

УДК 539.3

В.В.Широков*, Х.Б.Василів, Л.А.Арендар

*Українська академія друкарства

ФМІ НАН України

ВПЛИВ НАВАНТАЖЕННЯ НА ДЕФОРМУВАННЯ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ ТА ЗБЛИЖЕННЯ ПЕРСПЕКТИВНИХ ТРИБОМАТЕРІАЛІВ

Важливим завданням трибології є встановлення механізмів руйнування поверхонь тертя з метою розробки науково обґрунтованих методів підвищення зносотривкості відповідних матеріалів. Основні чинники, які впливають на опір матеріалів зовнішньому тертю можуть бути розділені на три групи: 1) зовнішні механічні впливи (тиск, швидкість, температура, частота контактних вібрацій); 2) середовище (тверде, рідинне, газове, з абразивом чи без); 3) матеріали, їх структура та властивості.

Аналіз їх впливу полягає в співставленні та вивченні зміни таких величин, як інтенсивність зношування, коефіцієнт тертя, топографія і структура поверхонь тертя, зміни її хімічного складу, роль процесу припрацювання який суттєво впливає на працездатність та залишковий ресурс експлуатації деталей трибовузлів.

Процес припрацювання спряжених поверхонь супроводжується складними незворотними явищами, які протікають у тонкому поверхневому шарі. В процесі припрацювання за короткий час інтенсивно змінюються фізико-механічні властивості поверхневих шарів, їх макро- і мікрогеометрія. У випадках тертя з обмеженим мащенням важливу роль відіграють деформаційні процеси в поверхневих шарах, зумовлені навантаженням на вузол тертя та локалізовані в місцях їх співдотику. Як правило, саме на них на етапі пуску та припрацювання виникають тиски, які можуть суттєво перевищувати межу текучості матеріалу. Це може призводити до пошкодження поверхонь тертя, часом критичного. На жаль, огляд поверхні тертя не завжди дозволяє встановити характер пошкоджень, оскільки ковзання поверхонь зумовлює видалення продуктів руйнування із зони тертя та закриття дефектів типу поверхневих тріщин як продуктами зношування так і напливами пластифікованого в процесі тертя металу.

У зв'язку з цим важлива роль відводиться вивченню впливу статичного навантаження на деформаційну здатність та формування несучої поверхні, її параметри, яке виникає в початковий момент співдотику поверхонь трибопарі.

Силова взаємодія між двома тілами відбувається на дискретних ділянках контакту. При цьому площа цього контакту залежить від навантаження, мікрогеометрії та фізико-механічних властивостей контактуючих шарів. Практично контактування між двома тілами без прикладання навантаження відбувається мінімум в трьох точках, площа яких близька до нуля. Із збільшенням зовнішнього навантаження площа контакту збільшується як за рахунок збільшення площі на окремих найвищих співдотичних мікронерівностях, так і за рахунок входження в контакт нових вершин. Згідно з власними дослідженнями та аналізом результатів інших дослідників [] впливає, що з ростом навантаження сумарна площа окремих ділянок (плям) контакту збільшується лише до певної його межі. Очевидно це пояснюється фізико-механічними властивостями шорсткого шару матеріалів. Тобто на певному рівні зближення площа контакту стає такою, що опір подальшому деформуванню співмірний з навантаженням, тобто реалізується пружний контакт. Отже в процесі навантаження відбулись максимально можливі пластичні та пружні деформації. З точки зору зносотривкості це свідчить про утворення нової несучої поверхні та можливе утворення первинних частинок - продуктів зношування. Так, у початковий період припрацювання відбувається інтенсивне зношування нерівностей, утворених попередньою механічною обробкою, їх подрібнення та пластичне деформування, яке зазвичай супроводжується наклепом тонкого поверхневого шару. В результаті припрацювання відбувається згладжування найбільш виступаючих нерівностей, часткове або повне знищення початкових нерівностей і встановлення нових, відмінних від вихідних за формою і розмірами.

При терті без змащування в умовах припрацювання контакт деталей пари тертя відбувається не по всій номінальній площі цих нерівностей, а лише по окремих вершинах нерівностей цих поверхонь. Таким чином, тиск одної поверхні на іншу розподіляється на

фактичних мікроділянках контакту. Внаслідок цього істинні напруження змінання на цих площадках можуть бути настільки великі, що співдотичні виступи профілю будуть пружно деформуватися і пластично стискатися і навіть зрізатися при взаємному ковзанні поверхонь.

При рідинному (або граничному) терті поверхонь з відносно великими нерівностями внаслідок розриву масляної плівки відбувається контакт на виступах обох поверхонь металів. Інтенсивне деформування і зім'яття вершин окремих виступів відбувається на початку роботи двох спряжених поверхонь, доки вони не припрацюються, тобто нерівності цих поверхонь не приймуть більш стійкої форми і розмірів, забезпечуючи збільшення фактичної площі дотику. Під час припрацювання виступи набирають оптимальну кривизну, забезпечуючи найбільшу стійкість масляної плівки.

Мета роботи – вивчення впливу стискуючого навантаження на деформування поверхневого шару і величину зближення між матеріалами пари Браж 9-4 - ШХ15.

Експериментально визначали вплив стискуючого навантаження на величину зближення між досліджуваними матеріалами. Схема пристрою наведена на рис.1. Контактна схема: диск зі сталі ШХ15 - колодка з досліджуваного матеріалу (Браж 9-4 і сталь 40Х). Нормальне навантаження на контактну пару змінювали від 50 до 500 кг, що зумовлювало номінальний тиск від 2,5 до 25 МПа. Швидкість **прикладання** навантаження 200 кг/хв. Зближення кількісно характеризує, на яку величину деформується шорсткий шар під тим чи іншим навантаженням.

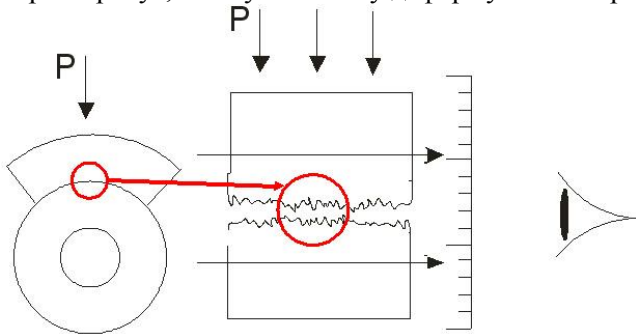


Рис.1. Схема пристрою для визначення зближення матеріалів при дії стискуючого навантаження.

Зміну топографії поверхонь визначали за допомогою профілографа-профілометра «Калибр С-265». За допомогою оригінального програмного забезпечення побудовано профілограми профілю поверхні матеріалів та їх опорні криві.

Мікроструктуру поверхонь після впливу стискуючого навантаження оцінювали металографічним методом на оптичному мікроскопі "Neophot-2", скануючому електронному мікроскопі EVO 40XVP з системою мікрорентгеноспектрального аналізу на енергодисперсійному рентгенівському спектрометрі INCA ENERGY 350.

Експериментальні результати. Пара Браж-9 – ШХ15. У вихідному стані шорсткість поверхні Браж-9 відповідала 5 квалітету, ШХ15 – 6 квалітету чистоти.

Вимірювали зближення для пари Браж 9-4 - ШХ15 для навантажень, що створювали номінальні тиски від 2,5 до 25 МПа. Зближення при навантаженні 25 МПа визначали для встановлення максимально можливого вихідного навантаження. На рис. 2 наведено експериментально отримані співвідношення.

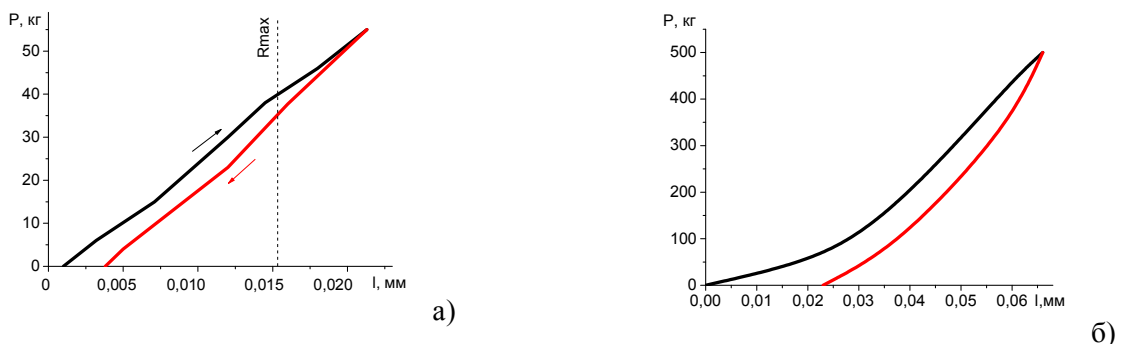


Рис. 2. Криві впливу циклу навантаження – розвантаження (P) на деформацію та залишкову деформацію (зближення) (l) після розвантаження між зразками із Браж 9 і ШХ15. Навантаження на зразки створюють максимальні тиски: а) 2,5 і б) 25 МПа.

У першому випадку зближення між матеріалами після зняття навантаження становить 3 мкм. Прикладення на порядок вищого тиску призводить до зближення між поверхнями 23 мкм. Оскільки ШХ15 набагато міцніша від бронзи Браж 9-4, під дією навантаження відбулася пластична деформація мікроструктури поверхні бронзи. Незважаючи на те, що максимальний номінальний тиск становив $1/16$ від σ_T для Браж, він призвів до залишкових деформацій, які переважають $R_{max}=16,5944$ мкм у вихідному стані (до стиску).

На рис.3. наведено узагальнені результати вимірювання зближення даної пари для ряду навантажень. Суцільні криві – перше навантаження; штрихові – повторне.

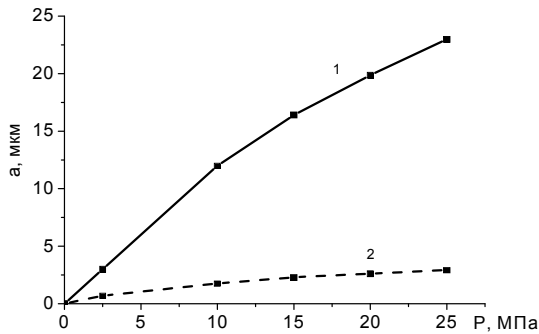


Рис.3. Узагальнені результати вимірювання зближення для пари Браж9-4 - ШХ15. Суцільні криві – перше навантаження; штрихові – повторне.

Оскільки при первинних навантаженнях відбулося руйнування поверхні контакту, за повторних навантажень зближення поверхонь на порядок менше.

На рис.4 показано зміну мікроструктури поверхні бронзи після прикладення навантаження. Як видно, деформування поверхневого шару при навантаженні відбувається на дискретних ділянках розміром порядку 100-200 мкм. У зв'язку з цим аналізували параметри мікротопографії поверхні бронзи і на основі відповідних опорних кривих оцінювали реальну площу контакту матеріалів при різному зближенні та відповідні контактні тиски, що виникають при цьому на мкроступах.

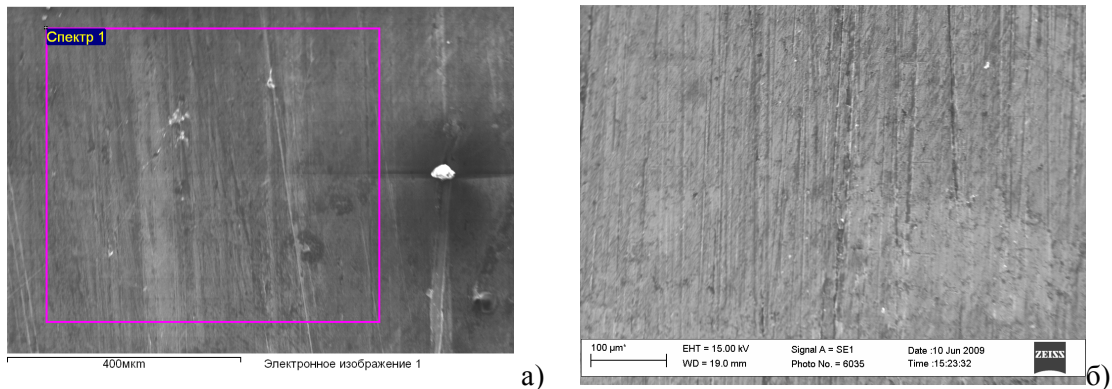


Рис.4. Мікроструктура поверхні бронзи у вихідному стані (а) і після прикладення навантаження (б).

На основі профілограми поверхні Браж9-4 будували опорну криву (рис.5). На опорній кривій для кожного реального зближення a знаходили відносне $\epsilon = a/R_{max}$ та відповідну йому відносну опорну довжину профілю η_s . Тобто, для даного профілю у контакт буде вступати η_s від загальної кількості мікроступів. Вважаючи профіль поверхні бронзи ізотропним, для заданого зближення реальну площу поверхні контакту вичисляємо, як $S_c = S \eta_s^2$, де S – номінальна площа контакту. Ця площа найбільша для даного зближення, оскільки поверхню контртіла вважаємо ідеально гладкою.

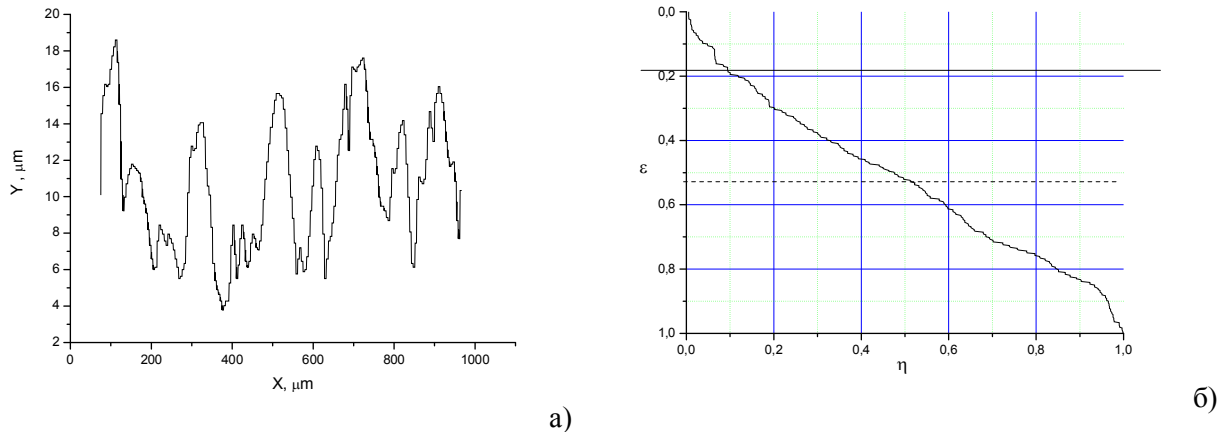


Рис.5. Профілограма (а) і опорна крива (б) поверхні Браз9-4.

Знаходимо реальний тиск, який виникає при даному зближенні на мікровиступах $P = P_{\text{номінал}}/S_c$. Цей тиск найменший з можливих, оскільки на точкових контактах з мікровиступами шорсткого контртіла реальний тиск буде суттєво вищий. Результати розрахунків наведено на рис.6. На початковому етапі при зближенні поверхонь 1-2 мкм в контакт вступає менше 10 % від загальної кількості мікровиступів. Навантаження розподіляється на невелику площу контакту, створюючи тиски понад 8 ГПа. Оскільки для бронзи границі текучості і міцності становлять відповідно 196 і 390 МПа, можемо стверджувати, що при зближенні матеріалів до 3 мкм відбувається руйнування мікровиступів, їх пластична деформація та формування нового профілю. За подальшого зближення площа контакту поверхонь збільшується, завдяки чому реальний контактний тиск знижується на 1-2 порядки і не перевищує границю текучості матеріалу. Тому за повторного навантаження деформація поверхні є переважно пружною і подальшого зближення матеріалів не спостерігається.

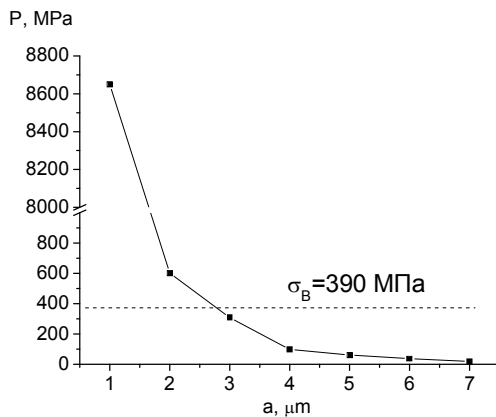


Рис.6. Залежність контактного тиску на мікровиступах Браз9-4 від зближення.

Зміна первинного рельєфу і формування нової поверхні контакту при навантаженні відбувається, зокрема, при терті на етапі притирання. На рис.7 наведено зміну рельєфу поверхонь пари тертя Браз 9-4-ШХ15 за контактного тиску 2,5 МПа при граничному змащуванні (мастило І-20). Після притирання відбувається вигладжування рельєфу поверхні Браз 9-4, що відповідає підвищенню її якості на 2 одиниці. Характер профілю поверхні свідчить про руйнування найвищих мікровиступів і їх подальшу пластичну деформацію внаслідок прикладеного навантаження. Суттєвої зміни рельєфу поверхні ШХ15 не виявлено.

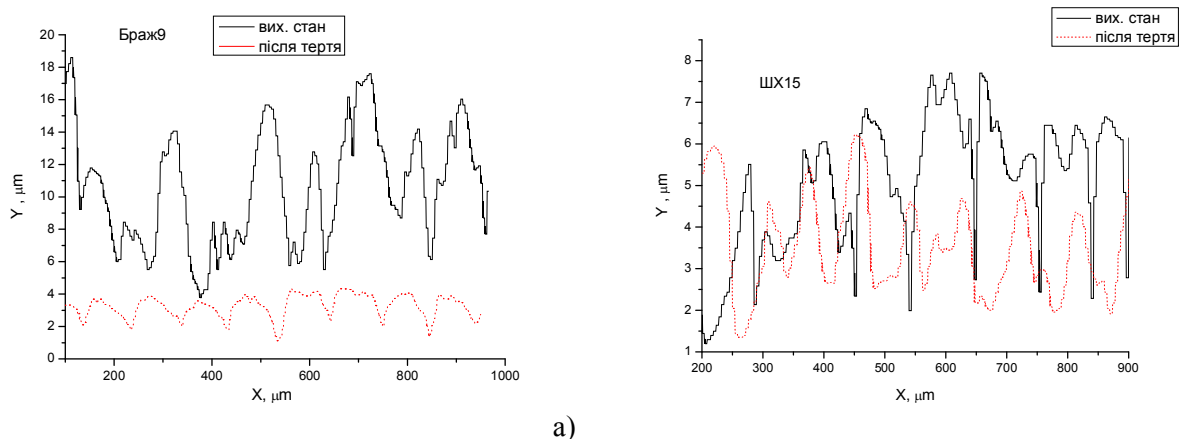


Рис. 7. Зміна профілів поверхонь Браж-9 (а) і ШХ15 (б) після тертя.

Висновок. В даній роботі проаналізовано процеси, які протікають на етапі припрацювання пари тертя Браж 9-4-ШХ15. Встановлено, що на початковому етапі при зближенні поверхонь 1-2 мкм в контакт вступає менше 10 % від загальної кількості мікроступів. Подальше збільшення навантаження призводить до збільшення зближення поверхонь триб опари (до 3 мкм) та площа контакту поверхонь, завдяки чому реальний контактний тиск знижується на 1-2 порядки і не перевищує границю текучості матеріалу. Навантаження понад 23-25МПа призводить до пластичного руйнування мікроступів поверхні Браж 9-4, оскільки, як показують експерименти та розрахунки на контактуючих ділянках локальні тиски перевищують границю пластичності і міцності матеріалу.

Приведені експериментальні дані та розрахунки можуть бути корисними при розрахунках конструювання та припрацюванні поверхонь трибовузлів, а також при аналізі механізмів їх зношування.

1. Кіндрачук М.В., Кульгавий Е.А. Трибологія -наука двадцять першого століття/ Вісник НАНУ, 2005, – №4, – с.67-72
2. Справочник по триботехнике. Теоретические основы / Под ред. М.Хебды, А.В. Чичинадзе.- Москва-Варшава : Машиностроение ВКЛ, - 1989.- т.1. - 397с.
3. Широкова О.В. Економічні аспекти трибології// Эффективность реализации научного ресурсного и промышленного потенциала в современных условиях . Материалы 10-ой ежегодн промышленной междунар. науч.-техн. конф.), 18-22 февраля 2010г., п. Славское Львовской обл. – С. 252–255.
4. П. Джост. Мировые достижения в области трибологии / Трение и износ, – 1986г., – т.7, – №4, – с.593-603.
5. Ивасышин Г.С. Научные открытия в микро- и нанотрибологии./ Деловая слава России. Нанотехнологии, с.47-48.
6. Гаркунов Д.Н. Триботехника (износ и безызносность): . – М.: “МСХ”, 2001.- 616 с.
7. Гаркунов Д.Н., Крагельский И.В., Поляков А.А. Избирательный перенос в узлах трения. – М.:Транспорт. 1969. – 104с.
8. Широков В.В., Ковальчик Ю.І. Особливості моделювання гідрофільної зони з урахуванням водневого зношування під час тертя.// ФХММ, – №4, – 1998 – с.121-126.
9. V. V. Shyrovov and Yu. I. Koval'chyk/ Features of simulation of a hydrophilic zone with regard for hydrogen wear in the process of friction/[Materials Science, Volume 34, Number 4 / July, 1998](#), 584-590.
10. В.В. Широков, Х.Б.Василів, О.В.Широков Моделювання та методи комплексних досліджень трибопроцесів за контактної взаємодії ріжучого інструменту з поверхнею оброблюваного матеріалу. // Мат. Першої н.-практична конф. ІНСТРУМЕНТИ ТА ІНСТРУМЕНТАЛЬНЕ ВИРОБНИЦТВО, 24-25 жовтня 2007 р., ЛЬВІВ, ЛьЦНТІ, 2007, 68-72.
11. В. И. Балабанов, В. И. Беклемышев, Н. И. Махонин. Трибология для всех. - М.: – 2002, – 208с.

12. Защита от водородного износа в узлах трения /Под ред. А.А.Полякова. – М.: Машиностроение, 1980. – 135с.
13. Поляков А.А., Гаркунов Д.Н. Водородная хрупкость поверхностных слоев при трении // ФХММ, - 1969, - № 2. - с.48.
14. Матюшенко В.Я. Исследования наводораживания металлов при трении с фрикционными пластмассами. Автореф. дисс. к.т.н. Научно-исследовательский институт им. Л.Я.Карпова. М., 1974. 21с.
15. Широков В.В., Максимук О.В. Контактна взаємодія тіл з врахуванням зношування та її особливості стосовно тонкостінних елементів конструкцій (огляд). // ФХММ. – №1. – 2002р. – с.51-62
16. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С., Основы расчетов на трение и износ.- М.:Машиностроение, 1977.-525с
- 17.29. Костецкий Б.И. Поверхностная прочность материалов при трении. – Киев: –Техника,– 1976.–с. 294.
- 18.Д. Бакли. Поверхностные явления при адгезии и фрикционном взаимодействии. – М.: "Машиностроение" – 1986, – 359 с.
19. Современная трибология: Итоги и перспективы / Под ред.К.В.Фролова. – М.: Изд-во ЛКИ, 2008. – 480с.
20. Голего Н.Л. Технологические мероприятия по борьбе с износом в машинах. – М.: ГНТИ, Киев, – 1961. – 193с.
21. Кооперативные деформационные процессы и локализация деформации/ Лихачев В.А., Панин В.Е., Засимчук Е.Э. и др. – Киев.:Наук.думка, – 1989. – 320с.
22. Калыняк И.В., Лаушник И.П., Хай М.В. Предельное равновесие бесконечного тела, содержащего близко расположенные газонаполненные дискообразные трещины // Проблемы прочности – 1986 – № 8 – с.110-113.