

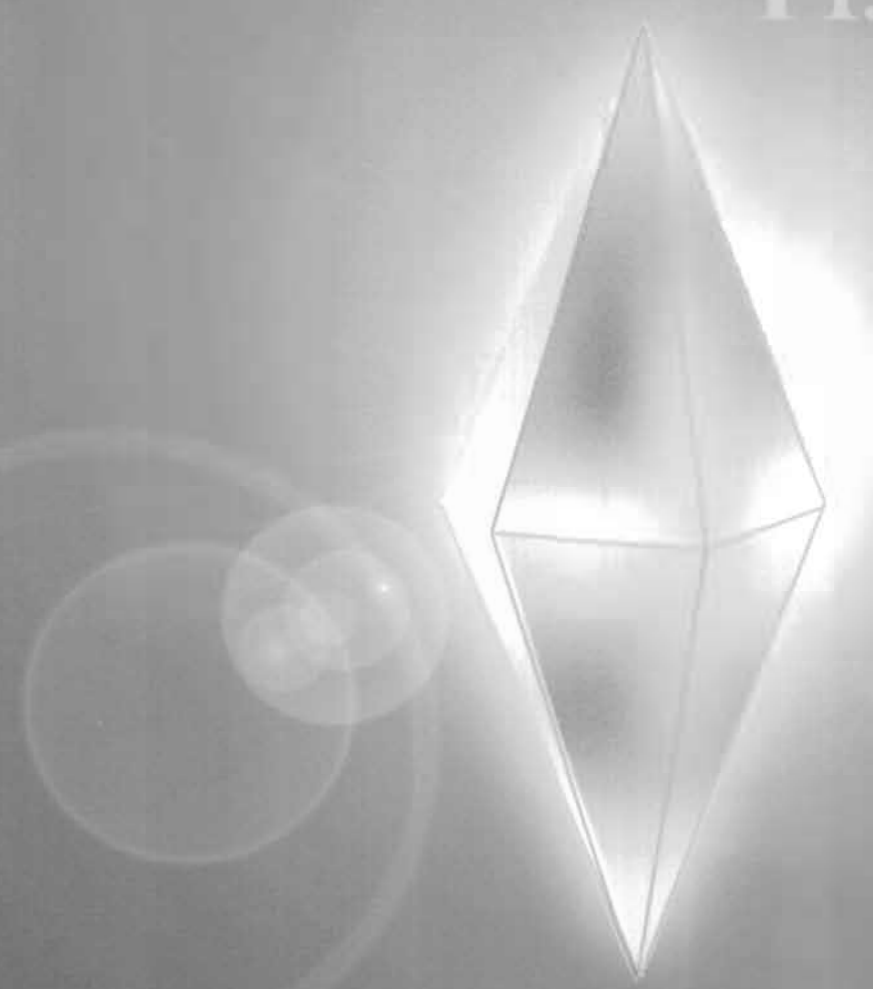
Ф — Фізика і  
Х — хімія  
Т — твердого  
Т — тіла

№ 1

2009

Том  
Vol. 10

P — Physics and  
C — Chemistry of  
S — Solid  
S — State



Міністерство освіти і науки України  
Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника  
Фізико-хімічний інститут  
Асоціація „Вчені Прикарпаття”  
Люблінський технічний університет (Польща)

Ministry of Education and Science of Ukraine  
‘Vasyl Stefanyk’ Precarpathian National University  
Physical-Chemical Institute  
Association “The Scientists of the Precarpathian”  
Lublin Technical University (Poland)

ISSN 1729-4428

## ФІЗИКА І ХІМІЯ ТВЕРДОГО ТІЛА

## PHYSICS AND CHEMISTRY OF SOLID STATE

№ 1  
2009  
Том 10  
Vol. 10

Журнал “Фізика і хімія твердого тіла” визнаний Рішенням ВАК України № 2-05/9 від 14.11.2001  
фаховим виданням із фізико-математичних, хімічних та технічних наук

Рекомендовано до друку Вченою радою Прикарпатського національного університету  
імені Василя Стефаника

Свідоцтво про державну реєстрацію  
КВ № 3816 від 30.11.1999

Certificate of State Registration  
KB No. 3816 from 30.11.1999

Передплатний індекс: 22938

Subscription index: 22938

© Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника, 2007  
Фізико-хімічний інститут, 2007

Адреса редакції:  
Прикарпатський національний університет,  
вул. Шевченка, 57,  
Івано-Франківськ,  
76000, Україна

Editorial address:  
Precarpathian National University,  
57, Shevchenko Str.,  
Ivano-Frankivsk,  
76000, Ukraine

Тел.: +380 (342) 50-37-52  
Факс.: +380 (3422) 3-15-74  
E-mail: [fcss@pu.if.ua](mailto:fcss@pu.if.ua)  
[http://www.pu.if.ua/inst/phys\\_che/start/pcss](http://www.pu.if.ua/inst/phys_che/start/pcss)

Tel.: +380 (342) 50-37-52  
Fax.: +380 (3422) 3-15-74  
E-mail: [fcss@pu.if.ua](mailto:fcss@pu.if.ua)  
[http://www.pu.if.ua/inst/phys\\_che/start/pcss](http://www.pu.if.ua/inst/phys_che/start/pcss)

Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника  
Фізико-хімічний інститут  
Асоціація „Вчені Прикарпаття”  
Люблінський технічний університет (Польща)

Науковий журнал  
“Фізика і хімія твердого тіла”

**РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ**

**ГОЛОВНИЙ РЕДАКТОР**

Фреїк Д.М. (д.х.н. Івано-Франківськ, Україна)

**РЕДАКТОРИ**

Миرونюк І.Ф. (д.х.н. Івано-Франківськ, Україна)

Остафійчук Б.К. (член-кор. НАНУ, Івано-Франківськ, Україна)

Рувінський М.А. (д.ф.-м.н., Івано-Франківськ, Україна)

**ЧЛЕНИ РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ**

Ащеулов А.А. (д.т.н., Чернівці), Борисова А.Л. (д.т.н., Київ), Галушак М.О. (д.ф.-м.н., Івано-Франківськ), Гладшевський Р.Е. (д.х.н. Львів), Гладких М.Т. (д.ф.-м.н., Харків), Давидюк Г.Є. (д.ф.-м.н., Луцьк), Дмитрук М.Л. (д.ф.-м.н., Київ), Зінченко В.Ф. (д.х.н., Одеса), Ігнатенко П.І. (д.ф.-м.н., Донецьк), Кіндрачук М.В. (д.т.н., Київ), Лакомський В.Й. (член-кор. НАНУ, Київ), Мельник П.І. (д.т.н., Івано-Франківськ, Україна), Неділько С.А. (д.х.н., Київ), Новосядлий С.П. (д.т.н., Івано-Франківськ), Олексюк І.Д. (д.х.н., Луцьк), **Панченко О.А.** (д.ф.-м.н., Київ), Панчук О.Е. (д.х.н., Чернівці), Переш Є.Ю. (д.х.н., Ужгород), Проценко І.Ю. (д.ф.-м.н., Суми), Раренко І.М. (д.ф.-м.н., Чернівці), Сизов Ф.Ф. (член-кор. НАНУ, Київ), Сіренко Г.О. (д.т.н., Івано-Франківськ), Стасюк З.В. (д.ф.-м.н., Львів), Томашик В.М. (д.х.н., Київ), Фодчук І.М. (д.ф.-м.н., Чернівці), Чуйко Г.П. (д.ф.-м.н., Херсон), Шийчук О.В. (д.х.н., Івано-Франківськ), Штеменко О.В. (д.х.н., Дніпропетровськ)

**МІЖНАРОДНА РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ**

**ГОЛОВА МІЖНАРОДНОЇ РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ**

Фреїк Д. (Україна)

**РЕДАКТОРИ МІЖНАРОДНОЇ РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ**

Вуйцік В. (Польща)

Сукач Г. (Україна)

**ЧЛЕНИ МІЖНАРОДНОЇ РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ**

Анатичук Л. (Україна), Булавін Л. (Україна), Волков С. (Україна), Грігоніс А. (Литва), Гупта А. (Індія), Гуревич Ю. (Мексика), Жуковські П. (Польща), Зломанов В. (Росія), Калінкін І. (Росія), Кішімото Н. (Японія), Литовченко В.Г. (Україна), Мазуренко Є. (Україна), Мачулін В. (Україна), Міттова І. (Росія), Мовчан Б. (Україна), Находкін М. (Україна), Перрі А. (Швейцарія), Півін Ж.-К. (Франція), Фістуль В. (Росія), Шпак А. (Україна)

**ВІДПОВІДАЛЬНІ СЕКРЕТАРІ**

Кланічка В.М. (к.ф.-м.н., Івано-Франківськ)

Соколов О.Л. (Івано-Франківськ)

**ТЕХНІЧНИЙ РЕДАКТОР**

Пасічняк В.Ф. (Івано-Франківськ)

М.М. Свирид, С.М. Занько, С.М. Задніпровська, В.І. Закієв

## Моніторинг трибологічних властивостей сталі 3 в магнітному полі

*Національний авіаційний університет,  
03058, м. Київ, пр. Космонавта Комарова, к. 10*

В статті розглядається питання експериментального дослідження дії направленою магнітного поля на вид тертя за умов ковзання без змащування. Визначено зв'язок трибологічних характеристик сталі в залежності від зміни направлення силових магнітних ліній через площину тертя.

*Стаття поступила до редакції 25.01.2008; прийнята до друку 15.12.2008.*

### Вступ

Безвідмовність – властивість об'єкту безперервно зберігати працездатність на протязі деякого часу або деякого напрацювання (ГОСТ 13377-75). Умови безвідмовності трибологічних систем забезпечуються самоорганізацією поверхонь тертя їх моніторингом та своєчасним відновленням працюючого вузла тертя для передбачених конструкторами умов.

Зношування деталі в вузлі тертя – це енергетичний дисбаланс трибологічної системи, забезпечити збалансовану роботу термодинамічно можливо, створивши умови стабілізації її стану. Існує багато методик відновлення поверхні, але всі потребують розбирання механізму, доволки його до проектних розмірів, складання, налагодка. Такий шлях достатньо довгий і трудомісткий, не кажучи вже про затрати.

Застосування магнітних змащувачів і присадок підвищує фрикційні якості вузла тертя, але відновлюючих якостей не надає [1].

Магнітні характеристики різних матеріалів неоднозначно супроводжують матеріал в силовому полі магніту. Сплав заліза з вуглецем на рівні 0,3% відноситься до слабо – магнітних матеріалів, і має магніто - м'які властивості. Для кожного феромагнетика існує певна температура (температура в точці Кюрі у заліза вона складає 770°С), вище якої феромагнітні властивості зникають, і речовина стає парамагнетиком. Трибологічні параметри відносного переміщення поверхонь спроможні створити умови переходу, сплаву заліза з вуглецем, і зміни магнітних властивостей останнього в процесі напрацювання. Що буде впливати на рух зношений частинок які знаходяться в зоні тертя?

*Мета даної роботи:* Провести моніторинг трибологічних параметрів механізму зношування сталі 3 під впливом магнітного поля.

### І. Постановка проблеми

Молекулярно-механічна теорія тертя (адгезійно-деформаційна) побудована на основі визначеної заздалегідь заданої моделі контактуючих поверхонь твердих тіл. По І.В. Крагельському, тертя обумовлюється, з одного боку, деформуванням матеріалу, що впроваджується в нерівності (деформаційна складова сили тертя, механічна складова сили тертя), а з іншого боку – подоланням молекулярних (адгезійних) зв'язків в зоні контакту (молекулярна складова сили тертя), тобто утворенням і руйнуванням фрикційних зв'язків. Останнє може мати механічний (пружне відштовхування, мікрорізання) і молекулярний (порушення молекулярних зв'язків на поверхні або в глибині тіла) характер, що сприяє відокремленню мікрочастинок матеріалу з поверхні і знаходиться у звищеному стані у зоні тертя. Враховуючи, що зона взаємодії поверхонь, практично завжди, знаходиться під дією змащувального матеріалу, яким може бути олива, пальце чи перскачуючи речовина.

Підвищення змащувальної здатності дизельного палива досягається введенням в нього присадки. Оксид заліза, що входить в міцелу, характеризується низьким опором зсуву і є пластичним змащуванням, що зменшує коефіцієнт тертя і інтенсивність зносу поверхонь в місцях їх дотикання. Молекули олеїнової кислоти, що входять в склад міцели, запобігають їх злипанню і дають можливість їх знаходження у зваженому стані в рідині. Оксид заліза  $Fe_3O_4$  (магнетит) має характеристики: молекулярна маса 231,54; колір – темно-червоний; щільність 5,11 г/см<sup>3</sup>. Довжина молекули олеїнової кислоти 2 нм. Середня величина міцели складає 10 нм. Присадка призначена для роботи в слабких магнітних полях. Основа міцели являє собою молекули твердого пластичного

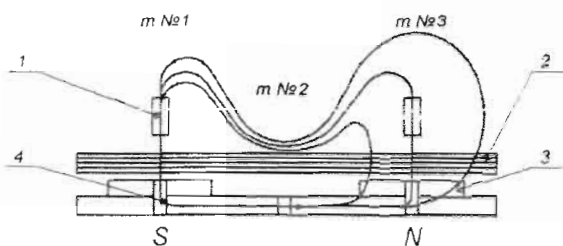


Рис. 1. Схема проходження магнітних силових ліній через стальний зразок: 1 – зразок, 2 – скло, 3 – магніт, 4 – отвір.

змащування оксиду заліза, а оточуючі молекули є олеїною кислотою з вмістом речовини в присадці, мас. %:  $Fe_3O_4$  – 0,00001,  $C_{18}H_{34}O_2$  – 0,0001, дизельне паливо – до 100. [2]

Під впливом магнітних полів магнітні частинки стають «буксирами» нанорозміру, які тягнуть і штовхають відносно великі міцели колоїдної речовини. Більш того, можна змінювати напрям, регулюючи взаємодію між магнітним полем перехоплювача і зовнішнього джерела. В перехоплювач додали рідину з магнітними наночастинками оксиду заліза (розміри кожної частинки – близько десяти нанометрів). В таку ферорідину ввели мікроскопічні немагнітні намистинки латекса, розміром від 90 до 5000 нанометрів. Механізм створення магнітних частинок дозволяє, маніпулюючи за допомогою зовнішнього магнітного поля, управляти наночастинками оксиду заліза [3].

Низьковуглецеві сталі в елементарному вигляді являють собою типові магнітом'які матеріали, магнітні властивості яких істотно залежать від вмісту домішок. Серед елементарних феромагнетиків залізо має найбільшу індукцію насичення (близько 2,2 Тл). Найбільшу концентрацію іонів двохвалентного заліза і, відповідно, найменший питомий опір має магнетит  $Fe_3O_4$  (ферит заліза), у якого  $\rho = 5 \cdot 10^{-5} \cdot \text{Ом} \cdot \text{м}$ .

Окислювальне зношення (ГОСТ 16429-70) – зношення при наявності на поверхнях тертя захисних плівок, що утворилися в результаті взаємодії матеріалу з киснем або окислювальним середовищем. В загальному інтенсивність окислювального зношення невелика, але в деяких випадках, наприклад, в середовищі рідкого кисню, вона може бути дуже високою, за рахунок швидкого окислення металу. Такий підхід провокує матеріал, що відокремився з поверхні, вступити в реакцію з навколишнім середовищем з утворенням різних сполук, що відрізняються від початкового матеріалу.

Установлено, що зміна магнітної взаємодії в різних середовищах неоднозначна. Під дією постійного магнітного поля на речовину і матеріал, які попадають під його спрямовані магнітні лінії, що характеризуються властивостями матеріалу одна з яких є магнітна проникність, а її напрям і сила буде діяти на зону збудження між двома поверхнями, що труться. Магнітні властивості речовин визначаються магнітними властивостями атомів чи елементарних частинок (електронів, протонів і нейтронів), що входять в склад атомів. Встановлено, що магнітні властивості протонів і нейтронів майже в 1000 разів

слабше магнітних властивостей електронів. Однією з найважливіших властивостей електрона є наявність у нього не тільки електричного, але і власного магнітного поля – спина. Електрон створює магнітне поле також і за рахунок орбітального руху навколо ядра, яке можна порівняти з коловим мікрострумом. Спінні поля електронів і магнітні поля, обумовлені їх орбітальними рухами, і визначають широкий спектр магнітних властивостей речовин.

## II. Методика експериментальних досліджень

Експеримент поставили таким чином, щоб площа тертя прошивалась магнітними лініями по задалегідь обраному напрямку.

Дослідження проводили на трибологічному комплексі [4] по схемі контакту площа – палець, швидкість відносного переміщення поверхонь складала 0,2 м/сек, навантаження 10 кг/см<sup>2</sup>, середовище – повітря. Зміни на поверхні тертя фіксувалися веб – камерою.

Вплив магнітного поля здійснювали двохолюсним магнітом з магнітною індукцією 100 мТл, в точці дії на зразок, з неоднорідним розташуванням силових ліній. Технологічно магніт розміщено між площиною тертя на оптичній вісі мікроскопа. Схема проходження магнітних силових ліній показана на рис. 1. Розташування зразка в точці № 1 або № 3 здійснювали таким чином, щоб силові магнітні лінії перетинали площину тертя перпендикулярно, а в точці № 2 лінії будуть проходити паралельно. Необхідно відмітити, якщо матеріал зразка магнітний, то на ньому будуть збиратися магнітні силові лінії. Що, значно підвищить магнітне поле. Налаштування вузла тертя здійснювалась по променю світла спрямованого від мікроскопу, розташованого нижче магніту 3, і через отвір 4 відбивається від поверхні тертя зразка 1 і повертається в мікроскоп. Далі промені проєктуються в веб - камеру з подальшою обробкою на комп'ютері за допомогою стандартної програми. Зносостійкість фіксували зважуванням після кожного напруження на вагах з точністю 0,0001г.

## III. Результати і аналіз експериментальних даних

Характер тертя в кожній зоні магнітного поля істотно відрізняється, вплив напрямку магнітних ліній кардинально змінюють умови і механізм тертя. Початковим передвісником умов роботи в трибосистемі будь-якого механізму є зміна коефіцієнта тертя. В точці №1 величина коефіцієнта тертя складає 0,2...0,3. Поверхня тертя підпорядковується законам молекулярно – механічної теорії тертя (адгезійно-деформаційній).

На поверхні тертя сталі 3 видно мілкі сліди утворення окисних плівок. Частинки зношеного металу

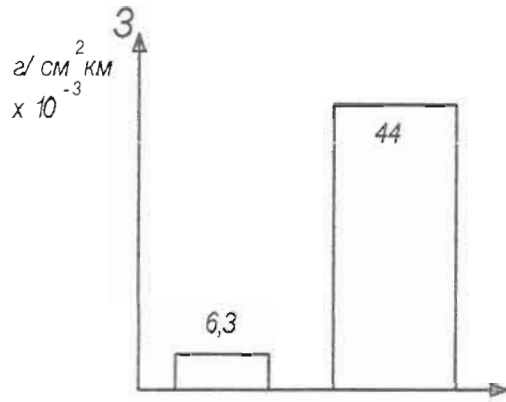


Рис. 2. Зношування сталюого зразка в магнітному полі по склу.

залишаються на поверхні і тут же прилипають, магнітне поле не дає можливості їм розсіятися. Прилиглі частинки, під дією механічного розтирання, окислюються і розмазуються по поверхні в зоні тертя рис. 3.а. За рахунок чого змінюється механізм тертя на окислювальний, підвищуються трибологічні характеристики вузла тертя, що становить зносостійкість трибовузла на рівні  $6,3 \times 10^{-3}$  г/км<sup>2</sup>см<sup>2</sup> рис. 2. Відповідне контртіло – скло, залишається

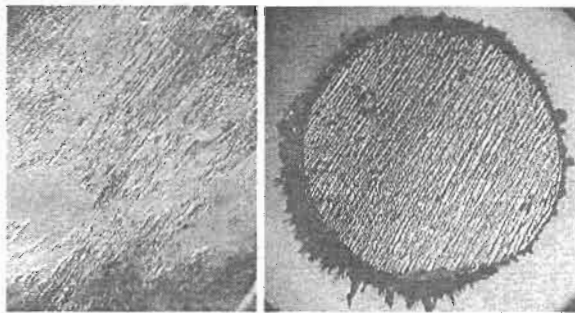


Рис. 3. Топографія поверхні тертя зразка з сталі 3: а) з напрямом магнітного поля N->S т. № 1, б) за напрямом S->N магнітного поля в т. № 3.

практично без слідів зношування, як металу так і скла, за рахунок поганої адгезії металу на поверхню скла. Характеристики поверхні на рис. 4.а., і характер профілограми рис. 5 вказує на тонкі сліди металу на склі с висотою рельєфу до 1 мкм.

Зовсім інший механізм тертя спостерігається в точці №3. Коефіцієнт тертя змінювався в межах від 0,7 до 0,9, а характеристика топографії поверхні підлягає абразивному механізму зношування рис.3б. Поверхня зразка має грубу доріжку тертя, яка характеризується достатньо великим приведеним зносом, до 0,044 г/км<sup>2</sup>см<sup>2</sup> рис.3. Суміжня поверхня тертя – скло, характеризується суцільною оксидною плівкою з металу рис. 5б, що вказує на потужній окислювальний механізм зношування.

Поверхня скла вкрита металевою лузкою, що перенесена з зразка, яка в наступному акті тертя утрамбовується і розмазується по поверхні під дією сили тертя. Намагнічені металеві частинки, відірвавшись від сталюого зразка, утримуються в зоні тертя магнітним полем, розташувались навколо зразка. Процес напрацювання проходить послідовно. Перший етап методом намазування тонкого

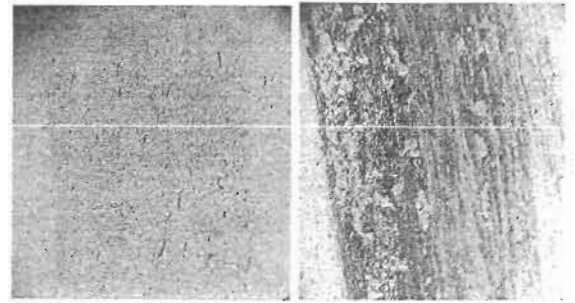


Рис. 4. Топографія поверхні тертя на склі сталлю 3: а) з напрямом магнітного поля N->S т. № 1, б) при напрямі S->N магнітного поля в т. № 3.

шару металу, рис.7 профілограма, якого вище на 1..2 мкм від поверхні скла. Після чого вже на намагніченому шарі утримують продукти зношування, які вже самі мають магнітні властивості за рахунок існуючого поля постійного магніту, з подальшим розмазуванням в тонкі плівки по

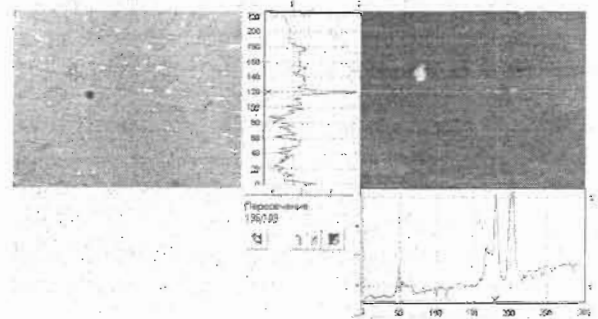


Рис. 5. Профілограма доріжки тертя склі в точці № 1

поверхні скла рис.4.б. При дослідженні утвореного поверхневого шару ми бачимо зміну в напрямку формування структури під дією магнітного поля впливом на атомний стан матеріалу.

Низьковуглецеві сталі відносяться до феромагнітних матеріалів. В металах – феромагнетиках спіни електронів мають тенденцію налаштуватися випадково в одному напрямі. Процеси тертя супроводжуються деформаційними змінами в поверхневих шарах матеріалу, що під дією магнітного поля буде характеризувати механізм механострикції. При технічному намагнічуванні розмір зразка  $l$  в напрямі магнітного поля змінюється на величину  $\Delta l = \pm \lambda_s l$ , що називається коефіцієнтом (константою) лінійною магнітострикцією. Тут  $\Delta l$  – зміна довжини зразка при намагнічуванні його до насичення [6]. Враховуючи наноструктурні розміри частинок, що утворюються в процесі тертя, насичення елементарними навколишнього середовища проходить достатньо швидко. Величина і знак  $\lambda_s$  залежать від природи магнетика, кристало-графічного напрямі і ступеня намагніченості.

Залізо при випадковій намагніченості подовжується в напрямі магнітного поля, проте зменшується в розмірах в поперечному напрямі, а структурна складова при магнітострикції набуває витягнутого характеру в напрямленні дії магнітного поля.

Низьковуглецева сталь при температурі вище

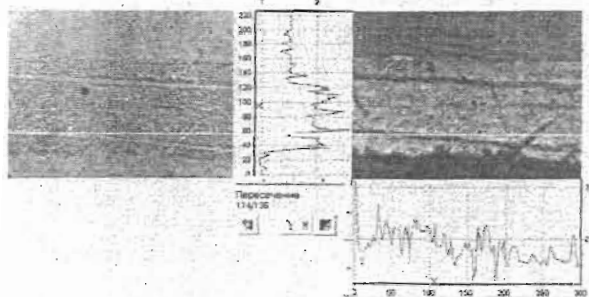


Рис. 6. Профілограма доріжки тертя на сталі в точці № 3.

температури Кюрі стає парамагнетиком, а матеріал з такими магнітними властивостями втягується в зону дії магнітних силових ліній, тобто в зону тертя.

Виладкова магнітострикція (термострикція) – зміна магнітних властивостей речовин при нагріві, в умовах тертя може проходити в тонких структурних складових на місцях фактичної площі контакту де температури досягають відповідних значень.

В феромагнетиках, що мають кубічну симетрію, обмінна магнітострикція не залежить від напрямку в кристалі, значить вона буде ізотропною, у всіх напрямках однакова, і проявлятиметься в зміні об'єму кристала, при цьому в більшості феромагнетиків вона додатна, тобто об'єм зразка збільшується. Паропроект особливо інтенсивний в області точки Кюрі, і обмінна магнітострикція тут досягає найбільшої величини [7].

Кристалічна ґратка заліза об'ємно - центрована кубічна з періодом ґратки 0,286 нм. До температури 768°C α-залізо феромагнітне. Кристалічна ґратка γ-заліза гранецентрована кубічна. Враховуючи, що парамагнітні матеріали

втягуються магнітним полем і утримуються останнім і зони його дії, звідси ми отримуємо інтенсивне накопичення продуктів зношування на скляному контртілі рис. 4б.

Утворення початкової тонкої магнітної плівки рис. 6 порядку 0,5 мкм прискорює процес накопичення продуктів зношування і їх намазування на поверхні тертя.

## Висновки

1) Вивчено процеси і механізми зношування на поверхнях тертя в магнітному полі. Обумовлено і показано якісні та кількісні переходи поверхні тертя на різних етапах напрацювання в залежності від зміни механізму зношування.

2) Визначені умови перетворення поверхонь тертя при направленому магнітному полі парамагнітних матеріалів на межі видозмінення властивостей.

3) Змінні характеристики парамагнітних матеріалів під дією магнітного поля в умовах тертя мають бути впроваджені в відновленні поверхонь тертя за безрозбірними технологіями.

*Свирид М.М.* – кандидат технічних наук, доцент кафедри Технології відновлення авіаційної техніки;

*Задніпровська С.М.* – магістр 601 ФЛА АКІ Національного авіаційного університету;

*Занько С.М.* – асистент кафедри Безпеки життєдіяльності;

*Закієв В.І.* – асистент кафедри Конструкції і міцності літальних апаратів.

[1] [www.ntpo.com/patents\\_fuel/fuel\\_2/fuel\\_10.shtml](http://www.ntpo.com/patents_fuel/fuel_2/fuel_10.shtml).

[2] Магнітні рідини. [www.ntpo.com/patents\\_fuel/fuel\\_2/fuel\\_10.shtml](http://www.ntpo.com/patents_fuel/fuel_2/fuel_10.shtml) - 43к

[3] <http://www.physorg.com/news4638.html>.

[4] М.М. Свирид, В.Г. Парашанов, А.В. Овчаренко. *Комплекс для дослідження трибологічних параметрів вузла тертя. Проблеми тертя та зношування: Науково-технічний збірник НАУ, К. Вип.45, 204с. (2006).*

[5] <http://www.physorg.com/news6019.html>

[6] К.П.Белов. *Магнітострикційні явища і їх технічні застосування.* Наука, М. (1987).

M.M. Svirid, S.M. Zanco, S.M. Zadniprovsca, V.I. Zakiev

## Monitoring of Tribology Properties of Steel 3 in Magnetic Field

National aviation university 03058, Kiev, Cosmonaut Cornarav avenue, 10

In the article the question of experimental research of the directed magnetic field action is examined on the type of friction at the conditions of the sliding without greasing. The connection of tribological descriptions of steel is defined depending on the changing of magnetic force lines direction through the friction plane.