одночасно відбуваються:

- процеси схоплення;
- процеси абразивного руйнування;
- втомно-корозійні процеси.

Залежно від умов роботи, властивостей матеріалів контактуючих поверхонь серед наведених процесів один може мати найбільший вплив, що і буде визначати зносоустійкість і довговічність вузлів і деталей техніки [2].

Таке явище потребує подальшого вивчення для запобігання руйнування відповідальних елементів конструкцій, обумовлених явищем фретинг-зношування.

Огляд публікацій

Фретинг-зношування визнається інженерами як проблема надзвичайної практичної важливості.

Для захисту трибосполучень від фретинг-зношування застосовують різні конструктивно-технологічні методи. В основу цих методів покладено:

- усунення переміщення однієї поверхні відносно одної;
- полегшення цього переміщення настільки, щоб воно відбувалося з мінімальним тертям.

В обох випадках прагнуть модифікувати поверхні контакту для мінімізації зношування в умовах фретингу [3].

Такими методами є захисні покриття, що наносяться різними сучасними методами.

Захисні покриття забезпечують високу зносостійкість в умовах фретинг-зношування за рахунок перенесення відносного руху контактуючих поверхонь у шар покриття.

Широко застосовують конструктивні заходи для боротьби з фретинг-зношуванням [1]:

- безконтактні лабіринтні ущільнення;
- прокладки з гуми та інших матеріалів;
- оптимізацію натягу заклепкових, штифтових, різбових, фланцевих та інших з'єднань;
- закруглення кромки.

Усі ці заходи спрямовані на зменшення концентрації напружень в поверхнях контактуючих деталей [1].

Простим і універсальним методом зниження зношування в умовах фретингу є поверхнево-пластичне деформування робочої поверхні деталей. Наприклад, обробка поверхні кульками зміцнює поверхневий шар деталі, збільшує шорсткість поверхні та зумовлює появу залишкових напружень стискання, які стримують появу тріщин втоми [4].

Межа витривалості сталі 30ХГСА і сталі 40ХНМА після обробки кульками збільшилась у два рази [3].

Ефективним методом протидії фретингу є застосування канавок певної глибини, які наносяться на поверхню для захисту її від руйнування. Перевірка цього методу на різних конструкціях дозволила зменшити площу контакту трибосполучень і підвищити їх фретингостійкість до трьох разів [5].

Сформоване проточування канавок, з одного боку, знижує концентрацію напружень у місці фретингу, а з іншого – створює концентрацію напружень на її дні [6].

Крім того, проточування канавок на поверхнях тертя та формування заглибин можна використовувати як додатковий конструктивний захід щодо запобігання фретинг-зношуванню за рахунок зберігання мастила в зоні можливого виникнення пошкоджень [7]. Ефективність його виявляється в разі збільшення нормального навантаження в контакті та виникнення масляного голодування в місцях контакту поверхонь тертя.

Різноманітність апробованих засобів і методів зменшення фретинг-зношування контактуючих пар свідчить про складність існуючої проблеми та відсутність універсального підходу до захисту від цього виду руйнування контактуючих поверхонь.

Більшість запропонованих методів розроблено для окремих випадків із конкретними умовами роботи конструкції. Застосування їх в інших умовах може мати зовсім протилежні результати.

Одночасно з процесами фретингу, втомі відбуваються корозійні процеси й абразивне руйнування, якими неможна нехтувати. У цих умовах роботи мають більші переваги дискретні поверхні, які за своїми характеристиками дозволяють значно поліпшити експлуатаційні параметри трибосполучень важконавантажених деталей техніки. Тому можна відзначити актуальність проблеми фретинг-зношування дискретних поверхонь, її складність і маловивченість.

Мета роботи – визначення впливу конструктивно-технологічних параметрів дискретної поверхні на експлуатаційні характеристики трибосполучень в умовах фретингу та виявлення механізму її зношування.

Методика досліджень

Дослідження триботехнічних характеристик дискретних поверхонь в умовах фретинг-корозії проводили на установці МФК-1.

В основу конструкції установки покладено торцеве тертя контактуючих зразків, виконаних у вигляді втулки (рухомий зразок) і циліндра (нерухомий зразок). Площа контакту становила 0,5 см². Вибрані внутрішній і зовнішній діаметри зразків дозволяють звести до мінімуму ефект градієнта швидкості в радіальному напрямку [1].

Лунки (мікрозаглибини) наносили на нерухомий зразок на спеціальній установці, сконструйованій на базі токарного верстата [8] шляхом механічного впливу на поверхню матеріалу індентора.

Оптимальне розташування лунок на поверхні було вибрано з умов мінімізації напружено-деформованого стану поверхні [9].

Для дослідження використовували сталь 30ХГСА для нерухомого зразка (HRC30) і сталь 45 для рухомого зразка (HRC42), мастило ЦІАТИМ-221.

У роботі досліджували залежність величини зношування зразків в умовах фретинг-корозії від амплітуди та навантаження.

Величину зношування зразків визначали як різницю мас до і після випробувань на лабораторних аналітичних терезах ВЛР-200. Для цього після випробувань зразки промивали, використовуючи рідини в такій послідовності:

- бензин (ГОСТ 443–76);
- ацетон (ГОСТ 2603–79);
- етиловий спирт (ГОСТ 18300–72).

Зразки сушили на повітрі.

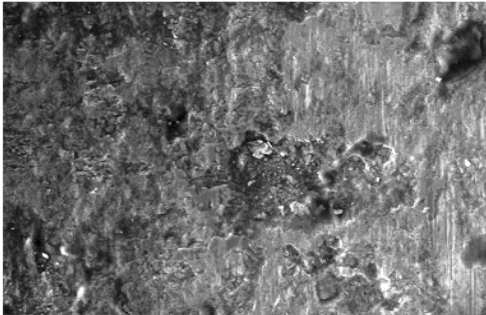
Фактографічні дослідження проводили методом растрової електронної мікроскопії на мікроскопі-мікроаналізаторі «CamScan-4DV».

Напружено-деформований стан поверхні тертя моделювали методом скінченних елементів, реалізованих у програмі NASTRAN.

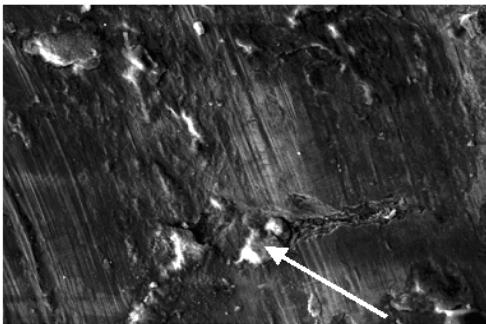
Аналіз результатів дослідження

Результати експериментальних досліджень дискретних поверхонь в умовах фретингу наведено в таблиці. Найбільше зношування має вихідна не дискретна поверхня тертя.

Фрактографічні дослідження показали, що на поверхні тертя утворюються раковини, мікрозаглибини розмірами від 10 до 80 мкм (рис. 1, а), спричинився руйнуванням поверхонь тертя на ділянках фактичного контакту (адгезії).



а



б

Рис. 1. Поверхня тертя вихідної (не дискретної) поверхні (x500):

- а – загальний вигляд;
- б – мікротріщина з вдавненою частинкою продукту зношування

За даними роботи [10] величина адгезії відіграє провідну роль у механічному зношуванні контактуючих поверхонь при фретингу.

На початкових етапах фретингу адгезія металів супроводжується «пропахуванням» поверхневого шару, яке збільшується зі збільшенням адгезії.

У результаті виникають продукти зношування, які не видаляються, а накопичуються між контактуючими поверхнями, що призводить до інтенсифікації абразивного зношування під їх впливом. Окремі абразивні частинки вдавлюються в поверхню тертя, що призводить до перерозподілу тиску на ділянці контакту.

У центрі тиск збільшується, ініціюючи розвиток тріщини (рис. 1, б). Як наслідок, середина ділянки контакту зношується більше, ніж краї, що спричиняє виникнення заглибини, які поступово зливаються в одну велику раковину (рис. 1, а).

Результати експериментальних досліджень зносостійкості сталі 30ХГСА в умовах фретинг-корозії

Зношування, гр.	Без лунки	Параметри дискретної поверхні		
		X1=200 мкм, X2=200 мкм		
		X3=50 мкм	X3=100 мкм	X3=150 мкм
0,0078		0,0032	0,0043	0,0032

Примітка: середовище ЦИАТИМ-201, P=20 МПа, A=175 мкм, контртіло – загартована сталь 45, X1 - відстань між рядками лунки, X2 - відстань у рядку лунки, X3 - хід головки установки

Дискретні поверхні у вигляді лунки порівняно з вихідним зразком перевищують їх за зносостійкістю в 1,8–2,44 рази.

Високу зносостійкість дискретних поверхонь зумовлено тим, що лунки являють собою резервуари для потрапляння продуктів зношування, що забезпечує стимулювання трибохімічних процесів за рахунок видалення з поверхні тертя.

Лунки є також резервуарами для утримування мастильного матеріалу, яке використовується у випадках мастильного голодування контактуючих поверхонь.

Результати електронно-мікроскопічного аналізу поверхні тертя свідчать, що внаслідок амплітудних коливань відбувається передеформування поверхневих шарів і кромки лунки (рис. 2, а).

У результаті на кромках лунки виникають своєрідні напливи.

Подальші процеси деформування призводять до видалення напливів і потрапляння їх до лунки як продуктів зношування. На місці видалених напливів виникають нові.

Крім того у лунку потрапляють продукти зношування з інших ділянок поверхневого шару контактуючих поверхонь, які являють собою оксиди металу, розміри яких становлять від десятків часток до сотень мікронів.

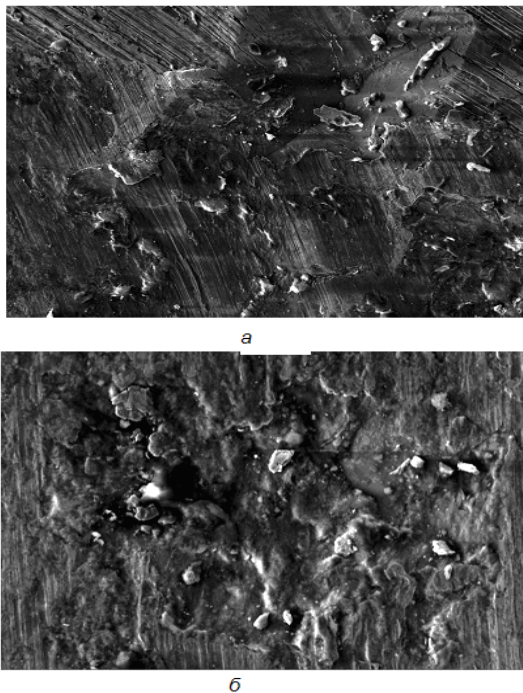


Рис. 2. Дискретна поверхня тертя:
 а – поверхня тертя окремої лунки (x150);
 б – поверхня лунки після замазування (x500)

Із часом заповнення лунок абразивними частинками продуктів зношування та формування напливів призводить до поступового зменшення лунок у процесі тертя. Після цього поверхня лунки перетворюється на поверхню гострокінцевих виступів, заглибин і ямочок, що нагадують пітинг (рис. 2, б).

Фізичну модель процесу зношування лунки дискретної поверхні сформовано в умовах фретинг-зношування, що складається з трьох етапів (рис. 3).

На I початковому етапі фретинг-зношування в результаті адгезійних, корозійних процесів і процесів деформації поверхневого шару формуються та видавлюються абразивні частинки продуктів зношування з поверхні тертя, що суттєво знижує процеси абразивного зношування.

По краях лунки виникають напливи у процесі передеформування матеріалу основи.

Інтенсивність формування напливів буде залежати від навантаження, амплітуди та твердості матеріалу основи. Чим менша твердість, тим інтенсивніше будуть формуватися напливи.

На II етапі фретинг-зношування поступово в процесі тертя лунка заповнюється продуктами зношування та частинками металу, що були видалені з країв лунки за час повторного передеформування металу.

На III завершальному етапі фретинг-зношування глибина лунки поступово зменшується за рахунок кількості стертих напливів.

На місці лунки виникає поверхня, яка характеризується наявністю виступів, заглибин і ямочок.

З іншого боку лунки дискретної поверхні зменшують ділянки контактної взаємодії (адгезії) поверхонь. У місцях фактичного контакту виникає висока концентрація напружень під дією навантаження, яка розповсюджується в середину матеріалу.

Лунка знижує концентрацію напружень у місці фретингу, але створює найбільшу концентрацію напружень на її дні.

Якщо лунок немає, адгезійні процеси розвиваються інтенсивніше, тобто відбувається інтенсифікація процесів абразивного зношування через ускладнення виведення продуктів зношування з зони тертя і, як наслідок, підвищення зношування поверхні.

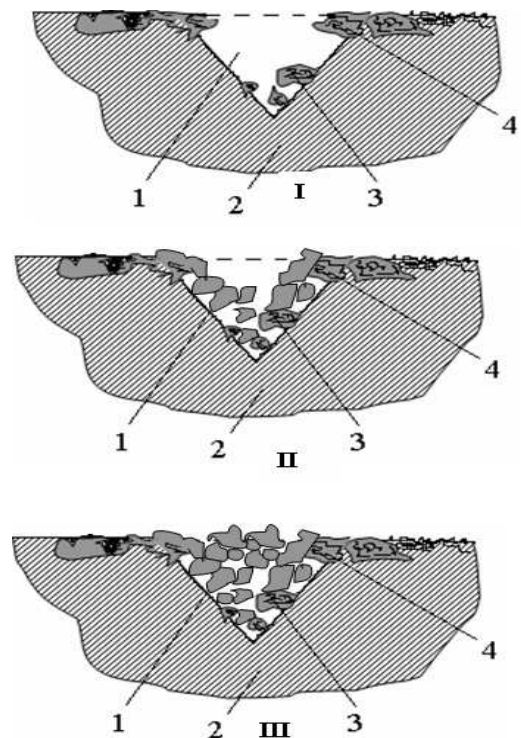


Рис. 3. Фізична модель зношування окремої лунки дискретної поверхні в умовах фретинг-зношування:
 I, II, III – етапи фретинг-зношування;
 1 – лунка;
 2 – матеріал основи;
 3 – продукти зношування, що потрапили у лунку;
 4 – напливи над лункою, спричинені пластичним деформуванням матеріалу

Адгезійні процеси є основною причиною формування поверхневих напружень розтягу, яких достатньо для зародження тріщин [11].

Електронно-мікроскопічний аналіз поперечного розрізу поверхні тертя сталі 30ХГСА показав, що в контактній зоні в результаті поверхнево-пластичного деформування виникають окремі ділянки (шари).

Зовнішній шар складається з ущільнених оксидів різної товщини і має шорстку поверхню.

Ущільнені оксиди складаються з α -Fe і оксидів типу α -Fe₂O₃ стехіометричного та нестехіометричного складів і розповсюджуються на глибину декілька мікронів [12].

Внутрішній шар являє собою сильно деформовану ділянку з розмірами від 4 до 7 мкм (рис. 4).

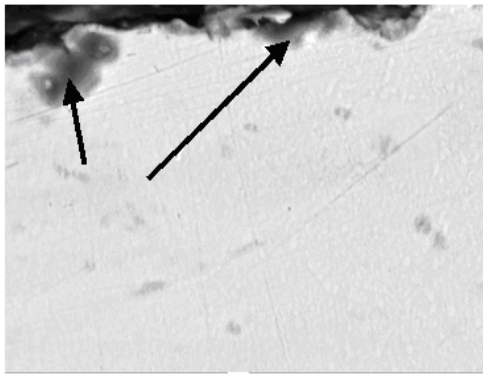


Рис. 4. Структура поперечного шару сталі 30ХГСА (x2000) після фретинг-зношування з амплітудою 175 мкм, навантаженням 20 МПа (фазовий контраст)

Моделювання силового навантаження в умовах фретинг-зношування зразка з дискретною поверхнею показало (рис. 5), що найменша концентрація напружень виникає на поверхні тертя (1,63 МПа), а найбільша – на дні лунки (22,78 МПа).

Наявність сітки лунок знижує концентрацію напружень у місцях фретингу, але створює найбільшу концентрацію напружень на її дні.

Від дна лунки напруження розвиваються в середину об'єму матеріалу як зростаючі «хвилі» з поступовим їх зменшенням від 22,78 до 2,99 МПа.

Остання «хвиля» напруження (2,99 МПа) зливається з аналогічними хвилями, що поширюється від інших лунок, формуючи об'ємний напружено-деформований стан зразка.

Простір між лунками на поверхні тертя характеризується найменшим напружено-деформованим станом, який становить 1,63 МПа.

Порівнюючи ці результати і дані про фретинг-зношування сталі з дискретним покриттям [13], можна зробити висновок, що наявність такого покриття є позитивним чинником для підвищення опору сталі фретинг-зношуванню за амплітуд ковзання 100–300 мкм.

У разі накладення циклічного навантаження на фретинг-пару за амплітуд ковзання 5–7 мкм майже не спостерігається розбіжності між характеристиками опору фретинг-утоми сталі 30ХГСА з рівною поверхнею і дискретним покриттям у вигляді сітки лунок.

Прикладання циклічного навантаження до фретинг-пари з амплітудами ковзання 100–300 мкм не приведе до різкої зміни її довговічності в результаті фретинг-утоми, а довговічність буде визначатися рівнем допустимого фретинг-зносу.

Опір фретинг-пари збільшується у зв'язку з нанесенням лунок. У цьому разі циклічні навантаження розглядаються на рівні, що відповідають випробуваному діапазону амплітуд напружень – ділянки багатоциклової втоми.

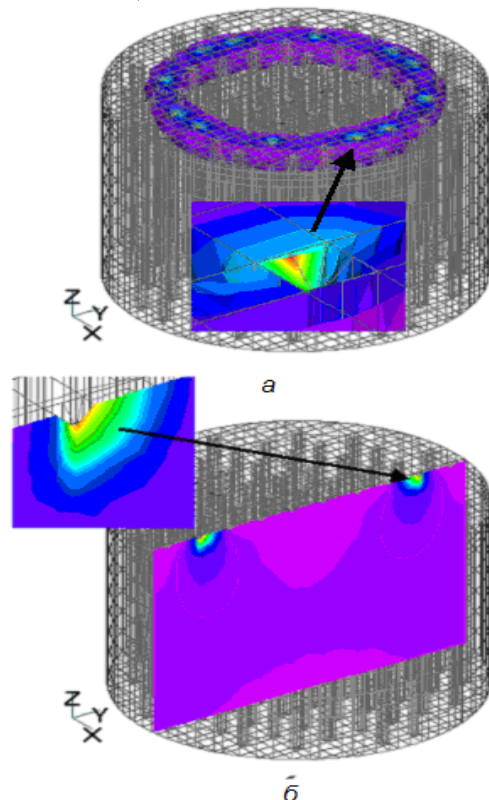


Рис. 5. Напружено-деформований стан поверхні тертя дискретної поверхні: а – розподіл напружень на поверхні тертя; б – розподіл напружень по глибині зразка

Висновки

1. З огляду літературних джерел впливає перспективність застосування поверхонь з дискретними покриттями для підвищення їх опору фретинг-зношуванню.

2. Експериментально підтверджено підвищення фретинг-зносоустійкості поверхонь сталі 30ХГСА з різними параметрами лунок у 1,8–2,44 рази порівняно з рівною поверхнею.

3. Вивчення кінетики процесу фретинг-зношування поверхонь з дискретним покриттям дозволяє установити три періоди його розвитку, які відрізняються від установлених для рівних поверхонь і обумовлюють зниження зношування.

4. Моделювання напружено-деформованого стану поверхні тертя дискретної поверхні в умовах фретинг-зношування показало, що найбільша концентрація напружень виникає на дні лунки. Простір між лунками на поверхні тертя характеризується найменшим напружено-деформованим станом.

5. Порівняння наведених результатів з фретинг-зношування сталі 30ХГСА з раніше одержаними за фретинг-утоми дозволяють прогнозувати незначну зміну циклічної довговічності матеріалу з дискретним покриттям порівняно з тими, які були реалізовані в умовах фретинг-утоми.

Література

1. Голего Н.Л. Фретинг-коррозія металлов / Н.Л. Голего, А.Я. Алябьев, В.В. Шевеля. – К.: Техніка, 1974. – 272 с.

2. Moreau M. Lee types do degradations des surfaces metalliques en microfrottement alterne (fretting) / M. Moreau // Mater. et techn., 1985. – Vol. 73, No 8–9. – P. 137–138.

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

4. Waterhouse R.B. Residual stresses and fretting, crack initiation and propagation / R.B. Waterhouse // Surface Treat. – Oxford. 1987. – Vol. 4. – P. 511–525.

5. Вахтель В.Ю. Повышение усталостной прочности деталей, работающих в условиях контактной коррозии трения / В.Ю. Вахтель // Вестник машиностроения. – 1969, №2.

6. Heywood R.B. Designing against fatigue / R.B. Heywood // Chapman and Hall. – London, 1962.

7. Шевеля В.В. Развитие фретинг-коррозии в условиях граничного трения / В.В. Шевеля, В.А. Кирилков, В.П. Федыня // Проблемы трибологии. – 2007. – №2. – С. 102–108.

8. Пат. Україна, F01L 1/20, F01L 1/46. Пристрій для утворення на плоскій поверхні тертя рельєфу заглибин, що утримують мастильні матеріали / В.С. Марчук, І.Ф. Шульга, О.І. Шульга, О.Є. Плюсін (Україна); НАОУ. – № 13762; Заявл. 24.10.2005; Опубл. 17.04.2006. Бюл. №4.

9. Марчук В.С. Моделювання напружено-деформованого стану дискретної поверхні / В.С. Марчук, Б.А. Ляшенко, В.І. Калініченко // Проблеми тертя та зношування: наук.-техн. зб. – К.: НАУ. – 2008. – Вип. 49, Т. 2. – С. 25–30.

10. Godfrey D. Early stages of fretting of copper, iron and steel / D. Godfrey, J.M. Baily // Lubrication Engine. – 1954. – May – June.

11. Калда Г.С. Процеси контактної взаємодії та циклічна міцність металів при фретингу: Автореф. дис. д-ра техн. наук: 05.02.04 / Г.С. Калда / Технол. ун-т Поділля. — Хмельницький, 2000. – 36 с.

12. Жеглов О.С. Фретинг-коррозія металлов при больших относительных перемещениях и ее амплитудная граница / О.С. Жеглов // Трение и износ. – 1983. – Т. IV, №5. – С. 828–836.

13. Цыбанев Г.В. Фретинг-усталость поверхностей с дискретными покрытиями / Г.В. Цыбанев, В.Е. Марчук, О.Н. Герасимчук // Проблемы трибологии. – 2009. – №1. – С. 97–104.