

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ПРИ ГРАНИЧНОМУ ТЕРТІ АЗОТОВАНИХ МЕТАЛЕВИХ ПОВЕРХОНЬ

Проаналізовані результати експериментальних досліджень зносостійкості деталей, азотованих в тліючому розряді.

The analysis results of experimental researches details durability post nitration in the glow discharge are expounded.

Ключові слова: зносостійкість, поверхнева модифікація, азотування, тліючий розряд.

Вступ та постановка задачі

Одним з перспективних напрямків розвитку трибології є розробка наукових основ керованого формування модифікованих поверхневих шарів на металах та металевих сплавах, в першу чергу, залежно від вимог подальшої експлуатації об'єктів модифікації. В цей напрямок комплексно входять задачі теоретичного плану, проектування технологій та виробничого забезпечення реалізації процесів модифікації. При цьому окремою важливою стороною проблеми виступає розробка методик об'єктивних досліджень постмодифікаційних характеристик поверхні, які відображають результат обробки в аспекті зносостійкості. Детально особливості методик експериментальних досліджень зносостійкості та їх всебічний аналіз викладено раніше в [1, 2].

Для об'єктивності дослідження зносостійкості модифікованих поверхонь слід акцентувати увагу на тому, що постмодифікаційні характеристики повинні порівнюватись з аналогічними параметрами геометрично подібних поверхонь, які не модифікувались, причому і для одних, і для других вони повинні визначатись за однотипною методикою. Тільки при дотриманні цих вимог результати модифікації можуть оцінюватись як такі, що мають реальний сенс та практичне значення. Справді, в разі неможливості дотримання саме цих вимог виникне задача винайдення перехідної функції між результатами експериментів, що вже становить певну проблему як теоретичного, так і практичного плану. Порівняння параметрів, отриманих при різномірних умовах їх констатації, може призвести до висновків, котрі на практиці з високою ймовірністю не підтверджуються. Ще одним із суттєвих моментів встановлення експериментальних результатів є по можливості забезпечення умов експериментів, які б у максимальній мірі відповідали аналогічним характеристикам реальної експлуатації. Дійсно, практично завжди спостерігається певна невідповідність висновків, сформованих на основі експериментів, в разі, якщо умови випробувань суттєво відрізнялись від таких, котрі спостерігаються в реальній експлуатації. Нарешті не останнім по вагомості є фактор часу, оскільки можна застосувати такі параметри роботи експериментальної установки для дослідження зносостійкості, при яких процес зносу за часом наближався би до значень, зафіксованих в експлуатаційному режимі. Тоді тривалість експериментальних досліджень з врахуванням необхідності забезпечення потрібної достовірності їх результатів буде такою, що необхідність самих досліджень для практики відпаде сама собою.

Таким чином, метою цієї роботи є формування висновків стосовно результатів експериментальних досліджень зносостійкості взірців після їх поверхневої модифікації азотуванням в тліючому розряді з огляду на подальше використання методики експериментів для проведення більш широких досліджень процесів керованого формування трибосистем. При цьому критерії оцінки результатів повинні враховувати зазначені вище вимоги.

Основні результати експериментальних досліджень. Експериментальні дослідження проводились на універсальній машині для випробування матеріалів на тертя моделі 2168УМТ з деякою модернізацією вузла тертя, про що детально викладено в [1]. Відпрацьовування режимів експериментів проводилось на взірцях, методика підготовки котрих наведена там же, причому для перевірки можливості подальшого співставлення процесів зношування вибирались об'єкти з суттєво відмінними характеристиками поверхні: м'які поверхні представлені взірцями із сталі 20 без модифікації, модифіковані – зі сталі 45 після їх азотування в тліючому розряді. Останні до азотування мали поверхневу твердість $HV_{0,1}$ 215, після модифікації $HV_{0,1}$ 700...730. Оскільки в зону тертя протягом всіх експериментів забезпечувалась подача рідкого мастила, то коефіцієнт тертя фіксувався в діапазоні 0,05...0,12, що відповідає граничному режиму тертя [3-6].

Початкова серія експериментів проводилась на взірцях зі сталі 20 без їх модифікації. Твердість контртіла з загартованої сталі становила HRC 60. Швидкість та тиск вибирались в таких межах, щоб температура поверхні взірців в зоні тертя не перевищувала 40°C, а в комплексі з величиною тиску забезпечувалась би постійна наявність мастила по площадці тертя. При швидкості відносного руху взірця стосовно контртіла $V=1,8$ м/с та тиску 10 МПа (це значення виявилось оптимальним, оскільки при ньому спостерігається більш-менш вагоме зношування та відсутні явища схоплювання) спостерігається рівномірне зношування, величина лінійного зносу в середньому складає 15,4 мкм/км шляху. Коефіцієнт тертя коливався в межах 0,05...0,11, що в умовах експерименту відповідало силі тертя в межах 29,4...64,7 Н. Залежність від шляху усередненого по декількох взірцях лінійного зносу на один кілометр шляху показана на рис. 1.

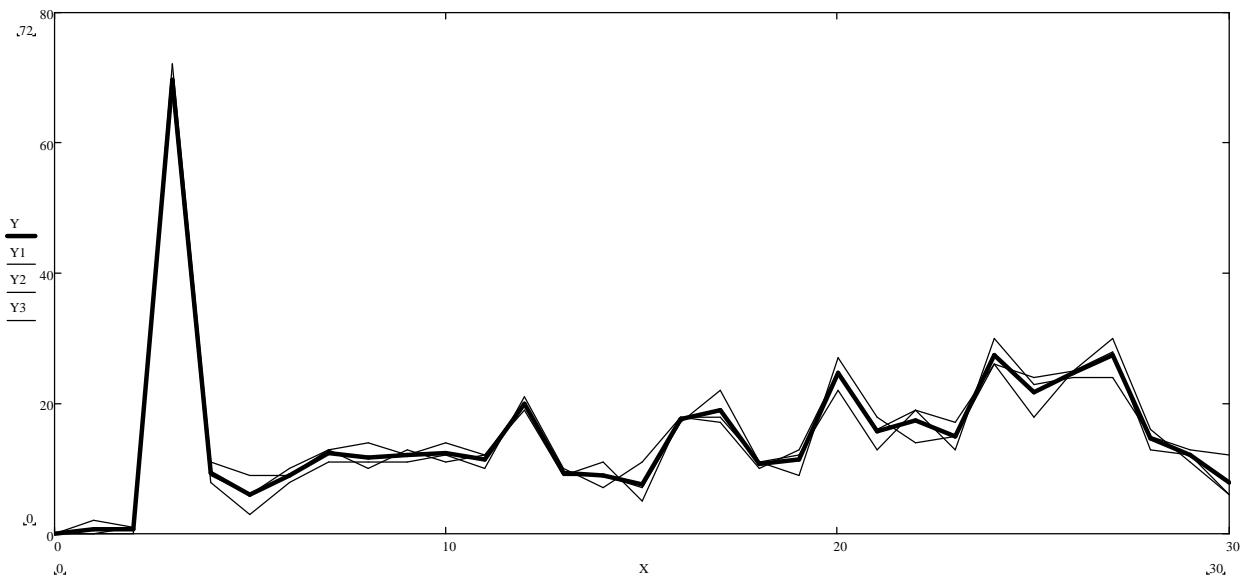


Рис. 1. Залежність від шляху тертя лінійного зносу на один кілометр шляху взірців зі сталі 20 неазотованих при тиску 10 МПа, швидкості 1,8 м/с

На рис. 1 на горизонтальній осі відкладено шлях тертя від 0 до 30 км, на вертикальній осі – величина зносу в мкм, основною лінією – величину лінійного зносу усереднену по всіх взірцях, тонкими лініями – усереднений лінійний знос по групах взірців. З наведеного рис. 1 чітко відслідковується висновок щодо змінного характеру самого процесу зношування. На перших кілометрах шляху зносу практично немає, це може пояснюватись тим, що взірці попередньо навантажувались в процесі припрацювання тиском порядку 8 МПа. При цьому на майбутній поверхні тертя утворювався шар ущільненого металу, свого роду – наклеп, тобто вона поверхнево зміцнювалась. В міру зняття цього початкового поверхневого шару починався процес інтенсивного зношування. Далі зношування відбувалось за схемою періодичного поверхневого ущільнення та руйнування цього ущільненого шару. Цим і пояснюються періодичні коливання як коефіцієнта тертя, так і сили тертя. Таким чином, з викладеного слідує перший висновок стосовно нерівномірного характеру зношування немодифікованих взірців, викликаного постійними структурними перетвореннями на поверхні тертя та руйнуванням структур, характеристики котрих перевищують показники поверхневої твердості основи взірців. Цей же висновок підтверджується на рис. 2 графіком абсолютного зносу взірців залежно від пройденого шляху тертя (позначення ліній – аналогічне рис. 1). Ефект поверхневого ущільнення – наклепу при збільшенні величини тиску відмічався раніше [2], при цьому поверхнева мікротвердість зростала в декілька разів. Наприклад навіть для чавунної поверхні після того, як вона оброблялась тиском 1,2 МПа поверхнева мікротвердість досягала значень $HV_{0,1}$ 1000. Не виключено, що постійна наявність в зоні контакту взірця та контртіла мастила може сприяти утворенню метало-мінеральних структур, процесу появи та руйнування яких теж провокують нерівномірність зношування.

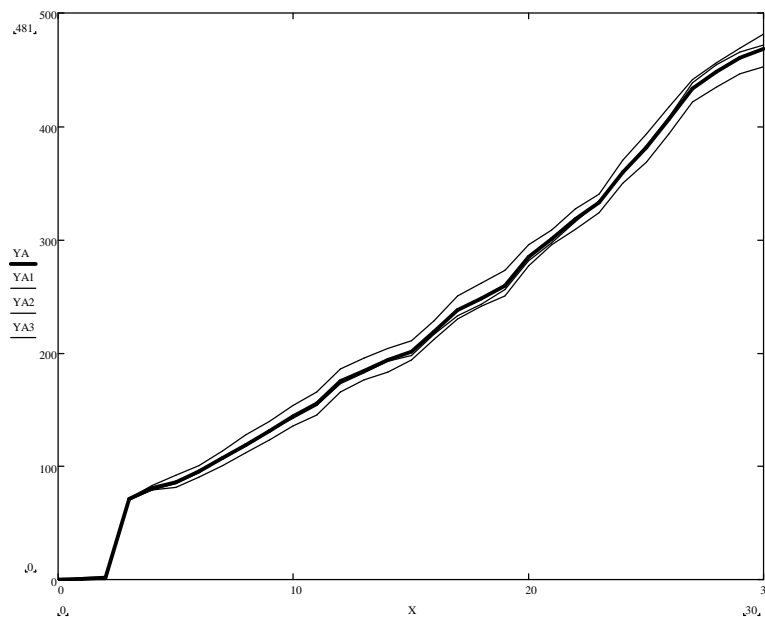


Рис. 2. Графік абсолютного значення лінійного зносу взірців зі сталі 20

Характер прикладення, а особливо – схема зміни величини тиску на поверхні тертя теж суттєво впливає на процес зношування. Насамперед це проявляється у ще більшій мірі стосовно ефекту поверхневого зміцнення. Вплив характеру зміни тиску на поверхні контакту підтверджується дослідими зі взірцями з немодифікованої сталі 45. При початковому тиску 10 МПа та швидкості взаємного руху взірця та контртіла 1,8 м/с (тобто параметри режиму випробувань повністю співпадали з прийнятими для взірців зі сталі 20) при досягненні значень шляху 10 км лінійний знос практично не фіксувався. Ступінчасте збільшення після кожного кілометра шляху тиску на 2 МПа аж до 16 МПа теж не змінило характер зношування. При тиску 18 МПа на наступному кілометрі спостерігався лінійний знос 15-17 мкм, але вже на наступному кілометрі зношування знову припинилось. Після цього (18 км пройденого шляху) тиск був збільшений до 20 МПа, проте зношування не спостерігалось. Таким чином, з викладеного слідує, що поверхня взірця періодично ущільнюється зміцнюється, для її руйнування потрібно або значний шлях тертя, або підвищення тиску до певних меж, що викликає силу тертя, достатню для чергової зміни структури поверхні. До цього слід додати, що при початковій поверхневій мікротвердості $HV_{0,1}$ 215 після 20 км шляху та досягнення тиску на поверхні 20 МПа поверхнева мікротвердість зросла до значень $HV_{0,1}$ 414 ($HV_{0,05}$ 616). В подальшому продовжували збільшувати тиск на 2 МПа на кожний новий кілометр шляху, проте лінійний знос знову не спостерігався аж до 26 МПа. При цьому тискові спочатку інтенсивно виріс знос до значень 131-167 мкм, а потім почались явища схоплювання. Після того, як процес став реалізовуватись при тиску 26 МПа, поверхнева мікротвердість виросла до значень $HV_{0,1}$ 856 ($HV_{0,05}$ 962), тобто фактично поверхня перетерпіла механічну модифікацію. Щодо характеру зміни тиску на поверхні, то в описаному експерименті тиск збільшувався за певною схемою (наприклад по 2 МПа на кілометр шляху), структурні зміни її проходили поступово. А в наступному експерименті з участю аналогічних нових взірців та контртіла з самого початку тиск в зоні контакту був встановлений на рівні 24 МПа (при цьому значенні тиску, досягнутого шляхом ступінчастого збільшення в попередньому експерименті, лінійний знос практично не фіксувався). Вже на першому кілометрі коефіцієнт тертя стрімко зросли до значень, характерних для схоплювання, поверхнева мікротвердість становила $HV_{0,1}$ 892 ($HV_{0,05}$ 962). По суті при такому великому тиску поверхня різко структурно змінилась, не виключено ці структурні перетворення призвели до витискання масляної плівки з зони контакту, характер процесу тертя став наближатись до режиму сухого тертя, що й призвело до схоплювання. Про роль фактора характеру зміни тиску говорить наступний експеримент. На взірцях з тієї ж сталі 45 тиск з самого початку змінювався по схемі 2МПа/км шляху, знос практично був відсутній, але вже після 5 км тиск різко збільшили до 20 МПа, що зразу ж призвело до появи явищ схоплювання, причому поверхнева мікротвердість в кінці експерименту становила $HV_{0,1}$ 838 ($HV_{0,05}$ 905).

Паралельно проведений контроль температури в зоні контакту встановив, що її значення зразу після зупинки не перевищують 42°C , а вже через 5-10 с після розмикання контакту температура поверхні не перевищує 22°C . Таким чином вирішальним чинником, який впливав в цих експериментах на характер тертя був тиск, оскільки при зафіксованих значеннях температури характеристики в'язкості мастила суттєво не змінювались.

Наявність на поверхні ущільненого шару як головного фактора, котрий визначає параметри зношування підтвердився наступним. Не знімаючи взірець зі стенда, тобто умови базування залишились незмінними, мілкою шліфувальною шкуркою послідовно номер 150 та номер 500 був знятий шар 15-24 мкм. До того при тиску 18 МПа на шляху 13 км практично не відмічався лінійний знос (всього ж до підшліфовування при різних значеннях тиску загальний шлях склав 25 км). На першому ж кілометрі після підшліфовування лінійний знос реєструвався в межах 17-22 мкм, на наступних двох кілометрах він знову припинився, далі після аналогічної пішліфовки знос знову склав біля 11 мкм з поступовим припиненням, що ще раз підтверджує викладену вище версію впливу на характер зношування процесу утворення ущільнених мікроструктур. Цікаво, що поверхнева мікротвердість після підшліфовки практично не відрізняється від початкових значень.

Стан поверхні контртіла теж суттєво впливає на характер протікання процесу зношування. В описаних вище експериментах, як вже зазначалось вище, використовувалось контртіло із загартованої сталі з гладкою поверхнею (параметр шорсткості Ra 0,27). Описані вище експерименти насамперед вимагали значних витрат часу, наприклад навіть для однієї серії взірців з сталі 20 потрібно було з врахуванням часу на стабілізацію температури, вимірювання тощо два повних робочих дні (15 годин). Очевидно, що отримання результатів, які в першу чергу відповідають вимозі достовірності висновків, вимагало б часу, який не можна вважати реальним. Особливо це стосується тих питань, де отримання оперативних даних щодо ефективності того чи іншого методу модифікації, технологічних параметрів його реалізації вкрай необхідне, наприклад – у виробничих умовах. Тому наступною фазою експериментів були досліди, в яких була суттєво підвищена роль механічної складової зношування. З цією метою використовувались контртіла, шорсткість поверхні яких штучно збільшувалась за допомогою шліфування шкуркою, кругом, нанесенням титану та твердого сплаву на електроіскровій установці, нанесенням рисок радіального напрямку тощо. За допомогою різних методів шліфування поверхні параметр шорсткості Ra зі значення 0,2...0,3 мкм збільшився до 0,5 мкм при шліфуванні шкуркою вручну, до 0,37 мкм при шліфуванні кругом на шліфувальному станку та 1,15 мкм при шліфуванні кругом на шліфувальній машинці. Після нанесення титану та твердого сплаву електроіскровим методом параметр шорсткості перевищував 8 мкм. Твердість поверхні після нанесення покриття електроіскровим методом залежно від полярності електрода, марки імплантованого матеріалу та місця

замірів (шліфувана в наступному чи оплавлена поверхні) складала $HV_{0,1} 450 \dots 800$, причому більші значення як правило відповідали ділянкам з наступним після імплантації шліфуванням, що підтверджує зазначений вище ефект поверхневого ущільнення після шліфування.

Графік зміни лінійного зносу взірців з немодифікованої сталі 45 (контртіло – модифіковане електроіскровою імплантацією, тиск 4 МПа, швидкість – 1,8 м/с) з дотриманням системи позначень кривих, прийнятою на попередніх рисунках, показано на рис. 3. Як слідує з цього рисунку на початку процесу зношування складова механічного зношування забезпечує інтенсивність незрівнянно більшу, ніж в попередніх експериментах, причому тиск на поверхні застосовувався суттєво менший. Ріжуча здатність контртіла призводить до руйнування поверхневих структур, не допускаючи при цьому їх ущільнення, проте з часом в міру притуплення мікроступів на поверхні контртіла процес зношування стає все менш інтенсивним, аж до повного призупинення.

Аналогічні за змістом результати отримані при використанні контртіл, одне з яких проточене на токарному станку різцем ВОК60 при радіальній подачі 0,11 мм/об, що забезпечило параметр шорсткості $Ra 2 \dots 3$ мкм. Інтенсивність зношування на першому кілометрі шляху при тиску 2 МПа складала 8-10 мкм на кожних 100 м шляху, проте вже на початку другого кілометра цей показник знизився до рівня 1-2 мкм на 100 м, а далі – до 1-2 мкм/км.

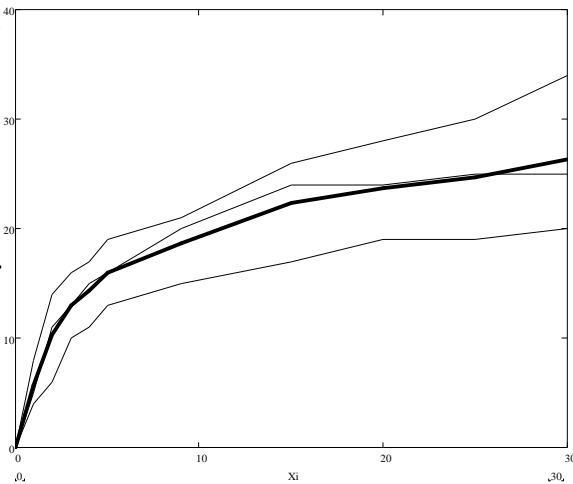
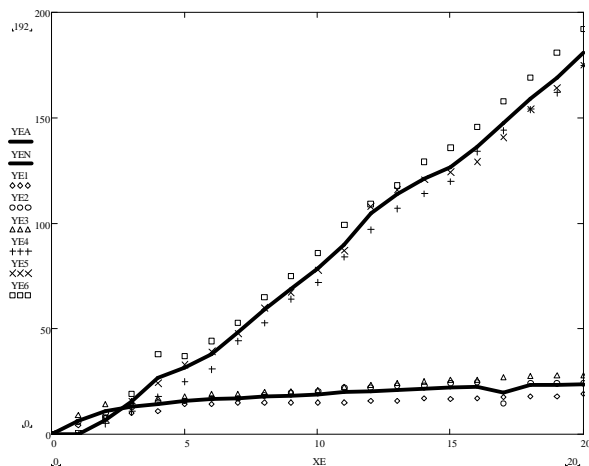


Рис. 3. Графік зміни лінійного зносу для пари взірців з немодифікованої сталі 45 – контртіло імплантоване електроіскровим методом

Рис. 4. Зношування азотованих (верхня область) та неазотованих взірців (нижня) за рахунок дії механічної складової тертя (тиск 4 МПа, контртіло – імплантований електроіскровим методом твердий сплав ВК8)

Характер зношування азотованих взірців в порівнянні з неазотованими демонструється рис. 4. Азотовані взірці (сталь 45, поверхнева мікротвердість $HV_{0,1} 466$) зношувались в тих же умовах, які наведені вище з використанням проточеного різцем контртіла, проте тиск складав 4 МПа. Як слідує з рисунку процес зношування для неазотованих взірців – традиційний з утворенням ущільнених поверхневих структур та практично припиненням зношування вже після п'яти кілометрів шляху. Азотовані взірці на першому кілометрі практично не зношуються, оскільки в роботу вступає найбільш міцний прошарок ϵ -фази. Проте його товщина незначна, буквально декілька мікрометрів, тому вже на наступних кілометрах шляху починається процес зношування практично зі сталою інтенсивністю. Пов'язано це з тим, що реально однорідний прошарок γ' - фази та α -твердого розчину з достатньо значними показниками твердості не піддається ущільненню і знімається за рахунок в

основному впливу на достатньо крихку структуру механічної складової процесу зношування. Крім того, в експериментах, результати яких відображені на рис. 4, застосовувався відносно невеликий тиск.

В подальшому дослідження розвивались по шляху виявлення впливу тиску на процес зношування аж до великих його значень. Результати цієї серії експериментів відображені на рис. 5.

З рис. 5 слідує висновок, що практично при будь-якому тиску настає момент, коли процес зношування практично припиняється, проте ресурсний шлях, при якому спостерігається подібна стабілізація, різний для різних значень тиску. Гіпотезу про те, що процес зношування в умовах, коли превалює механічна складова цього процесу, фактично становить сукупність двох конкуруючих процесів – зміцнення поверхні та руйнування цього зміцненого шару, підтверджує рис. 5. Чим твердіша поверхня контакту, тим більше порогове значення тиску, при якому відбувається фаза руйнування ущільненого шару. Проте вплив тиску при його великих значеннях має екстремальний характер: в демонстрованій серії експериментів найбільш динамічно процес зношування відбувався при тиску 65 МПа. При значеннях тиску менших та більших цієї величини (при рівності швидкості ковзання) інтенсивність зношування була меншою. Збільшення швидкості ковзання призводить до зниження інтенсивності зношування та прискорення початку фази стабілізації, що може пояснюватись зменшенням часу на релаксацію процесів ущільнення поверхневого шару.

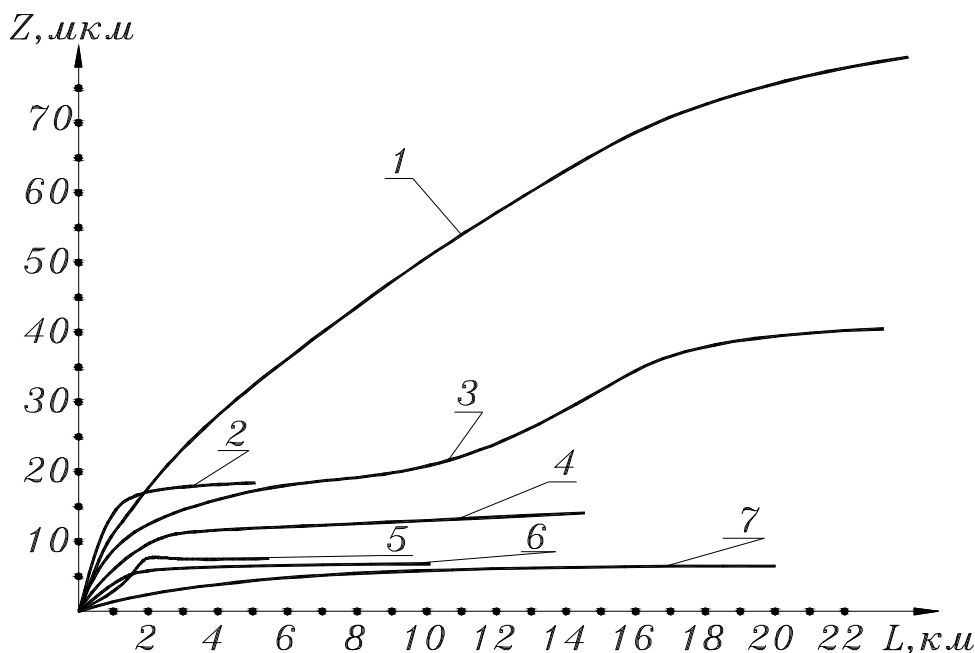


Рис. 5. Знос взірців зі сталі 45 азотованої залежно від шляху при тиску в зоні контакту та швидкості ковзання: 1- 65 МПа, 0,1 м/с; 2 – 50 МПа, 0,1 м/с; 3 – 120 МПа, 0,1 м/с; 4 – 80 МПа, 0,1 м/с; 5 – 40 МПа, 0,3 м/с; 6 – 65 МПа, 0,2 м/с; 7 – 20 МПа, 0,2 м/с

Висновки. 1. Процес зношування при граничному терті фактично включає два конкуруючих процеси: ущільнення поверхневого шару зі збільшенням його мікротвердості та руйнування поверхневого шару з локальним схопленням поверхонь.

2. На співвідношення цих фаз в часі суттєво впливають початковий стан поверхні та її фізико-механічні характеристики, тиск на поверхні контакту, швидкість ковзання, причому всі ці параметри для граничного режиму тертя знаходяться в тісному взаємозв'язку.

3. З зазначених вище обставин проведення випробувань на зносостійкість взірців, виготовлених з різних матеріалів та з суттєво відмінними характеристиками поверхневого шару при однакових параметрах режиму випробувань у більшості випадків неможливе, оскільки отримані результати проблематично порівнювати.

4. Перспективними слід вважати ті умови випробувань, які можуть застосовуватись для поверхонь з різними характеристиками та забезпечують результати, котрі прийнятні з точки зору достовірності, взаємного порівнювання та часу їх проведення.

Література

1. Пастух І. М. Особливості методики випробування на зносостійкість металів, азотованих в тліючому розряді. / Пастух І. М., Здибель О. С., Лук'янюк М. В. Вісник ХНУ. – 2009. – № 3. – С. 7-11.
2. Пастух І. М. Аналіз методів дослідження зносостійкості після азотування в тліючому розряді. / Пастух І. М., Здибель О. С., Лук'янюк М. В. Вісник ХНУ. – 2009. – № 4. – С. 14-18.
3. Крагельский И. В. Основы расчетов на трение и износ. / Крагельский И. В., Добычин М. Н., Комбалов В. С. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.
4. Справочник по триботехнике / [под ред. М. Хебды, А. В. Чичинадзе]: в 3 т. Т. 1. Теоретические основы. – М.: Машиностроение, 1989. – 400 с.
5. Словарь-справочник по трению, износу и смазке / [Е. Л. Швидков, Д. Я. Ровинский, В. Д. Зозуля, Э. Д. Браун]. – К.: Наукова думка. – 1979. – 188 с.
6. Гаркунов Д. Н. Триботехника: [учебник для студентов вузов]. / Гаркунов Д.Н. [2-е изд.]. – М.: Машиностроение. – 1989. – 328 с.

Надійшла 22.5.2010 р.