

УДК 621.537.611.891(045)

М.М. Свирид, к.т.н., доц.

ВПЛИВ ПОСТІЙНОГО МАГНІТНОГО ПОЛЯ НА ТРИБОЛОГІЧНІ ПАРАМЕТРИ ПАРИ ТЕРТЯ СТАЛЬ–ЛАТУНЬ У ПОВЕРХНЕВОАКТИВНИХ РЕЧОВИНАХ

Проаналізовано ремонтпридатність поверхонь прецизійних пар тертя в середовищах з високим електроопором в умовах тертя. Відпрацьовано модель трибологічного вузла, що визначає умови і закономірності утворення захисних трибологічних плівок. Визначено умови репарації поверхонь тертя трибомагнітним способом та параметри відновлення прецизійних трибопар за безрозбірними технологіями сумісною дією трибоелектрохімічного способу і трибомагнітними складовими.

Maintainability of surfaces of sensitive pairs of friction is analysed in surroundings with high electrical resistance in the conditions of friction. The model of tribological unit, determining conditions and conformities to the law of formation of protective tribological pellicles, is worked out. The parameters of reparation of friction surfaces are determined by a tribomagnetic method. The parameters of renewal of sensitive tribopairs are also defined on uncollapsible technologies by joint influence of triboelectrochemical method and tribomagnetic components.

знос, магніт, магнітне поле, поліетиленгліколь, репарація, топографія, трибоелектрохімічний метод, трибомагнітний метод, трибопара

Вступ

Періодичний ремонт і відновлення пар, що труться, не завжди прийнятна і фінансово виправдана технологічна операція. Ремонтом устаткування, навіть в розвинених країнах, зайнято близько 30 % робітників і приблизно така ж частина верстатного парку.

Велику кількість гідро-, масло- і паливних агрегатів використовують у транспортних та інших машинах.

Знос дотичних поверхонь до 3–4 мкм вважаються неприпустимим, а процес відновлення достатньо трудомісткий (рис. 1).

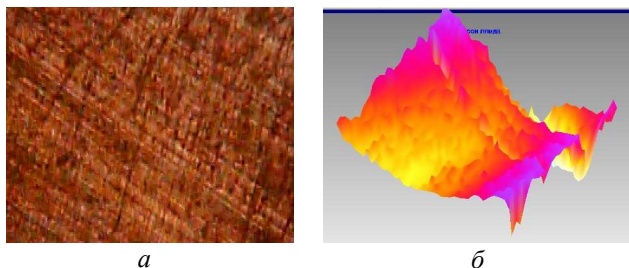


Рис. 1. Поверхня тертя циліндра паливного насоса після експлуатації:

а) робоча поверхня циліндра плунжерного насоса;

б) 3-d характерна профілограма поверхні циліндра паливного насоса 500^x

Аналіз останніх досліджень

Технології відновлення і безсервісного обслуговування все частіше використовують на ремонтних підприємствах.

Найпрогресивнішими методами відновлення є безрозбірні, засновані на технології вибіркового перенесення маси матеріалу.

Робочі поверхні деталей експлуатуються в рідинах, пристосованих для вузлів тертя, в які додаються протиспрацьовувальні присадки. Але всі вони мають великий електричний опір, тому трибоелектрохімічні процеси не реалізуються.

Мета роботи – дослідження механізму утворення захисних плівок для забезпечення трибологічних характеристик плунжерних насосів і визначення параметрів відновлення робочих поверхонь тертя прецизійних пар за безрозбірними технологіями під дією магнітного поля (МП) сумісно з трибоелектрохімічними технологіями.

Механізм репарації прецизійних поверхонь тертя

Однією з найтехнологічніших пожегобезпечних поверхневоактивних речовин (ПАР) та рентабельним реагентом, що змащує, можна назвати поліетиленгліколь ПЕГ-400 з молекулярною масою 400 одиниць та необмеженою розчинністю у воді. Щоб підвищити якість базових компонентів, для розробки масла вибрані ПЕГ з високими антифрикційними і протиспрацьовувальними властивостями, які здатні підвищити ККД черв'ячного редуктора на 15–20 % порівняно з нафтовими маслами [1].

Вплив середовища на трибологічні параметри системи визначається як парою матеріалів, що беруть участь у процесі тертя, так і властивостями робочого середовища. Для дослідження використовували ПЕГ-400 з концентрацією 25, 50 і 75 % у водопровідній воді. Але за концентрації 50 % електроопір досягає 0,5 МОм/м, що значно ускладнює просування іонів між анодом і катодом.

Отже, застосування направленої МП для посилення ефекту переміщення атомів і іонів на поверхні тертя є актуальним.

Вплив МП на трибологічні характеристики феромагнітної сталі 45 у процесі тертя у струмопровідних і в середовищах з високим електроопором достатньо не вивчено. Через добру розчинність ПЕГ у воді проходять процеси сольобілізації з утворенням мікроемulsій з мицел ПАР або глобул макромолекул.

Зі зростанням концентрації макромолекул змінюється їх локалізація в обернених агрегатах, що приводить до модифікації поверхневого шару і впливає на реакційну здатність з'єднань [2].

Вплив МП на трибологічні властивості магнетиків в середовищі ПЕГ вивчалось за модельною схемою, з використанням нейтрального контртіла – скла, що дає можливість виключити вплив електрохімічної складової невід'ємно існуючої під час взаємодії металевих пар тертя у водних розчинах. Крім того, скло – матеріал діамагнітного класу. Це мінімізує вплив дії контртіла в МП.

Параметр магнітної складової взаємодії тільки зі зразком і середовищем, що утворює систему взаємодії двох складових: метал і середовище (враховуючи, що скло практично хімічно нейтральна речовина з абсолютно твердими характеристиками). Для дослідження використовували трибологічний комплекс [3].

Дослідження проводили зі швидкостями 0,1–1 м/с, нормальними навантаженнями 1–5 МПа. Зразком служила сталь 45 в середовищі ПЕГ залежно від напрямку дії неоднорідного постійного МП по скла (рис. 2). Якнайменший знос спостерігається під час розташування зразка напроти полюса N, в середовищі 50 % розчину ПЕГ. Для порівняння аналогічні дослідження, але без магнітного впливу, в 50 % розчині ПЕГ становили 5 мкм/км, що більше в 10 разів. В умовах тертя ковзання без присутності ПЕГ сталі 45 по скла вказує на достатньо великий знос на кожному кілометрі до 19 мкм.

Вплив МП на продукти зносу обумовлюється здатністю утримуватися в зоні тертя з примусовою направленою дією магнітної сили у бік сталевих зразка.

У цьому випадку відбувається не зменшення зносу матеріалу, а сконцентрований розподіл у вигляді конгломератів, прилиплих до поверхні феромагнетика, з подальшим розтиранням тонкодисперсних продуктів між поверхнями контакту.

Величина продуктів зносу характеризує його механізм стирання: якщо продукти зносу до 10 мкм, їх роль полягає в змащуванні поверхонь тертя; якщо ж частинки більші, тоді вони виконують роль абразиву. Технологічно вузол тертя змонтовано таким чином, що контртіло обертається навколо центру, а зразок знаходиться на деякому радіусі, від чого продукти зносу виносяться відцентровими силами в середовище. Розташування зразка в МП навпроти полюса S, характеризується механізмом відштовхувальної дії, де продукти зносу зміщуються від поверхні зразка в бік контртіла (скла) і разом з ним, переміщуючись, виходять із зони дії магніту. У результаті МП активно не впливає на подальше їх існування доти, доки вони не обійдуть по колу і увійдуть в нову фазу дії. Але їх кількість значно менша.

Тому поверхня тертя має тонкий шар намазаного ПЕГ і направлені сліди смуг від тертя. Підвищення концентрації ПЕГ визначає збільшення густої маси на доріжці тертя. Під час концентрації 50 % ПЕГ визначається переломом характеристики зносу, що обумовлено двома складовими:

- мастильні властивості рідини вже достатньо стійкі;
- потужність магніту щільно утримує продукти зносу на площині тертя феромагнетика.

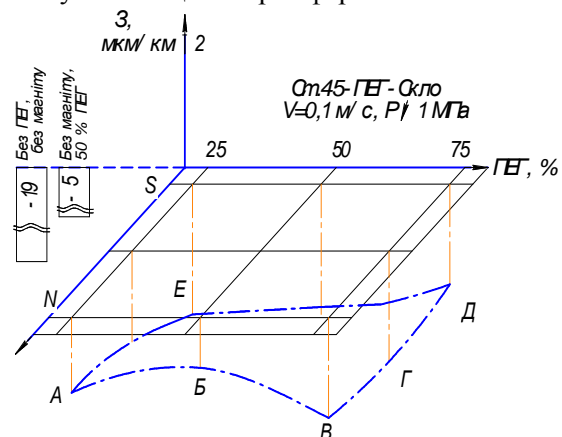


Рис. 2. Характер трибологічної поведінки (зносу) сталі 45 у середовищі ПЕГ-400 під дією МП на скло

Але зі збільшенням густини рідини збільшується сила захоплення мікрочастинок у потік, які зміщуються від направлено діючих ліній МП. При цьому сила впливу МП на них зменшується обернено пропорційно до куба відстані. Тому збільшується відтік продуктів зносу і як результат, спостерігається збільшення зносу по лінії «ВГД» (рис. 2).

За концентрації 75 % поверхня покривається великими молекулами процесу міцелоутворення. Це знижує коефіцієнт тертя до 0,08–0,04. У цьому випадку, враховуючи, що скло має високу твердість і хімічно нейтральне, вважаємо, що в процесі стирання бере участь тільки сталевий зразок. Трибологічні параметри зразка підлягають окиснювальному механізму зношування. Процес утворення і стирання трибологічних плівок характеризують періодичністю зростання протягом 20 хв і їх руйнування триває приблизно 5–10 хв в 25 %-му розчині ПЕГ. Чим вище концентрація ПЕГ, тим складніше проходить процес нарощування захисної трибоплівки.

На рис. 2 визначено робочі параметри пари тертя сталь 45 – скло в умовах тертя ковзання інтенсивного змащування ПЕГ залежно від направленої дії МП. Ділянка досліджуваного діапазону характеризується значним підвищенням зносостійкості порівняно з умовами тертя без магніту. Підвищений опір зносу сталі 45 на полюсі N пояснюють поставкою продуктів зносу на площину тертя сталі нерівномірним постійним МП силою в 100 мТл.

Використовуючи модель пари тертя сталь 45 (зразок) – латунь ЛС59-1 (контртіла), дещо змінюються параметри тертя і характеристики зносу. Пара тертя сталь 45 (загартована на мартенсит) по латуні ЛС59-1 застосовується в механізмах перекачування устаткування паливних і масляних систем. Технологія відновлення поверхонь прецизійних пар за допомогою допоміжного середовища полягає в заміні робочої рідини (масла, палива або гідрорідини) на ПЕГ-400. Застосування ПЕГ для відновлення вузлів тертя обумовлюється його електрохімічними і антифрикційними властивостями.

На підставі досліджень на рис. 3 показано, що у позиції зразка, розташованого над полюсом магніту N трибологічні властивості пари тертя знаходяться в стані репарації, тобто змінюються гравітаційні параметри маси матеріалу в бік підвищення.

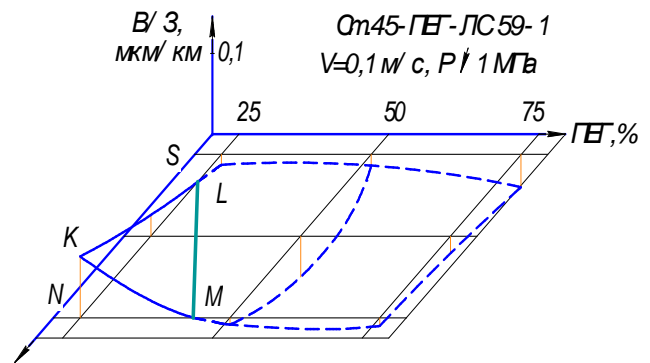


Рис. 3. Характер трибологічної дії (відновлення/ зносу) між сталлю 45 в середовищі ПЕГ під дією МП на латуні ЛС59-1

Отже, відносна зносостійкість матеріалу зразка (рис. 3, позиція N, площина KLM) починає додавати в розмірі за кожний кілометр по 0,1–0,15 мкм, що видно з топографії поверхні тертя сталі 45 і латуні ЛС59-1 (рис. 4, а).

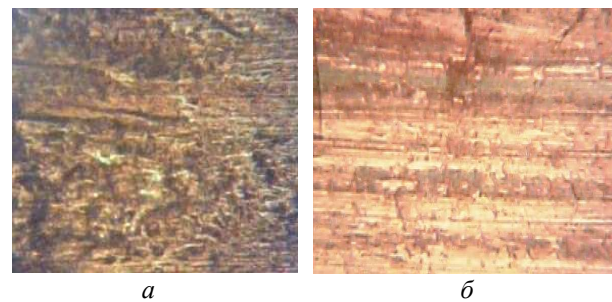


Рис. 4. Характерна топографія поверхонь тертя сталі 45 у позиції N:
а – на латуні ЛС59-1;
б – на полюсі N направлено МП

Утворення якнайтонших плівок на поверхні сталі вказує на перенесення матеріалу латуні, що виражається в потемніннях на поверхні зразка сталі 45 (рис. 4, а). У свою чергу поверхня латуні утворює характерні для неї трибологічні плівки (рис. 4, б).

Найгрубіші поверхневі плівки утворюються на поверхні тертя сталі 45 і латуні у позиції S, що збільшує знос і шорсткість. Виходячи з результатів тертя, характеристика топографії поверхні у позиції S погіршується до шорсткості $Ra = 10 \dots 15$ мкм від $Ra = 2 \dots 4$ мкм на полюсі N. Результати дослідження вказують на можливості використання дії направлено МП для відновлення поверхонь тертя трибомагнітним способом.

Рух рідини провокує відтік продуктів зносу. Чим більше продуктів зносу, тим легше їх забрати із зони тертя.

Найменшою частинкою в рідині, що рухається, є іон металу, він має електричний заряд, тому буде керуватися МП. Виходячи з фізико-хімічних властивостей металів, у зону тертя необхідно подавати дрібні частинки, щоб вони не підкорялися механічному руху рідини.

Найтехнологічніший спосіб отримати іони – це електрохімічний. А технології відновлення прецизійних пар тертя вимагають комплексного підходу для забезпечення процесів перенесення матеріалу в середовищах з високим електроопором, тому трибоелектрохімічна методика найбільш прийнятна.

Впровадження технології трибомагнітного керування переміщенням продуктів, що використовують, спільно з трибоелектрохімічними процесами анодного розчинення змінюють стан системи відновлення трибовузла, забезпечуючи параметри поверхневого механізму репарації.

Поставлене завдання вирішується шляхом направленої дії МП на електронну або іонну масу матеріалу, що виділився з допоміжного електроду (анода) в робочу речовину дією трибоелектрохімічної технології.

Технологічно процес відновлення проведений за такою схемою:

- зразок сталі 45 підключали до катоду за електросхемою [4];
- до допоміжного електроду виготовленого із сплаву ЛС59-1 підключали додатну клему випрямляча;
- контртілом використовували латунь ЛС59-1 (катод);
- реагентом переносником служив ПЕГ;
- магнітне поле направляли так, щоб лінії перпендикулярно перетинали площу тертя.

Трибологічні характеристики моделі в середовищі ПЕГ підлягають механізму гідродинамічного тертя і лише в місцях тертя ковзання в результаті деформаційних спотворень поверхні спостерігають умови проходження процесу відновлення. Поверхневоактивна речовина ПЕГ-400 є хорошим переносником атомів матеріалу анода (відновника), за рахунок приєднання до одного з ланцюгів радикала ПЕГ вільного іона металу, який під дією роботи трибосистеми, осідає на дефектах кристалічних ґрат (особливо лінійних), що виходять на поверхню тертя.

Для посилення протікання процесу репарації в умовах тертя ковзання в рідинах з високим питомим електроопором, стає необхідним задіювати трибоелектрохімічний механізм, щоб

отримати об'ємну масу іонів і атомів необхідного матеріалу від допоміжного анода під час переміщення її на катод деталі.

Електронна маса матеріалу утворюється під дією електрохімічного потенціалу на аноді-донорі примусовою дією направленою МП, переміщається до катода-деталі, в зону насичення поверхні тертя. У процесі тертя іони матеріалу-відновника (анода) під дією направлених ліній МП з індукцією 0,1 Тл переміщуються на поверхню тертя, розташовану перпендикулярно вектору магнітних ліній і знаходяться в зоні полюса *N*. Найтонші продукти зносу переміщуються на поверхню феромагнітного матеріалу зразка згідно з вектором спрямованості силових ліній магніту. Методично зразок-катод і анод розташовували так, щоб набігаючий потік електролітичної рідини з анода відразу потрапляв на катод, роль якого виконує феромагнітний зразок сталі 45 і контрзразок з латунного сплаву ЛС59-1 – діамагнетик. Магніт розташовували так, щоб направлені магнітні лінії утримували продукти зносу, а набігаючий потік рідини захоплював і зміщував їх до поверхні тертя.

На рис. 5 показаний графік зміни трибологічних параметрів тертя сталі 45 по латуні ЛС59-1 в середовищі ПЕГ залежно від його концентрації і напрямку МП.

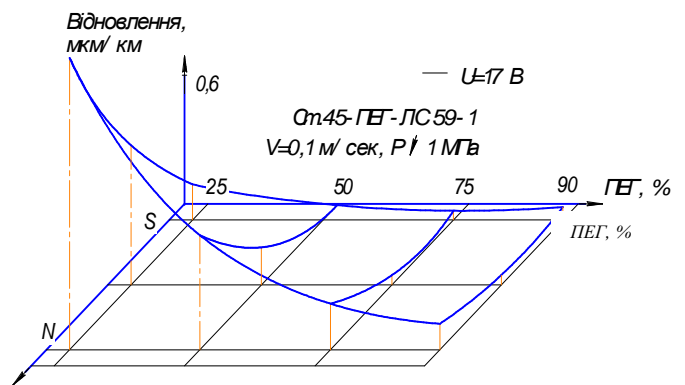


Рис. 5. Зміна трибологічних параметрів (відновлення) на поверхні тертя сталі 45 по латуні ЛС59-1 у середовищі ПЕГ під дією направленою постійного МП

Сумісна дія трибоелектрохімічної і трибомагнітної технологій відновлення поверхонь тертя вказує на активний зсув стану системи в бік репарації.

Силове поле магніту переміщує продукти зносу на зразок в зоні полюса *N*. Найбільший лінійний приріст катода феромагнітного матеріалу зразка сталі 45 при концентрації ПЕГ 25 % у водному розчині спостерігається на полюсі *N*.

Електричні показники характеризувалися достатньо великим струмом (до 10–25 mA) і напругою 17 В за схеми підключення анода (допоміжного електроду ЛС59-1) і катодної пари, що складається зі зразка (сталь 45) і контртіла (латунь ЛС59-1). Підвищення концентрації ПЕГ до 50 % характеризується пониженням умов репарації як в зоні полюса *N*, так і полюса *S* (рис. 5). Подальше збільшення густини розчину до 75–95 % характеризується незначним збільшенням розміру феромагнітного зразка зі сталі 45. Одночасно знижується коефіцієнт тертя до 0,08–0,05. Застосування допоміжного електроду зі сплаву ідентичного матеріалу контртіла прискорює процес репарації поверхні тертя сталевого зразка – катода. Характерні поверхні після тертя в режимі утворення трибослоя показано на рис. 6.

Ураховуючи вплив направленої МП в поверхнево активному середовищі ПЕГ на умови утворення захисних плівок, розроблена технологія, що підвищує працездатність механізму репарації поверхневих шарів тертя в прецизійних агрегатах, що перекачують масло, і паливних помпах.

Реальні агрегати мають значну шорсткість поверхні (рис. 1). Характеристики топографії поверхні циліндра після напрацювання коливаються в межах 2,5–6 мкм на діаметрі циліндра 10 мм. На ділянках переходів спостерігаються западини до 6 мкм. Поверхня поршня значно перевершує за чистотою циліндр, на робочих ділянках топографія нерівностей не перевищує 1,5–2 мкм.

Технологічної уваги заслуговують подряпини на поверхні ще в процесі виготовлення деталі.

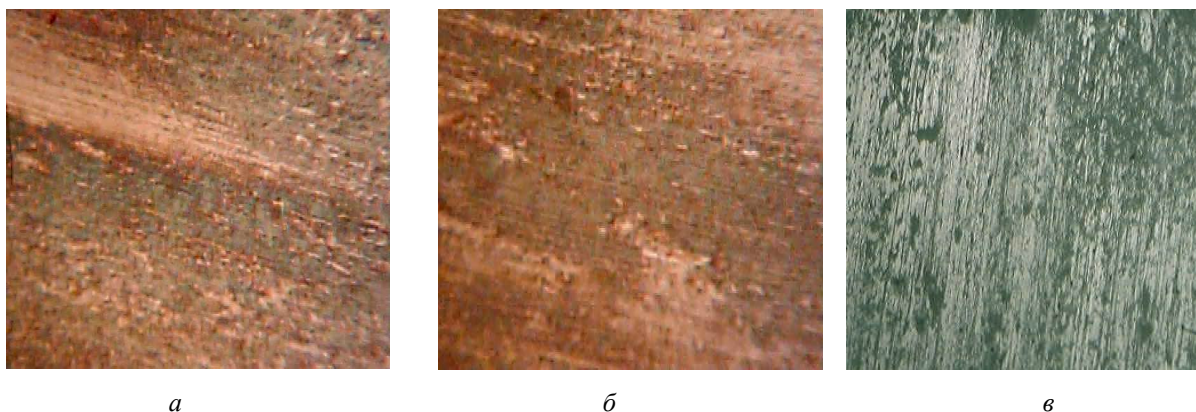


Рис. 6. Поверхня тертя на сталі 45:

a – за 50 % ПЕГ на полюсі *N*;

б – на ділянці *S* за 25 % ПЕГ;

в – поверхня тертя в ПЕГ 95 % на полюсі *N*

Зі збільшенням концентрації ПЕГ збільшується опір електромережі, від чого знижується струм, а зниження струму завжди зменшує енергетичну складову електрохімічного процесу, сильно гальмуючи умови переміщення іонів і електронів у робочій рідині.

Досліджуючи показники зносостійкості на сталевих зразках, одержуємо підвищення масового і лінійного градієнта. На поверхні сталі спостерігаються утворення трибозахисної плівки як на полюсі *N* (рис. 6, *a*), так і на полюсі *S* (рис. 6, *б*).

Велика концентрація ПЕГ помітно змінює топографію поверхні, утворюючи темні плями в середовищі ПЕГ з концентрацією доставки 95 % (рис. 6, *в*).

Такі недоліки можуть дряпати поверхню циліндра, оскільки поршень виготовляється звичайно з вуглецевої сталі з подальшою термічною обробкою на мартенсит. Величина включень коливається в межах 4 мкм, причому це можуть бути як виступи, так і западини.

Змащувальним середовищем з високим електроопором використовували індустриальне масло И20-А.

Застосування допоміжного електроду обумовлювалося подібністю матеріалів катода, тому використовували сплав ЛС59-1.

Після напрацювання пари тертя під впливом трибоелектрохімічного спільно з трибомагнітним способами вивчали хімічний склад поверхні тертя сталі на латунному контртілі (ЛС59-1) (рис. 7).

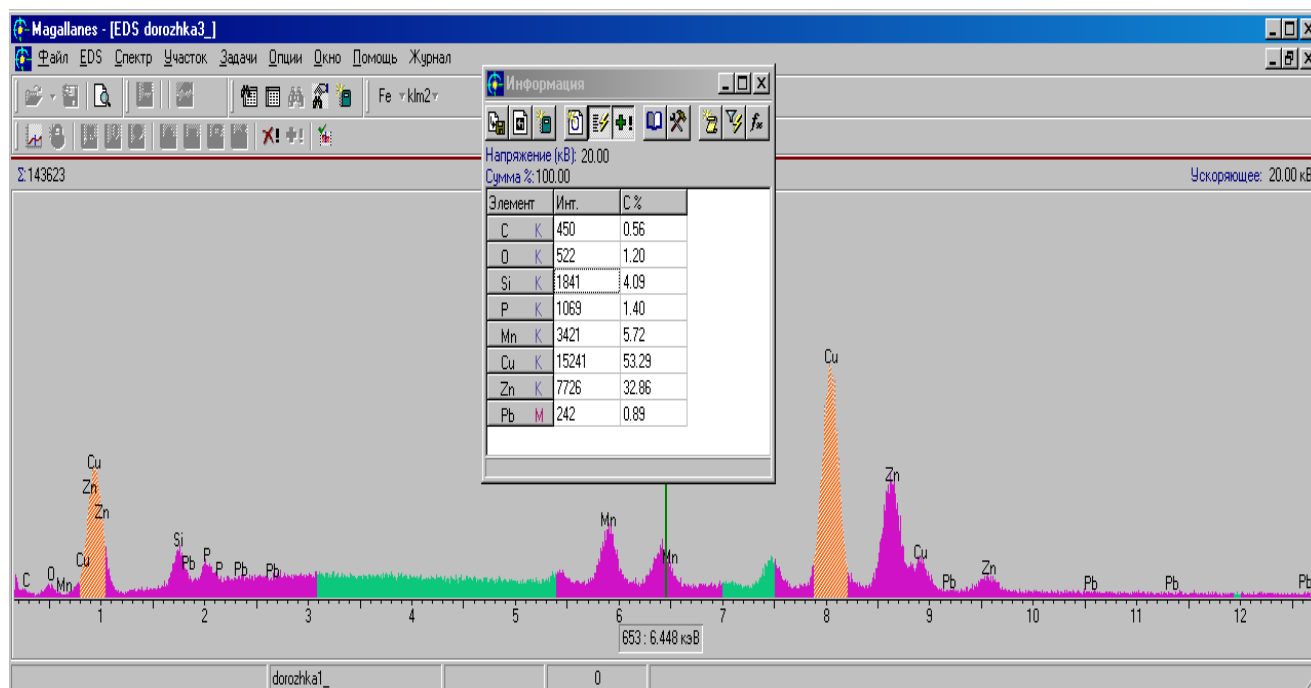


Рис. 7. Хімічний склад напрацьованої поверхні латуні в середовищі І20-А (струм – 0,19 А, напруга – 17 В)

На поверхні тертя сталі спостерігається значне перенесення елементів латуні (міді і цинку) в місцях найбільшого скупчення продуктів зносу (рис. 8).

Трибоелектрохімічні параметри найприйнятніші для відновлення за 17 В напруги (робочий струм 0,19 А на робочій площі зразка приблизно 0,06 см²).

Процес відновлення проводили на полюсі магніту *N*. При цьому склад на поверхні плівки збіднів вмістом кисню більш ніж в два рази до 1,2 % порівняно з початковою поверхнею (рис. 7). Напрацьована поверхня латуні більш ніж на 90 % покривається оксидною плівкою (рис. 8).

Наявність захисної трибологічної плівки змінює енергетичний стан вузла тертя до умов репарації. Така технологія відновлення захищена патентом на корисну модель [5].

Отже, в заявленому способі відновлення поверхні тертя проходить за рахунок іонів металів (допоміжного електроду – анода) тих, що знаходяться в середовищі масла (І20-А), направлених під дією МП на зразок (катод), який під час тертя знаходиться напроти полюса *N* постійного магніту з нерівномірним

розподілом силових ліній. Топографія поверхні тертя (рис. 8) набуває значного класу чистоти, а відпрацьована методика дозволяє проводити операції відновлення без розбирання агрегатів в масляній і паливній системі з використанням їх робочих рідин. Хімічний склад поверхневих трибологічних плівок відновлених за допомогою допоміжного електроду з латунного сплаву має зносостійкі властивості.

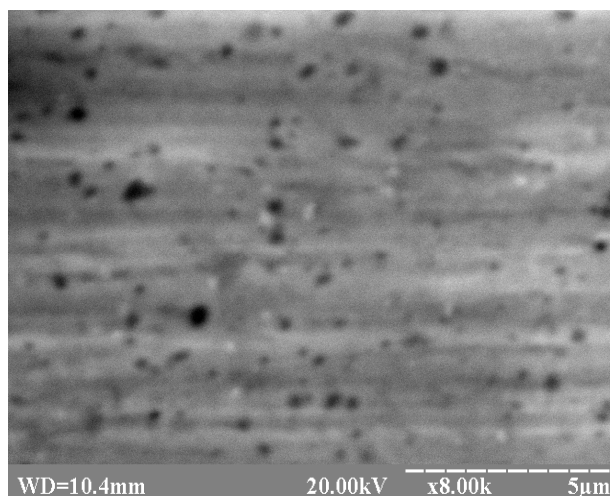


Рис. 8. Топографія поверхні тертя латуні на полюсі *N* в середовищі І20-А

Висновки

Результати аналізу отриманих даних згідно з трибологічними процесами, що проходять на поверхні тертя, показали, що напрям силових ліній МП до поверхні тертя значно змінює стан робочого вузла.

Визначено технологічні характеристики поверхні тертя, що розташована у полюса N для зсуву процесу репарації феромагнітних матеріалів. Вивчено механізм трибоелектрохімічної і трибомагнітної репарації вузлів тертя феромагнітних матеріалів.

Розроблено новий метод відновлення поверхонь тертя прецизійних пар трибомагнітним спільно з електрохімічними методами, що збільшує інтенсивність відновлення. Визначено параметри відновлення парамагнітних і діамагнітних матеріалів.

Література

1. *Стерхов А.В.* Улучшение эксплуатационных характеристик червячных редукторов путем применения масел на основе полиэтиленгликолей / А.В. Стерхов, Л.Н. Багдасаров // Проблема совершенствования технологии производства и улучшения качества нефтяных масел: Сб. тр.: – М.: Нефть и газ, 1996. – С. 195–198.
2. *Коллоидные свойства и каталитический эффект мицеллярных систем и микроэмульсий в присутствии полимеров* / А.Р. Ибрагимов, Д.Б. Кудрявцев, Л.Я. Захарова и др. // Структура и динамика молекулярных систем. – К.: КГУ, 2003. – Вып. X, Ч. 2. – С. 99–102.
3. *Свирид М.М.* Комплекс для дослідження трибологічних параметрів вузла тертя / М.М. Свирид, В.Г. Парашанов, А.В. Онищенко // Проблеми тертя та зношування: наук.-техн. зб. – К.: НАУ, 2006. – Вип.45. – С.54–62.
4. *Мониторинг трибологических характеристик в полиэтиленгликоле* / М.Н. Свирид, В.Г. Парашанов, Л.Б. Приймак, А.Л. Шевченко // Проблеми тертя та зношування: наук.-техн. зб. – К.: НАУ, 2007. – Вип.48. – С.111–117.
5. *Патент* на корисну модель № 36601, G01N 3/56, 27.10.2008, Бюл. № 20, 2008 р.

Стаття надійшла до редакції 07.09.09.