

**РОЗВИТОК ДЕСТРУКТИВНИХ ЯВИЩ У НОМІНАЛЬНО-НЕРУХОМОМУ КОНТАКТІ В УМОВАХ ДІЇ МІКРОЗМІЩЕНЬ КОНТАКТУЮЧИХ ПОВЕРХОНЬ**

*У номінально-нерухомих з'єднаннях мають місце мікрозміщення поверхонь, що, в свою чергу, призводить до руйнівних процесів і, врешті, до втрати працездатності з'єднання. В роботі розглянуто механізм переходу від режиму статичного зчеплення до режиму зчеплення-проковзування.*

Деградація контактної пари в умовах змішаного контакту й переходу до режиму динамічного зчеплення - проковзування (РДЗП) викликається локально-абразивною дією продуктів мікрозношування й втомним розривленням плям контакту, що знаходяться у стані зчеплення. Все це погіршується хімічною активацією поверхні тертя, чітко виділяються області мікрозношування на периферії контакту та руйнування області зчеплення.

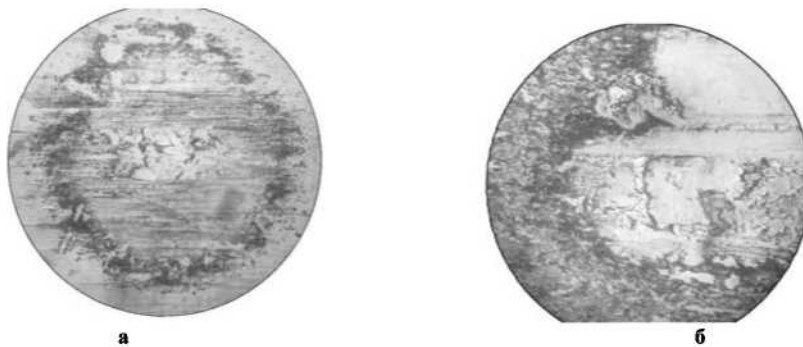


Рис. 1. Руйнування сталі ХН78Т в умовах змішаного фретинг-контакту. а – нормальне навантаження,  $P_n = 30 \text{ Н}$ , б -  $P_n = 75 \text{ Н}$ , кількість циклів  $N = 2,15 \cdot 10^6$

Вимірювання втрат об'єму через поверхню розділу в результаті тангенціальних навантажень було проведено на установці «Talyscan» методом лазерного сканування плям контакту. На рис. 2–4 представлені етапи аналізу об'ємного зношування поверхонь.

Якщо величина відносного проковзування та швидкості є показниками цілісності контакту, то відповідна інтегральна величина втрати об'єму, а разом з нею й зменшення кількості елементарних зв'язків, виродження пружно-пластичного контакту у чисто пружній, збільшення шорсткості контакту, зменшення сили статичного тертя є критерієм цілісності ННФК в умовах мікрофретингу. Важливим є стан контакту в початкові цикли коливальних рухів. Вже при кількох десятках циклів коливальних рухів відбувається перерозподіл міжконтактного простору в сторону його збільшення. Це свідчить про зростання вільної поверхні контакту та про активну фазу

роботи сил тангенціального опору у контакті (рис. 3).

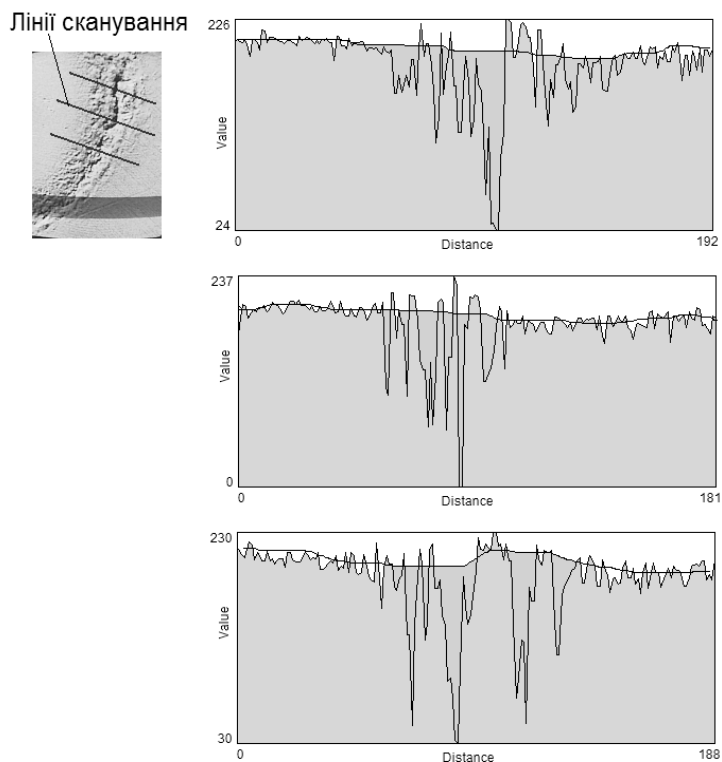


Рис. 2. Схема вимірювання зношування в області мікропроковзування у ННФК сталі 20Х13 в стані квазістатичного зчеплення після  $1.5 \cdot 10^6$  циклів

Вільна поверхня контакту зростає в залежності від відношення  $\frac{F_t}{P_n}$  у 1,2...2,2 рази, а деформаційні рівні поверхонь накопичуються на периферії контакту. Для відносно м'яких металевих поверхонь підвищений рівень тангенціальних напружень призводить до появи вузлів схоплення не в області найбільших нормальних напружень, а в області проковзування (рис.4).

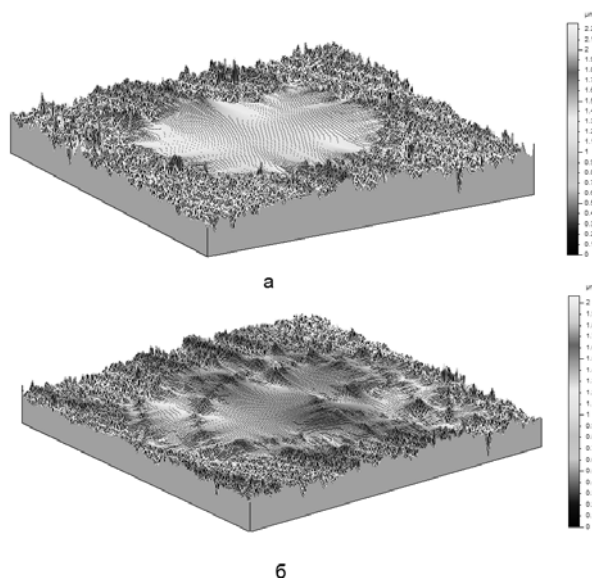


Рис.3. Нормальний контакт кульки  $\varnothing 4,2$  мм з шорсткою поверхнею (а). Тангенціальний контакт після 128 циклів коливань у стані зчеплення(б). Сталь 30ХГСА,  $P_n = 45$  Н,  $P_t = 12$  Н

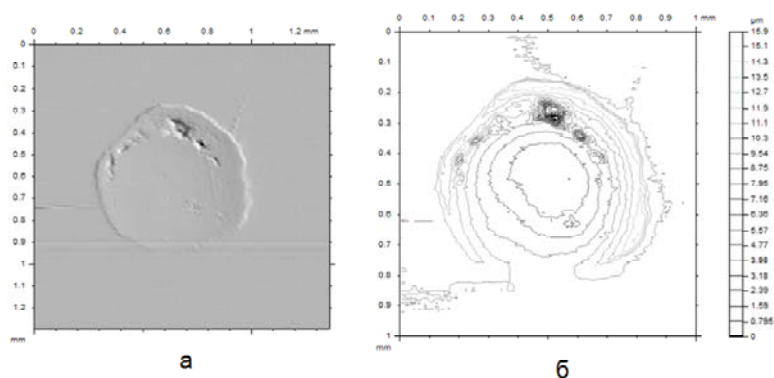


Рис. 4. Мікрофретинг на границях плями ННФК сталі 45 (сірої) з кулькою ШХ15 після ультразвукової очистки від окислів (а). Поверхні деформаційні зміни та об'ємні втрати у ННФК (обробка Tauylscan) (б)

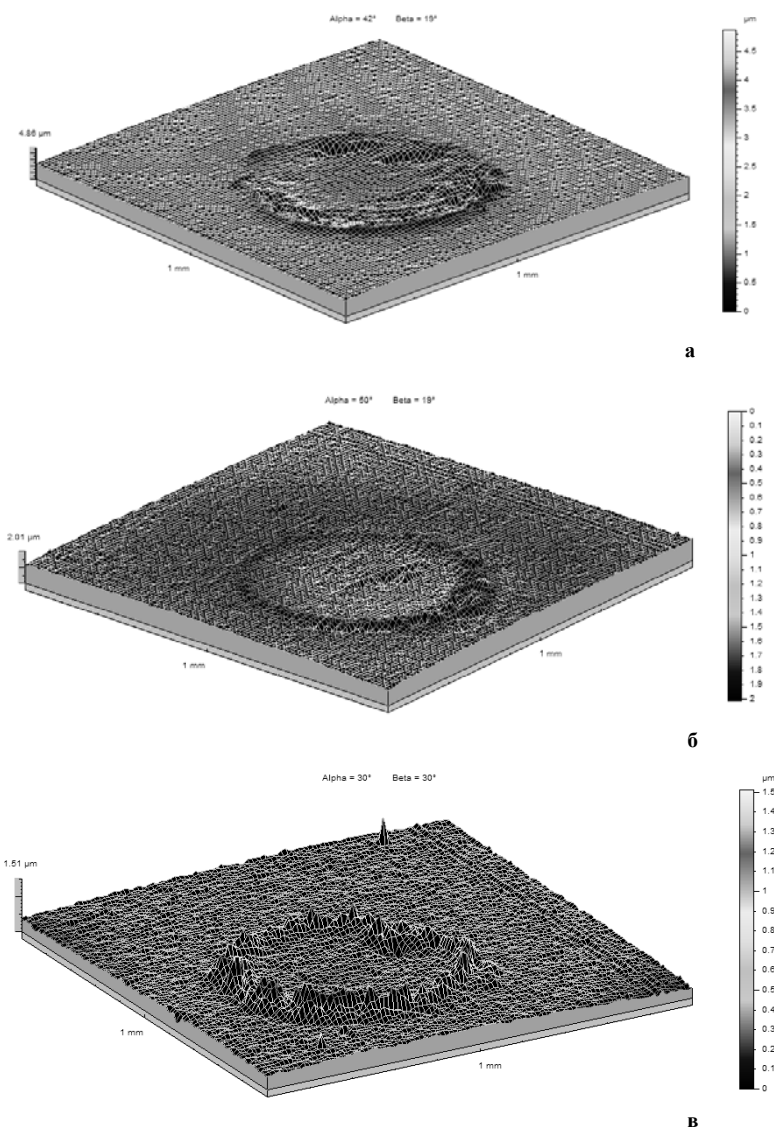


Рис. 5. Стан ННФК загартованої сталі 30ХГСА у момент переходу до РДЗП (а), у сталій стадії змішаного контакту (б) та об'єм видаленого матеріалу з області проковзування (математична обробка) (в)

Вигляд плями контакту у момент переходу від режиму часткового проковзування до РДЗП показаний на рис. 4. Вимірювання об'ємних втрат у ННФК цілком визначено корелюють зі зростанням величини мікропроковзування та розсіювання енергії (рис. 6). Величину зношування у  $\text{мкм}^3$  відносимо до площі плями контакту.

Характер відносних мікропереміщень та енергії розсіювання при деградації ННФК має суттєві відмінності. Початкове предеформування та перші ознаки руйнування поверхні призводять до зменшення віброактивності контакту. Це пояснюється відомими ефектами зміцнення поверхонь, підвищенням ФПК, сили

тертя, виникненням ювенільних плям контакту. Цей ефект можна вдало використовувати для двохступеневої зтяжки деталей, що з'єднуються. Для перевірки явища було використано установки для дослідження на фретингостійкість при значних нормальних тисках та для випробувань циліндричних контактних пар. Програма навантаження приймалася наступною: одна пара тертя навантажувалась нормальною силою, яка становить 80% від контрольної. При такій нормальній силі пара витримувала 20 хвилин циклів фретингу при частоті 50 Гц. Наступним кроком було донавантаження контакту до 100% і відбувались випробування на фретингостійкість. Таким відносно простим способом була підвищена зносостійкість при фретингу на 10...30% на відповідній базі циклів (рис. 7). Ефект більш яскраво проявляється при збільшенні нормального тиску. Для плоского контакту це становить 40...80 МПа.

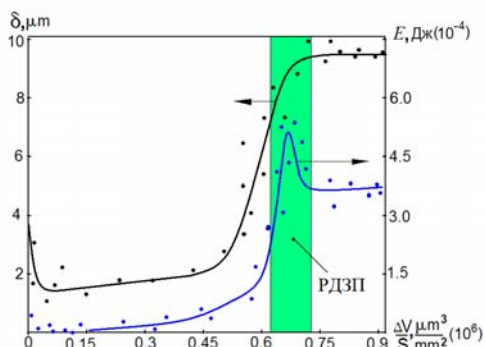


Рис. 6. Порівняльна характеристика критеріїв фретингостійкості (розсіювання енергії за цикл коливань  $E$  та відносного переміщення  $\delta$ ) ННФК в залежності від величини об'ємного мікропроковзування. Сталь 30ХГСА,  $N=4,5 \cdot 10^8$  циклів

У зв'язку зі збільшенням тривалості малої віброактивності контакту зменшується й фретинг-знос для матеріалів, що досліджуються. Найбільшу фретингостійкість за критерієм Арчарду показали сталі 20Х13 та покриття ВК8 (рис. 8). Зменшення фретингостійкості для нержавіючих сталей пояснюється, що для традиційних амплітуд проковзування відсутність щільного шару окислів не захищає від поступового зношування поверхонь. До того ж спостерігається зменшення сили тертя, а через це – деяке збільшення амплітуди проковзування.

Програма досліджень на установці для циліндричних контактних пар полягала у наступному: після відпрацювання певної кількості циклів визначалась максимальна сила статичного тертя шляхом навантаження до моменту зрушення контакту з місця. Другий варіант визначення сили зсуву: у динаміці при збільшенні частот коливань. На рис. 9 показана характерна поведінка сили статичного тертя в залежності від циклів тангенціального навантаження.



Рис. 9. Циліндрична контактна пара та зміна коефіцієнту зчеплення залежно від числа циклів тангенціального навантаження.  $P_n = 40 \text{ МПа}$ ,  $\omega = 278 \text{ рад/с}$

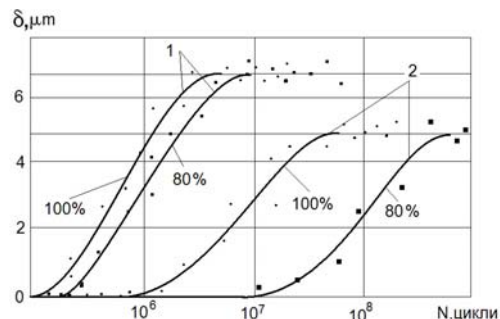


Рис. 7. Відносні мікропроковзування у контактних парах в залежності від програми навантаження.  $P_n = 20 \text{ МПа}$  – 1,  $P_n = 50 \text{ МПа}$  – 2

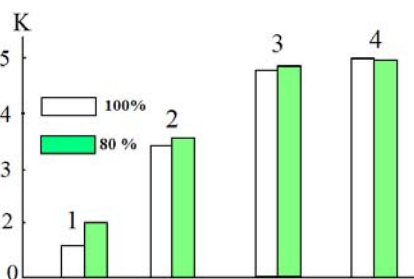
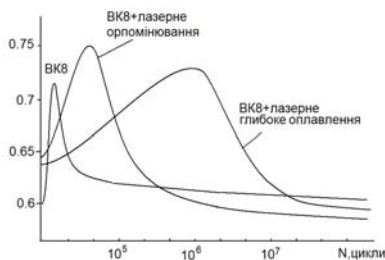


Рис. 8. Критерій Арчарда по оцінці фретингостійкості матеріалів в залежності від програми навантаження. ВК8 + лазерна обробка – 1, сталь 30ХГСА – 2, сталь 45 – 3, сталь 20Х13, Х18Н10ЕТ – 4. Амплітуда в режимі сталого проковзування 30 $\mu\text{м}$ ,  $P_n = 80 \text{ МПа}$ ,  $N = 10^7$  циклів



Наближення амплітуди «розхитування» контакту до критичної характеризується виникненням дискретних місць відокремлення поверхневого шару. При цьому зона проковзування майже не змінюється. Було встановлено, що після встановлення деякого рівноважного відношення, стримуючим фактором до переходу до ковзання є запас сил тертя в області зчеплення. Механізм руйнування контакту на цьому етапі описується довготривалою контактною втомою і відбувається за рахунок розшарування найбільш навантажених плям контакту (рис. 10).

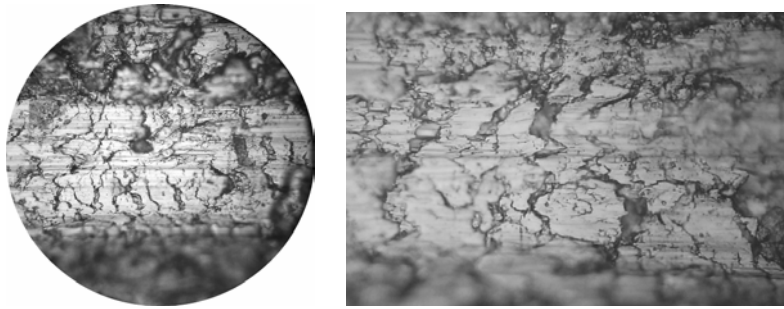


Рис. 10. Розшарування зони зчеплення при наблизненні стану ННФК до проковзування

При малих нормальних навантаженнях, природно, передбачити, що перехід до кінематичного тертя, буде відбуватися через трансформацію зони проковзування (рис. 11). Особливо це помітно для скла, для якого розміри зони зчеплення є найменшим з усіх розглянутих матеріалів. Це наводить на думку, що при малих нормальних навантаженнях для підвищення фретингостійкості інтерфейсу достатньо створювати тонкі зносостійкі шари методом високоенергетичного впливу на поверхню. Це можуть бути добре розвинуті технології лазерної, електроіскрової, плазмової обробки, іонної імплантації та інші. Інколи досить підвищити шорсткість поверхонь, тонких шарів товщиною до 10 мкм, що дасть можливість пружно деформуватися нижнім шарам основного металу.

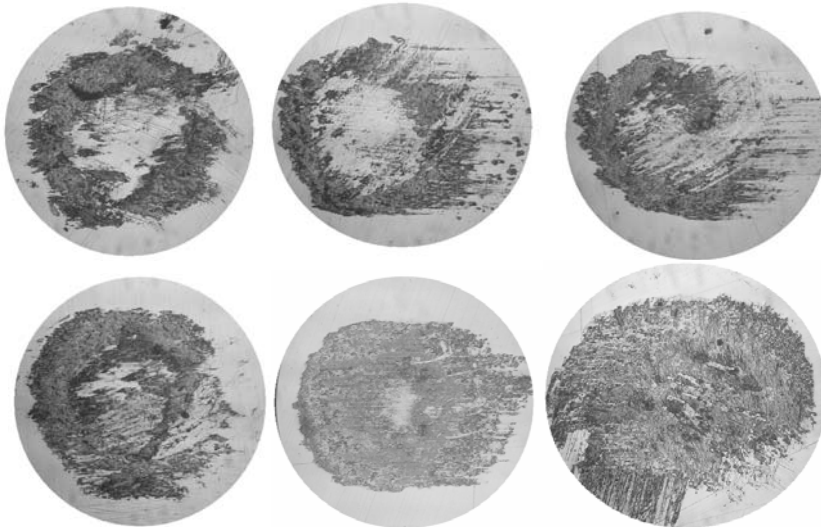


Рис. 11. Трансформація зони проковзування в момент втрати контактом номінальної цілісності. Сталь 30ХГА, лазерна термообробка,  $\sigma_n = 15 \text{ МПа}$

Для твердих, грубих шарів, отриманих глибоким лазерним переплавом або легуванням перехідними металами (Nb, Co, Mo, W), малий нормальний тиск (до 40 МПа) практично не призводить до фретинг-зносу, однак з іншого боку, не забезпечує цілісності контакту. При втраті тангенціальної жорсткості  $c_\tau = 0$ , як вже відмічалось вище, контакт вироджується у суто пластичний й тоді відбувається традиційний фретинг-процес. Для незміцнених конструкційних матеріалів це підтверджується пластичним витисненням матеріалу з мікрооб'ємів фактичного контакту по всій площині контакту (рис. 12).

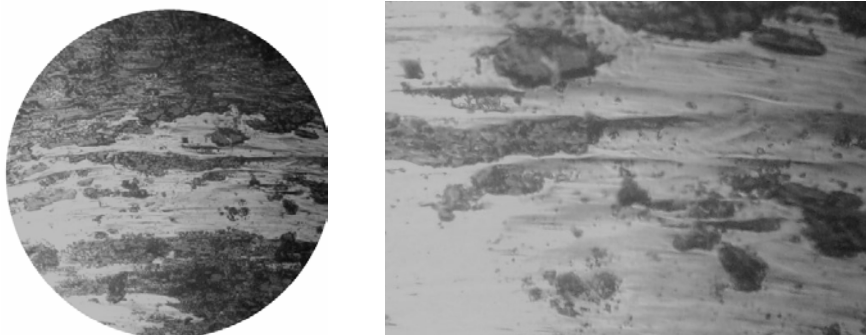
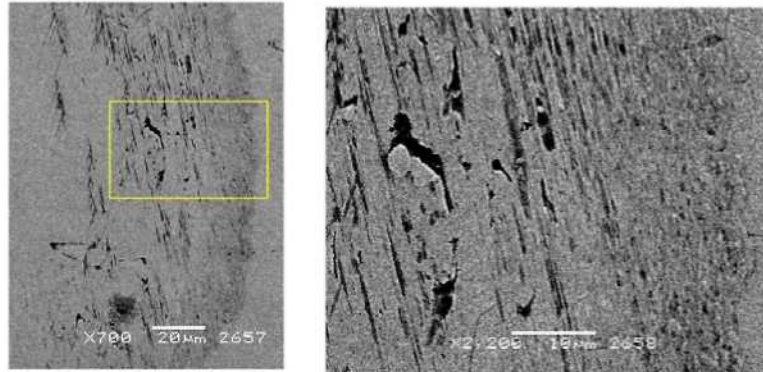


Рис. 12. Пластична деформація в області максимальних нормальних напружень при фретингу з амплітудою 35 мкм. Матеріал - сталь 45. Кількість циклів  $10^8$

Для зміцнених матеріалів при таких же самих умовах навантаження масштаби руйнування набагато менші. По-перше, із-за того що в основному локалізуються у зоні проковзування, яка сама по собі уявляє скупчення дискретних поверхневих мікроруйнувань (рис. 13). По-друге, механізм руйнування являє собою втрату фізико-хімічних зв'язків у плямах фактичного контакту які, в свою чергу, не стримують відносного мікропереміщення поверхонь. Ці зв'язки можуть бути настільки сильними, що руйнування відбувається не по поверхні розділу, а цілим фрагментом. Зазвичай, його твердість на 50...100% більше за вихідний матеріал. Тому ці частки мігрують по поверхні розділу, приймають активну роль у руйнуванні мікрорізнанням або локалізуються у місцях відриву (рис. 13). Принципова відмінність зміцнених матеріалів полягає у багатоцикловій контактній втомі області зчеплення по зрівнянню з малоцикловою для не зміцнених.



**Рис. 13** Механізм руйнування області проковзування у загартована сталі 40ХН.  
Глибока ультразвукова очистка у 0,5% розчині ортофосфорної кислоти

Таким чином, виходячи з вищевказаного, можна передбачати поведінку та фретингостійкість тих чи інших контактних пар в залежності від матеріалу та способу поверхневої модифікації.

Надійшла 30.10.2008 р.