

прогнозування та підвищення зносостійкості триботехнічних систем ковзання. – Т.2: Поверхневе зміцнення конструкційних матеріалів трибосистем ковзання: в 3-х т. — Дрогобич: Коло. 2001. — 512 с. 3. Иванова Н.Д., Иванов С.В., Болдырев Е.И. Соединения фтора в гальванотехнике. – К.: Наук. думка, 1986. – С.91–97. 4. Иванова Н.Д., Иванов С.В., Болдырев Е.И. Справочник гальванотехника. Фторсодержащие электролиты и растворы. – К.: Наук. думка, 1993. – С.39–47, 148-151. 5. Правила приймання виробничих стічних вод у Київську міську каналізацію. – К.: Київська міська рада народних депутатів, 1993. – 18 с. 6. Измайлова Д.Р., Войтович В.Б., Куролан Н.С. Ионообменный метод очистки промышленных стоков гальванических цехов // Водоснабжение и сантехника. – 1980. – №4. – С. 7. 7. Пашечко М.І., Богун Л.І., Ленік К.С., Яворська М.М. Дослідження кінетики зношування хромовмісних покриттів за умов граничного мащення. Машиностроение и техносфера XXI века // сб. тр. XVI Международ. науч.-техн. конф. в г. Севастополе, 14–19 сентября 2009 г.: в 4-х т. – Т.3. – Донецк: ДонНТУ, 2009.– С. 19–25. 8. Алексеев Н.М., Кузьмин Н.Н., Транковская Г.Р., Шувалова Е.А. Методика исследования смазочного действия // Практическая трибология. – М., 1994. 9. Кузьмин Н.Н., Шувалова Е.А., Транконская Г.Р., Муравьева Г.И. Методы анализа структур поверхностей, формирующихся в процессе трения // Трение и износ. – 1996. – Т. 17, № 4.

УДК 621.787

І.В. Гурей

Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра технології машинобудування,

## ДОСЛІДЖЕННЯ ФРЕТИНГ-КОРОЗІЇ ЗМІЦНЕНИХ ПОВЕРХНОВИХ ШАРІВ, ОТРИМАНИХ ФРИКЦІЙНОЮ ОБРОБКОЮ

© Гурей І.В., 2012

**Показано, що фрикційне зміцнення поверхневого шару істотно підвищує довговічність сталі при фретинг-корозії. Так, під час дослідження без мащення пар сталь 40X – Бра10Ж4Н4 та сталь 40X – сталь 30ХГСА опір зношуванню зріс у 1,7 раза, а при дослідженні у оливі МС-20 у 3,3 і 4,6 раза відповідно. При цьому зміцнювали лише зразок, контрзразок був шліфований.**

**It's show, that the friction hardening essentially increases durability of steel in the fretting- corrosion. So, the wear resistance increases in 1.7 times after research without lubrication pares steel 40H – BrA10G4N4 and steel 40H – steel 30HGSA and in 3.3 and 4.6 times respectively after research with oil MS-20. Only the first specimen of pare had hardened, the second specimen had grinded.**

**Постановка проблеми.** Часто ресурс роботи окремих вузлів і з'єднань обмежується передчасним зношуванням контактуючих деталей в результаті фретинг-корозії, яке виникає на спряжених поверхнях за дуже малих взаємних переміщень внаслідок різного виду вібрацій. Внаслідок інтенсивного зношування контактуючих поверхонь за фретинг-корозії у деталей різко змінюються конструктивні розміри і порушується робота спряжень.

Сьогодні існує велика кількість різних видів зміцнювальних технологій, які дають змогу підвищувати якість поверхневих шарів, збільшувати довговічність і надійність деталей машин і механізмів. Широке застосування на практиці знаходять методи поверхневого зміцнення деталей машин з застосуванням висококонцентрованих джерел енергії. При цьому у поверхневих шарах відбувається нагрівання з великими швидкостями до температур, вище точки фазових перетворень, одночасне зсувне деформування і подальше швидкісне охолодження в екстремальних умовах. Як

результат, змінюється структура, фізико-механічні та електрохімічні характеристики поверхневого шару металу, які істотно впливають на працездатність деталей машин і агрегатів у процесі експлуатації [1].

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Фрикційна обробка належить до методів поверхневого зміцнення із застосуванням висококонцентрованих потоків енергії. Такий потік енергії створюється за рахунок тертя зміцнювального диска по оброблюваній деталі. Поверхневі шари металу нагріваються до температур, вище точки фазових перетворень ( $A_{c3}$ ), відбувається їх одночасне швидкісне зсувне деформування. Швидкість нагрівання досягає  $10^5$ – $10^6$  К/с. Температура нагрівання, товщина шару і ступінь прогрівання основного металу невеликі, тому охолодження відбувається з великими швидкостями за рахунок тепловідведення у глибину металу. За високошвидкісного охолодження часу для формування структур і фаз, які виникають під час звичайного гартування, недостатньо. Фіксується стан, за якого із твердого розчину ще не встигають виділитися окремі фази або це виділення не встигло повністю завершитися. Вміст вуглецю у мартенситі значно більший від концентрації, яка відповідає точці мартенситного перетворення [2, 3]. При цьому в поверхневому шарі деталей машин формується специфічний структурно-напружений стан металу – білий шар, структура якого являє собою високодисперсний мартенсит, залишковий аустеніт і дуже дисперсні карбіди [4].

Найбільший вплив на процеси формування білого шару за фрикційного зміцнення відіграє технологічне середовище, яке при цьому використовується. Під час застосування водяного розчину мінеральних солей на основі хлоридів магнію і кальцію та поверхнево-активної полімервмісної мастильно-охолоджувальної рідини (ПМР) істотно збільшується товщина білого шару за одночасного зменшення складових зусиль зміцнення. Під дією високих температур і тисків відбувається розкладання технологічного середовища на іони  $C^4$ ,  $H^+$ ,  $Cl^2$ ,  $O^2$ ,  $N^3$ ,  $Cl^2$ , які адсорбуються на ювенільних поверхнях і дифундують у поверхневий шар [5]. Під час гартування  $Fe-H$  і  $Fe-C-H$  сплавів за наявності водню знижується температура мартенситного перетворення у залізі і сталях, зменшується критична швидкість охолодження під час гартування і стає можливим утворення мартенситу навіть у безвуглецевому залізі за звичайних швидкостей охолодження [6]. Водень пластифікує поверхневий шар металу, покращує умови перебігу його пластичної деформації.

Вплив пластичної деформації на формування білих шарів проявляється у зміні мікроструктури мартенситу. Імпульсна пластична деформація в області аустенізації призводить до подрібнення зерен аустеніту. Кристали мартенситу, що утворюються з такого деформованого аустеніту, значно меншої величини, аніж під час звичайного гартування, а кількість мартенситу збільшується не за рахунок збільшення величини кристалів, а за рахунок збільшення їх кількості.

Під час експлуатації між деталями машин часто виникають різні коливання. У з'єднаннях з рухомою посадкою можливі переміщення деталей контактуючої пари стосовно одна одної. Переміщення відбуваються здебільшого з малими амплітудами, але різною частотою. У цьому випадку маємо зношування контактуючих поверхонь деталей машин під час фретинг-корозії. Дослідження зношування контактуючих поверхонь деталей машин у процесі фретинг-корозії зміцнених поверхонь з білим шаром сьогодні фактично не проводились.

**Формулювання мети дослідження.** Мета роботи – дослідити вплив поверхневого зміцнення сталевих зразків фрикційною обробкою на зносостійкість за фретинг-корозію пари тертя.

**Викладення основного матеріалу дослідження.** Зміцнені поверхневі шари, утворені на сталевих деталях, як відзначались раніше, мають підвищену твердість, міцність, а також в'язкість порівняно з загартованими і низько відпущеними структурами вуглецевих сталей. Під час тертя ковзання переміщення однієї деталі стосовно іншої відбувається в одному напрямку. Під час перебігу фретинг-корозії переміщення контактуючих поверхонь деталей є осцилюючими, тобто

постійно змінюється напрям ковзання. Амплітуди коливань є невеликі і становлять десяти міліметра. За таких умов утруднено виведення продуктів зношування з зони контакту.

Досліди за фретинг-корозії проводили на установці МФК-1 за схемою «площина-площина» за зворотнo-поступового руху контрзразка стосовно нерухомого зразка. Зразок і контрзразок закріплювали у цангових затискачах та притискали один до одного їх робочими поверхнями із зусиллям не меншим за  $P = 200\text{Н}$ , забезпечуючи взаємне прилягання за допомогою самофіксуєної цанги зразка, після чого жорстко фіксували положення цанги зразка.

Зразки дотикали і прикладали задане стискаюче навантаження, після чого вмикали привід із заданою амплітудою та частотою зворотнo-поступального руху. Досліди проводили за постійної амплітуди і частоти зворотнo-поступального руху ( $A = 100\text{ мкм}$ ,  $\nu = 30\text{ Гц}$ ), питоме навантаження змінювали ступінчасто, не перериваючи експеримент у діапазоні від 5 до 55 МПа з дискретністю 10 МПа. Тривалість дослідів усього експерименту становила  $N = 6 \cdot 10^5$  циклів.

Лінійне зношування кожного зразка вимірювали за допомогою профілографа-профілометра моделі 253. Знімали профілограми з кількох ділянок робочої поверхні зразка у радіальному напрямку. Для ділянок профілограми, які відповідають незношеній і робочій поверхням, проводили середні лінії профілю. Відстань між середніми лініями профілів дорівнювала лінійному зношуванню зразка. Також під час дослідів неперервно записували величину лінійного зношування трибопарі за допомогою тензодавачів. На кожному етапі досліджень фіксували встановлений коефіцієнт тертя.

Зразки були виготовлені зі сталі 40Х у загартованому і низьковідпущеному стані (*HRC* 49-52). Робоча частина їх була зміцнена фрикційною обробкою з використанням як технологічне середовище мінеральної оливи «Індустріальне-20а» та поверхнево-активної полімервмісної мастильно-охолоджувальної рідини. Контрзразки були виготовлені з бронзи БрА10Ж4Н4 і сталі 30ХГСА у загартованому і низьковідпущеному стані (*HRC* 38-40). Дослідження проводили без мащення, а також в оливі МС-20.

Дослідження на фретинг-корозію без мащення пари сталь 40Х – бронза БрА10Ж4Н4 показали, що фрикційне зміцнення істотно впливає на опір зношуванню. Зміцнення зменшує величину зношування як зразка, так і контрзразка, а також знижує усталений коефіцієнт тертя. Білий шар, отриманий з використанням як технологічне середовище ПМР, збільшує опір зношуванню у 1,8 раза порівняно з незміцненою парою. У працюючих у парі бронзових контрзразків зносостійкість підвищилась у 1,6 раза (рис. 1).

Аналогічна картина спостерігається під час дослідження пари сталь 40Х – сталь 30ХГСА. Фрикційне зміцнення з використанням як технологічне середовище мінерального мастила і ПМР істотно підвищує опір фретинг-корозії. Під час використання мінеральної оливи підвищення становить 1,5 раза, а під час використання ПМР – 1,8 раза порівняно з вихідною парою. Істотно при цьому змінюється коефіцієнт тертя. Під час дослідження незміцненої пари зі збільшенням питомого навантаження коефіцієнт тертя збільшується. Після фрикційного зміцнення з використанням мінеральної оливи тільки за питомого навантаження близько 5 МПа він дещо вищий, аніж у вихідної пари. За збільшення навантаження коефіцієнт тертя зменшується і стабілізується (рис. 2). Зразки після фрикційного зміцнення з використанням ПМР мають найменший коефіцієнт тертя і він фактично не залежить від питомого навантаження у досліджуваному діапазоні. Зменшення коефіцієнта тертя за питомого навантаження 50 МПа після фрикційного зміцнення з використанням як технологічного середовища мінерального мастила і ПМР порівняно з незміцненою парою досягає 1,4 і 1,7 раза відповідно.

Дослідження на фретинг-корозію в оливі МС-20 показали, що зносостійкість трибопар у разі фрикційного зміцнення з використанням як технологічне середовище мінеральної оливи і ПМР збільшилась у 2,6 і 3,4 раза під час роботи в парі з бронзою БрА10Ж4Н4 і у 3,3 і 4,7 раза – зі сталлю 30ХГСА відповідно. Закономірності такі самі, як і під час досліджень без мащення. Слід відмітити, що фрикційно зміцнювали тільки зразки, виготовлені зі сталі 40Х, у загартованому і низьковідпущеному стані, контрзразки були тільки шліфовані.

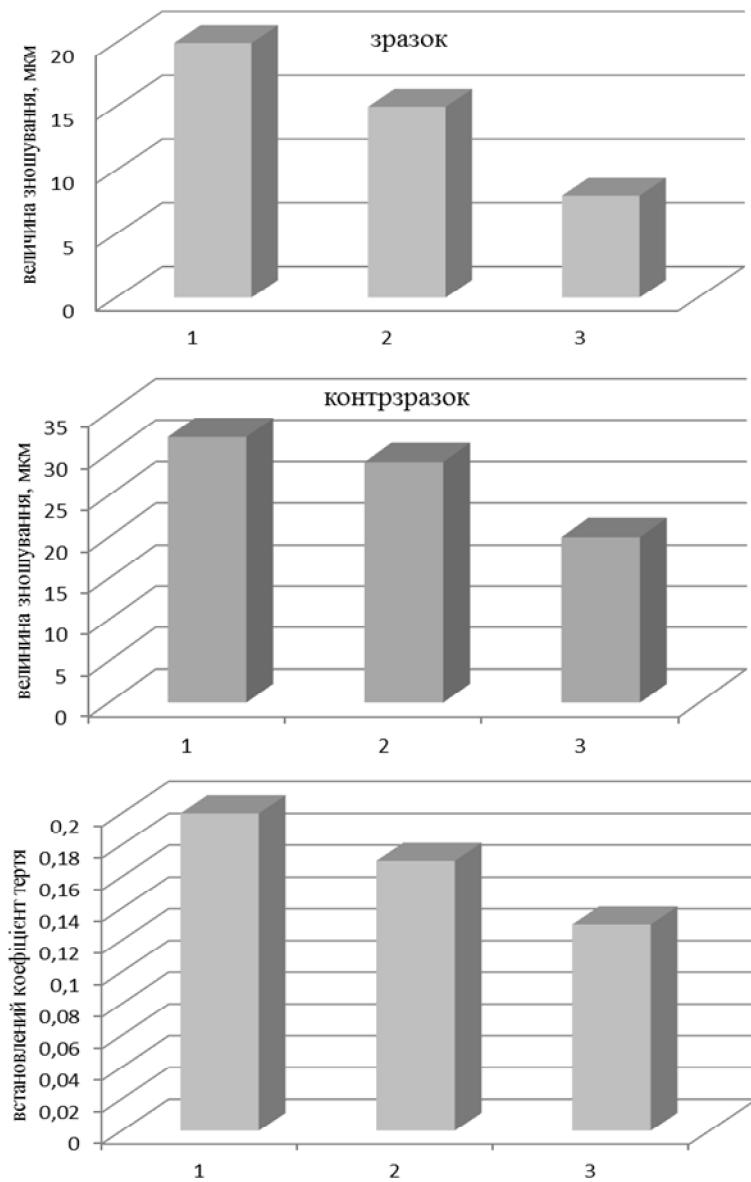


Рис. 1. Величина зношування і встановленого коефіцієнта тертя за фретинг-корозії без мащення пари сталь 40Х (ГНВ) – бронза БрА10Ж4Н4 після фрикційного зміцнення ( $P = 5-55$  МПа;  $A = 100$  мкм;  $n = 30$  Гц): 1 – вихідна структура; 2 – зміцнення в мінеральній оліві; 3 – у ПМР

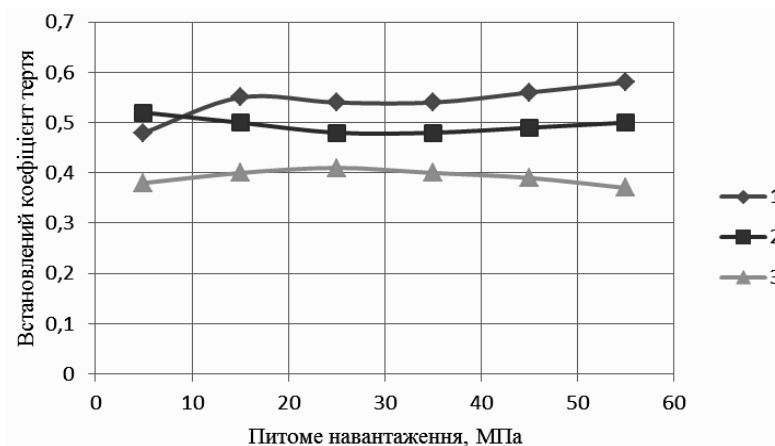


Рис. 2. Залежність встановленого коефіцієнта тертя від питомого навантаження за фретинг-корозії без мащення пари сталь 40Х (ГНВ) – сталь 30ХГСА (ГСВ) після фрикційного зміцнення ( $A = 100$  мкм;  $n = 30$  Гц): 1 – вихідна структура; 2 – зміцнення в мінеральному мастилі; 3 – у ПМР

Процес руйнування за фретинг-корозії можна розділити на три стадії [7]: на першій з них відбувається зміцнення поверхонь контакту і циклічна повзучість підповерхневих шарів, виступи фактичної площі контакту пластично взаємодіють один з одним. Виступи руйнуються внаслідок втоми і зрізаються вузли схоплювання. Продукти зношування складаються переважно з металевих частинок і деякої кількості оксидів. На другій стадії в підповерхневих шарах накопичуються втомні мікроруйнування, на контактних ювенільних поверхнях адсорбується кисень і утворюються оксидні плівки. Швидкість зношування невелика, проходить переважно руйнування утворених на поверхнях тертя оксидних плівок. Кількість продуктів зношування в зоні тертя досягає рівноважного значення, вихід частинок з зони контакту врівноважується їх виникненням. В оптимальних умовах сформованого контакту попередньо зміцнені шари сприймають помірніші циклічні навантаження, у них починає накопичуватися втомна пошкоджувальність. У підповерхневих шарах прогресують втомні явища, які супроводжуються конкуруючими процесами зміцнення і руйнування, з'являються втомні мікротріщини. Об'єм продуктів зношування більший за об'єм зруйнованого металу і за обмеженої можливості їх видалення з зони контакту вони викликають великі локальні тиски. Третя стадія фретинг-процесу пов'язана з кінцевим руйнуванням зон пошкодження, попередньо розрихлених втомними і корозійно-втомними процесами.

Товщина білого шару, отриманого на сталі 40Х під час зміцнення з використанням як технологічне середовище мінеральної оливи, становила 250–270 мкм, а за зміцнення з використанням ПМР – 300–320 мкм. Мікротвердість білого шару становить 9,1 проти 5,3 ГПа основної структури. Кількість залишкового аустеніту у поверхневому шарі досягає 22 %. Густина дислокацій у білому шарі збільшена і становить  $1,8 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$  проти  $0,8 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$  основного металу. Структура зміцненого шару на 2–3 бали дисперсніша від основної структури. Крім того, у поверхневому шарі металу збільшена кількість вуглецю, хрому та інших елементів, які продифундували як з технологічного середовища, так і з-під поверхневого шару. На поверхні завтовшки близько 1 мкм є велика кількість оксидів [5].

Білий шар має вищу твердість та міцність і в той самий час вищу в'язкість, полегшується циклічна текучість приповерхневого шару. Структура його є набагато дисперснішою від структури мартенситу звичайного гартування. Велика кількість дислокацій і дисперсність структури гальмують процеси утворення і росту втомних пошкоджень і мікротріщин. Наявність оксидів на поверхнях тертя сприяє швидшому формуванню якісних вторинних структур, які істотно впливають на процеси, які відбуваються на поверхнях контакту за фретинг-корозії.

Отже, фрикційне зміцнення сталей є ефективним методом підвищення довговічності деталей машин, які експлуатуються в умовах фретинг-процесів.

1. Ляшенко Б.А., Клименко С.А. Тенденции развития упрочняющей поверхностной обработкой и положение в Украине // Сучасне машинобудування. – 1999. – № 1. – С. 94–104. 2. Бабей Ю.И., Бутаков Б.И., Сысоев В.Г. Поверхностное упрочнение металлов – К.: Наук. думка, 1995. – 253 с. 3. Гриднев В.А., Трефилов В.И. Фазовые и структурные превращения и метастабильное состояние в металлах. – К.: Наук. думка, 1988. – 264 с. 4. Гурей І.В. Вплив технологічних середовищ та матеріалу інструменту на параметри фрикційного зміцнення // Машинознавство. – 1998. – № 4. – С. 124 – 129. 5. Гурей І.В., Гурей Т.А., Тихонович В.В. Перерозподіл хімічних елементів під час імпульсного зміцнення // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 1999. – № 1. – С. 122–123. 6. Ткачев В.И., Холодный В.И., Левина И.Н. Работоспособность сталей и сплавов в среде водорода. – Львов: Вертикаль, 1999. – 256 с. 7. Голего Н.Л., Алябьев А.Я., Шевеля В.В. Фреттинг-коррозия металлов. – К.: Техніка, 1974. – 272 с.