

УДК 620.178.16(045)

В. Є. МАРЧУК

Національний авіаційний університет, м. Київ, Україна

НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ТЕКСТУРОВАНИХ ПОВЕРХОНЬ ТРИБОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ

Представлено короткий огляд напружено-деформованого стану текстурованих поверхонь, сформованих різними методами. Показано проблеми та шляхи зменшення залишкових напружень в дискретних ділянках текстурованих поверхонь.

Ключові слова: *текстуровані поверхні, дискретні покриття, напружено-деформований стан, дискретна ділянка.*

Загальна постановка проблеми та її зв'язок з науково-практичними задачами. Збільшення терміну служби сучасних машин і механізмів – одна із важливих проблем підвищення якості і конкурентоспроможності галузі машинобудування. Значні матеріальні втрати внаслідок тертя та зношування поставили першочергову задачу збільшення довговічності вузлів тертя. Висока вартість конструкцій, складність умов роботи трибосистем висуває високі вимоги до вибору матеріалів трибосполучень, пошуку нових ефективних технологій підвищення ресурсу трибовузлів, аналізу процесів, які відбуваються між контактуючими поверхнями.

Сьогодні широкі можливості відкривають технології дискретного зміцнення поверхневих шарів, як найбільш перспективного, життєздатного напрямку інжинірингу поверхні. Результатом впровадження такої технології є розширення діапазону роботи деталей в екстремальних умовах експлуатації при одночасному підвищенню трибологічних і фізико-механічних характеристик пар тертя. Розміри і конфігурація текстурованої (дискретної) поверхні встановлюють, виходячи з умов мінімізації напружено-деформованого стану при силовому (температурному) впливу на поверхню, що дозволяє багатократно підвищити її граничний стан. Вивчення напружено-деформованого стану текстурованих поверхневих шарів зі змінними по глибині властивостями є важливою і актуальною задачею. Відсутність такої інформації є суттєвою перешкодою в області інтерпретації процесів, що супроводжують процеси тертя та зношування машин і механізмів.

Огляд публікацій та результати аналізу. При конструюванні пар тертя з текстурованими поверхнями значна роль відводиться рівню залишкових напружень, які корелюють практично з усіма експлуатаційними властивостями деталей. В залежності від методу формування текстурованих поверхонь у трибосистемах, можуть виникати залишкові напруження як стиснення, так і розтягу. Особливо небезпечними є залишкові напруження розтягу, які негативно впливають на експлуатаційні характеристики контактуючих деталей.

Серед існуючих способів визначення залишкових напружень в текстурованих поверхнях найбільш простим і доступним є метод визначення величини залишкових напружень за кривизною прямокутного зразка. Суть методу полягає у тому, що при формуванні такої поверхні на основу невеликої товщини залишкові напруження призводять до деформації основи у вигляді дуги кола (рис. 1).

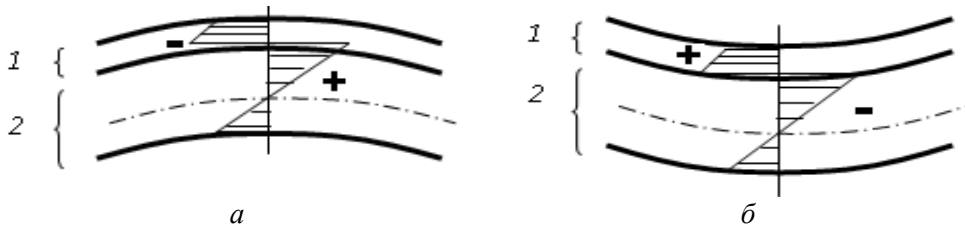


Рис. 1. Епюри залишкових напружень в основі з PVD покриттям (Ti; Al)N (а) та електроіскровим покриттям ВК-8 (б), їх знак та характер прогину пластинки в залежності від типу покриття, 1 – покриття; 2 – основа

Вимірюючи прогин деформованої таким методом пластинки та використовуючи рівняння пружної лінії, визначають залишкові напруження за формулою

$$\sigma_{\text{зал}} = \frac{32EH^3 f}{3a^2 h(1-\nu)(2H+h)},$$

де E , ν – модуль пружності першого роду (МПа) й коефіцієнт Пуасона матеріалу відповідно; a – довжина зразка, м; f – прогин зразка, м; H , h – товщина основи зразка і глибина (висота) дискретної ділянки, відповідно, м.

Для електроіскрових покриттів, які по суті є дискретними, залишкові напруження утворюються внаслідок різниці коефіцієнтів термічного розширення матеріалів основи і покриття. Оскільки коефіцієнт термічного розширення матеріалу електроду менший за коефіцієнт термічного розширення матеріалу поверхні що зміцнюються, то в покритті виникають повздовжні напруження розтягу (див. рис. 1, а) [1].

Позитивний ефект при нанесенні дискретних покриттів забезпечується за рахунок застосування гнучких вакуум-плазмових технологій, особливо на різальному інструменті. Встановлено [2], що в PVD покриттях дискретного типу (Ti; Al)N виникають залишкові напруження стиску, рівень яких набагато нижчий у порівнянні з аналогічними суцільними покриттями (рис. 1, б). При однаковій суцільності покриття напруження знижуються зі зменшенням розмірів дискретних ділянок, що дозволяє обмежити залишкові напруження стиску і знизити ймовірність руйнування в умовах контактного навантаження при збереженні високої суцільності, а також зменшити напруження розтягування в основному матеріалі.

При терті контактуючих поверхонь в місцях фактичного контакту формується певна шорсткість (текстура) за рахунок деформації поверхонь при одночасній дії нормальних і тангенціальних напружень з виходом на поверхню ліній ковзання та інших дислокаційних утворень. Текстурований шар характеризується дуже малою висотою і залежить від напрямку руху контактуючих поверхонь при терті.

Б. І. Костецький відмічав [3], що дискретність фактичного контакту поверхні тертя характеризується складним напружено-деформованим станом, наявністю підтримуючого впливу бокових і нижче лежачих об'ємів недеформованого матеріалу, зміною знака (стиску-розтягування) напружень. Схема навантаження при терті передбачає наявність двох зон з різним напружено-деформованим станом: перша – зона пружної-пластичної деформації (10–100 нм), друга – зона пружних деформацій (сотні мкм). При цьому процеси

руйнування (зношування) локалізовані в першій зоні, а процеси теплоутворення протікають в обох.

При такій схемі напружено-деформованого стану в сполученні з дискретністю контакту забезпечується можливість деформування переважно в напрямку переміщення при терті, різко збільшується пластичність твердих і тендітних поверхневих плівок, подрібнюється внутрішня кристалічна структура, ліквідуються границі зерен і фрагментів. Розміри блоків (області когерентного розсіювання) при цьому досягають мінімальних величин (1,5–5 нм). Крім того, ліквідуються лінійні і поверхневі дефекти — дислокації, тріщини, дефекти. Внаслідок дискретності контактування і релаксації напружень на субмікроділянках фактичного контакту усувається можливість поступового нагромадження напружень і субмікроскопічних недосконалостей [4].

Дослідження напруженого стану зміцненої поверхні сталі 40Х показали, що в процесі дискретної лазерної обробки формуються залишкові напруження, неоднорідно розподілені по перерізу зміцненої зони (доріжки при безперервному і плями при імпульсному режимах роботи). На поверхні доріжки виникають значні напруження, які знижуються з віддаленням від центру до краю доріжки практично до нуля. В зразках, підданих додатковому азотуванню, залишкові напруження зменшуються в центрі доріжки в 3–4 рази. Це пов'язано в основному з температурним впливом в процесі азотування [5].

Принцип створення дискретних покриттів дозволяє багаторазово підвищити їх граничний стан: контактні навантаження в 3–5 разів, критичні деформації розтягування основи - до 2-х порядків, довговічність у кілька разів у порівнянні із суцільним покриттям тієї ж товщини, складу і твердості [6]. При цьому відкритим залишається питання визначення раціональних параметрів технологічного процесу дискретного зміцнення. Експериментальними дослідженнями встановлено, що площа обробки повинна бути 15–25 %. Це обумовлено створенням такого напружено-деформованого стану, який забезпечує мінімальні напруження при терті, що підтверджено аналітичними розрахунками [5, 7].

На величину напружено-деформованого стану дискретної поверхні значно впливає притуплення кромки окремої дискретної ділянки. Оптимальний кут притуплення кромки повинен складати $\theta \geq 60^\circ$, що дозволить знизити напруження у площині адгезійного контакту не менш, ніж на 30 % [8].

Для підвищення втомної міцності деталей, які працюють в умовах фретингу, був запропонований ефективний метод зменшення концентрації напружень болтового з'єднання, яке полягає в нанесенні сітки канавок певної глибини на поверхню для захисту від руйнування. В результаті довговічність болтового з'єднання в умовах фретинг-зношування збільшилася в три рази [9].

Вплив канавок є основною причиною того, що шорстка поверхня має більш високу втомну міцність при фретингу, ніж гладка. Фретинг в цьому випадку відбувається на виступах шорсткості, які не піддаються змінним напруженням, що діють в матеріалі. Проточка канавки знижує концентрацію напружень в місці «фретингу», але створює концентрацію напружень у її дна. Виточування має

бути сконструйоване таким чином, щоб був досягнутий оптимальний баланс цих двох ефектів [10].

При формуванні текстурованих поверхонь, сформованих механічним методом, суть якого полягає у динамічному впливу індентора на поверхню деталі і створення заглибин за рахунок ППД, виникають залишкові напруження розтягу, розподіл яких носить нерівномірний характер і залежить від розташування і глибини заглибин на поверхні, а також від пружно-пластичних властивостей матеріалу. Найменші залишкові напруження виникають при значеннях параметрів оптимізації $X_1=3,0$ мм, $X_2=2,0$ мм і $X_3=1,5$ мм (відстані між рядками - X_1 , відстані у рядку - X_2 , хід головки установки - X_3). Вибір оптимального розташування заглибин дозволяє конструювати поверхню з заданими експлуатаційними властивостями, поліпшити триботехнічні характеристики, знизити напружений стан поверхні. Заглибини покращують змащувальні властивості поверхні, підвищують опір схоплюванню і корозії, скорочують період припрацювання. [11, 12].

Моделювання напружено-деформованого стану даного типу текстурування поверхні методом скінченних елементів показало, що даний тип текстурування поверхні у вигляді заглибин, за рахунок відсутності значних залишкових напружень, має переваги в порівнянні з покриттями, для яких характерні різні коефіцієнти температурного розширення матеріалу основи і покриття. На поверхні зразка напруження розподілилися у вигляді острівців з максимальними значеннями біля крамок заглибин (рис. 2). [13].

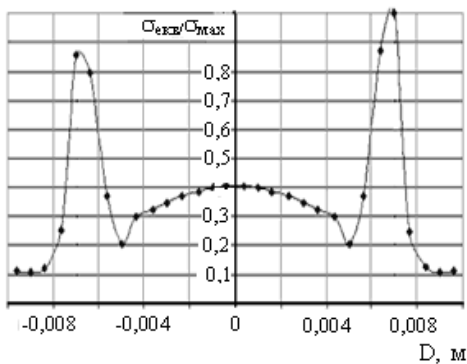


Рис. 2. Розподіл приведених напружень уздовж зразка з максимальними значеннями напружень у просторі між заглибинами ($\sigma_{\text{екв}}/\sigma_{\text{макс}}$ – відношення поточного еквівалентного напруження у зразку по Мізесу до максимального, D – діаметр зразка)

Таким чином, дослідження напружено-деформованого стану при формуванні текстурованих поверхонь різними методами показало, що в них можуть виникати залишкові напруження як стиску, так і розтягу. Діючим засобом регулювання рівня залишкових напружень залишається оптимізація параметрів дискретних ділянок, яка на жаль сьогодні здійснюється за допомогою методу проб і помилок. Відсутність таких даних не дозволяє конструювати текстуровані поверхні з максимальним виграшем за експлуатаційними властивостями і є суттєвою перешкодою в області інтерпретації процесів, що

супроводжують процеси тертя та зношування машин і механізмів.

Технології дискретного зміцнення поверхневих шарів сьогодні потребують чітких стандартів, передачі наукових розробок з лабораторій у промисловість, а також вдосконалення існуючих та розробка нових методик точного прогнозування довгострокової поведінки поверхонь при експлуатації за результатами короткострокових лабораторних випробувань.

Список літератури

1. Дискретні покриття для підвищення зносостійкості деталей машин і механізмів [Ляшенко Б. А., Марчук В. Є., Калініченко В. І., Градиський Ю. О.] // Вісник Харківського НТУСГ ім. Петра Василенка. – Харків: Вид-во Харківського НТУСГ ім. Петра Василенка, 2010. – Вип. 94. – С. 324–335.
2. Антонюк В. С. Конструирование дискретно-модифицированных износостойких поверхностей / В. С. Антонюк, Е. Б. Сорока // Упрочняющие технологии и покрытия. - 2008. - №10.- С. 8-13.
3. Поверхностная прочность материалов при трении [Костецкий Б. И., Носовский И. Г., Караулов А. К. и др.]; под общ. ред. Б. И. Костецкого. – К. : Техніка, 1976. – 296 с.
4. Костецкий Б. И. Управление изнашиванием машин / Б. И. Костецкий. – К. : Общ-во «Знание», 1984. – 19 с.
5. Кіндрачук М. В. Напружено-деформований стан дискретно оброблених лазером сталей під час контактної взаємодії / Кіндрачук М. В., Яхья М. С., Ішук Н. В. // Проблеми тертя та зношування: наук.-техн. зб. / Нац. авіац. ун-т. – 2006. – Вип. 46. – С. 29–39.
6. Ляшенко Б. А. Упрочняющие покрытия дискретной структуры / Ляшенко Б. А., Мовшович А. Я., Долматов А. И. // Технологические системы. – 2001. – №4. – С. 17–25.
7. Кіндрачук М. В. Триботехнічні властивості плазмових покриттів з дискретною структурою / Кіндрачук М. В., Ішук Н. В., Пастернак В. В. // Проблеми трибології. – 2003. – №1. – С. 75–81.
8. Технологическое обеспечение вакуум-плазменных покрытий дискретной структуры / [Соловых Е. К., Ляшенко Б. А., Рутковский А. В. и др.] // Технологические системы. – 2007. – №2. – С. 22–27.
9. Вахтель В. Ю. Повышение усталостной прочности деталей, работающих в условиях контактной коррозии трения // Вестник машиностроения. – 1969. - №2.
10. Heywood R. B. Designing against fatigue / R. B. Heywood. – London : Chapman and Hall, 1962.
11. Пат. 13762 Україна, МПК (06) F01L 1/20, F01L 1/46. Пристрій для утворення на плоскій поверхні тертя рельєфу заглибин, що утримують мастильні матеріали / Марчук В. Є., Шульга І. Ф., Шульга О. І., Плюснін О. Є.; заявник та патентовласник Нац. акад. оборони України. – № u200509981; заявл. 24.10.2005; опубл. 17.04.2006, Бюл. №4.
12. Пат. 44643 Україна, F01L 1/20 C23C 8/02. Спосіб отримання рельєфних зносостійких азотованих шарів сталених деталей / Марчук В. Є., Шульга І. Ф., Ляшенко Б. А., Цибаньов Г. В., Рутковський А. В., Калініченко В. В. ; заявник та патентовласник Нац. авіаційний ун-т. – № u200904236 ; заявл. 29.04.2009; опубл. 12.10.2009, Бюл. №19.
13. Марчук В. Є. Моделювання напружено-деформованого стану дискретної поверхні / Марчук В. Є., Ляшенко Б. А., Калініченко В. І. // Проблеми тертя та зношування: Наук.-техн. зб. – К.: НАУ. - 2008. – Вип. 49. – Т. 2. – С. 25-30.

Стаття надійшла до редакції 23.05.2014

V. Ye. MARCHUK

TENSELY-DEFORMED STATE OF TEXTURED SURFACE TRIBOLOGICAL SYSTEMS

A brief review of the stress-strain state of textured surfaces formed of different methods have been described in the article. The main problems and ways to reduce the residual stresses in discrete areas on textured surfaces have been shown.

Keywords: textured surfaces, discrete coating stress-strain state, discrete portion.

Марчук Володимир Єфремович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри логістики, Національний авіаційний університет, м. Київ, Україна, sunduk_2005@ukr.net.