

*О. О. Міщук, канд. фіз.-мат. наук, старш. наук. співроб.,
М. П. Цаплій, асп.*

ОСОБЛИВОСТІ СТРУКТУРИ СТАЛЕВИХ ПОВЕРХОНЬ ТЕРТЯ В УМОВАХ НЕРІВНОВАЖНОГО МЕХАНОХІМІЧНОГО АКТИВУВАННЯ

УкрНДІНП «МАСМА», Київ

Досліджено зміни трибологічних характеристик та фізико-хімічного стану поверхні загартованої сталі під впливом нерівноважних умов тертя та мастильного середовища.

Вступ. Змашувальну ефективність мастильних матеріалів здебільшого визначають, використовуючи стандартизовані методи експрес-діагностики, які передбачають випробування загартованих сталевих пар тертя впродовж відносно короткого терміну [1], що часто не перевищує перехідний період припрацювання спряжених поверхонь контактної зони, чим обумовлює різноманітність оцінювання трибологічних характеристик мастильних матеріалів [2]. На точність отримуваних результатів, як наслідок, сильно впливають початковий стан поверхонь тертя, випадкові удари під час встановлення елементів пари, мікроперекося системи навантаження, дія залишків консерваційного мастила тощо. З огляду на сучасні технологічні розробки постає питання про подальше цілеспрямоване дослідження особливостей структури поверхонь тертя та їх методичне використання з метою оцінювання механізмів змашувальної здатності мастильного матеріалу [3–8].

Постановка проблеми. Різні типи твердофазних перетворень поверхневого шару повною мірою проявляються лише за умови зміни навантажувально-швидкісних та температурних режимів тертя у достатньо широких діапазонах енергетики провідних процесів руйнування початкової структури сталі [4; 6; 9–11]. В [4] обґрунтована загальна аналогія між залежностями інтенсивності зношування та коефіцієнта тертя від швидкості ковзання, температури та навантаження як явище, пов'язане зі структурним пристосуванням матеріалу пари тертя. Окрім цього, в [12] було виявлено подібність залежностей коефіцієнта тертя від частоти обертання (коли-

вання) контртіла для різних кінематичних схем сталеві пари тертя: чотирикулькової, блок-кільце (схеми Тімкена), куля-площина для зворотного-поступального руху. За умов тертя ковзання частоту обертання пов'язують з лінійною швидкістю та контролюють з метою забезпечення її величини. Різним розмірам контртіла відповідають в декілька разів відмінні лінійні швидкості ковзання за однакових значень частоти обертання. Але критичні значення частоти, за яких відбувалися характеристичні перегини на залежностях коефіцієнта тертя, слабо залежали від лінійної швидкості за умови однакових навантажень. Ця обставина засвідчила важливість терміну перебування ділянок поверхні контртіла в мастильному середовищі між моментами проходження контактної зони тертя та з врахуванням аналогії між частотною і температурною залежністю коефіцієнта тертя була покладена в основу методу визначення поверхневої механохімічної активності мастильних матеріалів [12; 13].

Подальший розвиток досліджень [8] сприяв розумінню тієї обставини, що ідентифіковані характеристичні типи поверхневої активності мастильних матеріалів [12; 13] ініціюються процесами розпадання мартенситної складової структури сталі в контактній зоні тертя, подібними до тих, що відбуваються за умов низькотемпературного відпуску сталей мартенситного класу. Особливістю вказаних механохімічних процесів є, однак, все ще недостатньо досліджена залежність кінетики та механізмів їх перебігу, температури саморозігрівання контактної зони тертя від властивостей мастильного середовища, що припускає провідну роль поверхні контртіла в самоорганізації контактної зони тертя.

Мета та завдання роботи. Метою роботи було дослідження закономірностей послідовної зміни структури та хімічного складу поверхонь тертя сталі в контрольовано змінюваних нерівноважних умовах тертя.

В роботі вивчається вплив нерівноважного механохімічного активування поверхонь сталі, що забезпечується періодичною зміною частоти обертання рухомої кулі чотирикулькової пари тертя, на закономірності виникнення особливих тертьових структур. Аналізується роль консерваційного мастила в утворенні неорганічних поверхневих фаз.

Об'єкти та методи досліджень. Зразки куль діаметром 12,7 мм твердістю HRC 62-64, виготовлені зі сталі ШХ15 (ГОСТ 21022-75), досліджували на чотирикульковому пристрої тертя типу Falax. За

умови сталого навантаження динамічно змінювали частоту обертання з кроком 100 хв^{-1} в діапазоні $100\text{--}4000 \text{ хв}^{-1}$. Вимірювали силу тертя, фрикційну температуру пари тертя та діаметри слідів зношування куль. Кулі оброблено в заводських умовах консерваційним мастилом з вмістом інгібіторів корозії - сполук цинку та кальцію. Тертя куль досліджували в парафіно-нафтеній оліві марки М11, що часто використовується як базова в технологіях виготовлення мастильних матеріалів.

Властивості поверхонь тертя вивчали на різних стадіях методами оптичної металографії, досліджували з використанням Оже-мікрозонду методами растрової електронної мікроскопії, електронної Оже-спектроскопії та ступінчастого розпорощення поверхневих шарів йонами аргону.

Результати досліджень та їх обговорення. З метою дослідження кінетики утворення під час тертя дисипативних поверхневих структур найоптимальнішою є реєстрація коефіцієнта тертя, значення якого в першому наближенні не залежать від площі динамічного контакту, але відображають зміни фізико-хімічного стану контактної зони. З метою виявлення характерних структурних перетворень поверхневих шарів підбирали умови динамічної зміни частоти обертання рухомої кулі. Загалом, досліджено два види динамічного впливу: за однакової тривалості кожного ступеня частотного діапазону та за однакового шляху тертя (кількості обертів) на кожному ступені. Вигляд залежностей коефіцієнта тертя від частоти обертання дещо відрізняється, але загальні тенденції зміни структури поверхні тертя повторюються.

Характерну частотну залежність коефіцієнта тертя, яка відображає ефект утворення нового стану контактної зони тертя в діапазоні частот $n_1 < n < n_2$ ілюструє рис. 1, а. Зміну властивостей контактної зони охарактеризуємо різницею значень коефіцієнта тертя $f_{\max} - f_1$, що може досягати 60 % від величини f_1 . (рис. 1, а). Аналіз динаміки саморозігрівання пари тертя (рис. 1, б) свідчить про існування, окрім трьох головних, ще додаткових (перехідних) діапазонів частоти обертання.

Прямі 1–3 (рис. 1, б) характеризують швидкість розігрівання пари тертя відносно кімнатної температури в діапазонах частоти обертання $n < n_1$, $n_1 < n < n_2$ та $n > n_2$. Швидкість розігрівання максимальна в першому діапазоні та мінімальна в третьому (прямі 1 та 3 відповідно).

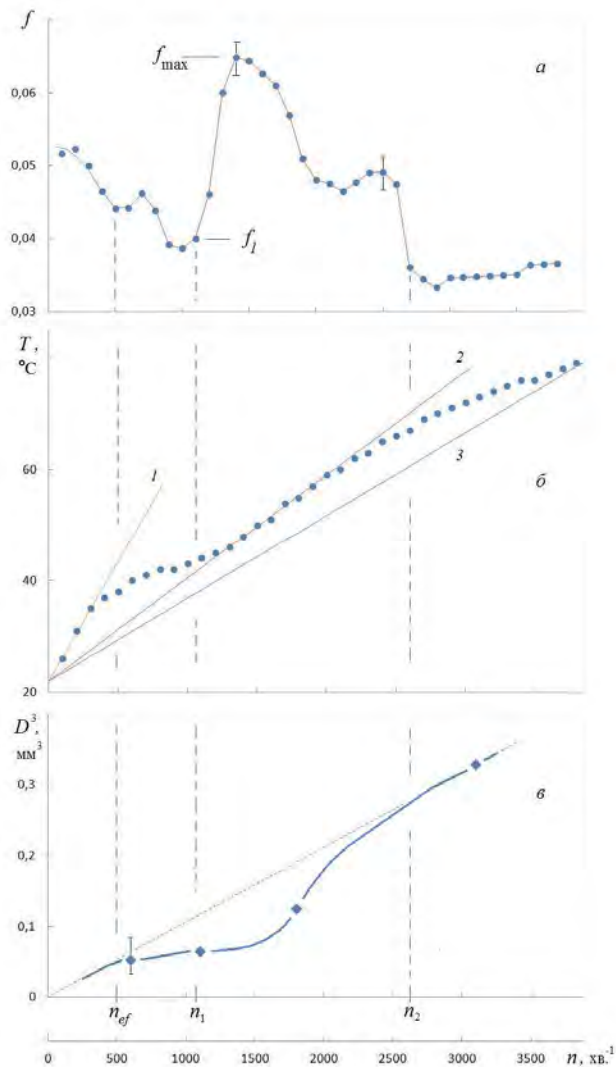


Рис. 1. Залежність коефіцієнта тертя $f(a)$, температури T саморозігрівання (б) та діаметра сліду зношування в кубічній степені D^3 (в) стаціонарних куль від частоти обертання n рухомої кулі чотирикулькової пари тертя. Осьове навантаження 392 Н (1200 обертів на кожному ступені зростання частоти обертання)

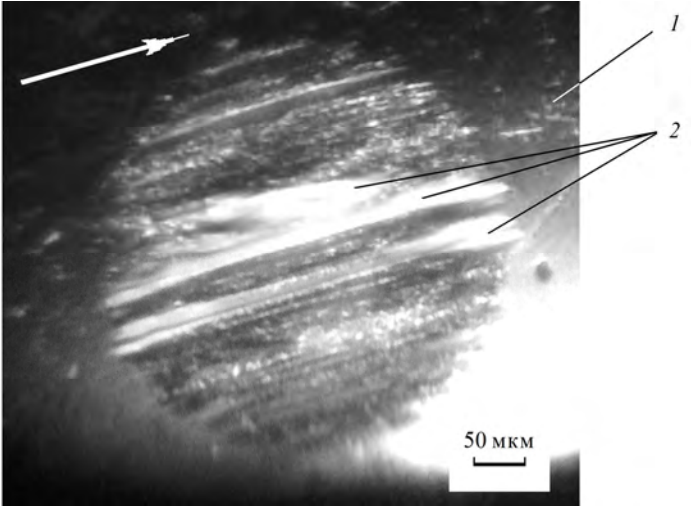
Новий стан контактної зони ($n_1 < n < n_2$) характеризується сталою лінійною швидкістю розігрівання (пряма 2), в 2,4 рази нижчою, ніж на початку тертя (пряма 1).

Оцінювання величини зношування стаціонарних куль чотирикулькової пари тертя в одиницях об'єму (як середнього діаметру сліду зношування куль у кубічній степені D^3) ілюструє тенденцію різкого зниження інтенсивності зношування після досягнення значно меншого критичного значення частоти $n = n_{ef} < n_1$ (рис. 1, в). Ця обставина, а також тенденція зміни коефіцієнта тертя (рис. 1, а) та температури саморозігрівання пари тертя (рис. 1, б) свідчить про існування в перехідному діапазоні $n_{ef} < n < n_1$ ще одного особливого стану контактної зони тертя. В іншому перехідному діапазоні ($n > n_2$) інтенсивність зношування (нахил кривої) відновлюється до початкової внаслідок збільшення діаметра сліду зношування та захоплення в зону тертя все нових ділянок сталевієї поверхні.

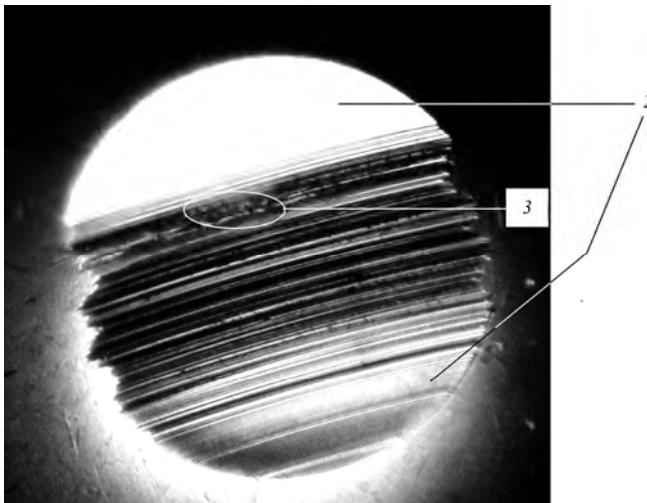
З метою вимірювання діаметра слідів зношування куль та дослідження фізико-хімічного стану тертьових зон процес тертя зупиняли на потрібному ступені частоти обертання. Для кожної відібраної, таким чином, пари тертя сліди зношування були утворені індивідуально внаслідок проходження діапазону частот, починаючи від стартової 100 хв^{-1} . Отже, мікроструктура слідів зношування куль, проілюстрована для відносно низьких частот обертання на рис. 2 та для високих частот на рис. 3, є наслідком послідовного утворення та стирання низки поверхневих структур під час збільшення частоти обертання рухомої кулі.

Фізико-хімічний стан поверхонь тертя аналізували на особливих ділянках, характеристика яких наведена в табл. 1. Відзначимо відсутність слідів мікросхоплень на всіх досліджених поверхнях тертя, окрім випадку $n > n_2$ (рис. 3, б), для якого на виході з зони тертя в центральній її частині фіксуємо слід локалізованого мікросхоплення поверхонь пари тертя, яке не поширилось на інші ділянки тертьової зони. Можна зробити висновок, що поверхневі структури (рис. 2 та 3) є наслідком не мікросхоплень спряжених поверхонь, а механохімічних перетворень контактної зони.

Відзначимо, що виявлені структури утворюються водночас на аналогічних ділянках всіх стаціонарних куль чотирикулькової пари тертя, а на поверхні доріжки тертя рухомої кулі віддзеркалюються з відповідним топографічним та фазовим контрастом.

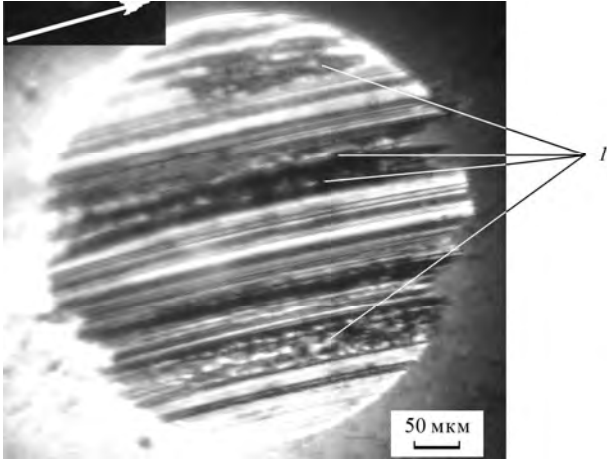


a

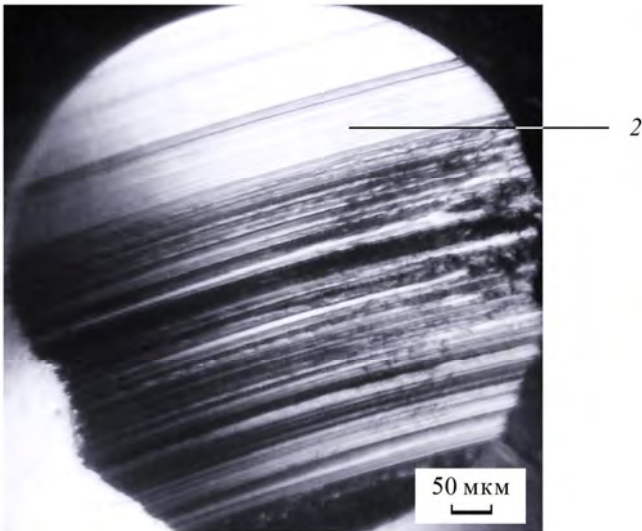


б

Рис. 2. Мікроструктура слідів зношування стаціонарних сталевих куль чотирикулькової пари тертя (оптичні зображення) після зростання частоти обертання n до значення: *a* – 500 хв.⁻¹ ($n = n_{ef}$), *б* – 600 хв.⁻¹ ($n_{ef} < n < n_1$). Стрілка зверху вказує напрямок переміщення поверхні рухомої кулі



a



б

Рис. 3. Мікроструктура слідів зношування стаціонарних сталевих куль чотирикулькової пари тертя (оптичні зображення) після зростання частоти обертання n до значення: *a* – 1800 хв.⁻¹ ($n_1 < n < n_2$), *б* – 3100 хв.⁻¹ ($n > n_2$).
Стрілка зверху вказує напрямок переміщення поверхні рухомої кулі

**Характеристика ділянок поверхонь тертя в околі точок
Оже-спектрального аналізу***

Номер точки	Характеристика ділянки сліду зношування стаціонарної кулі	Фазова траєкторія
1	Центральна зона за низьких частот обертання	2+5(6)
2	Особлива фаза (рис. 2, а, точка 2)	2+6
3	Частинка зношування (рис. 2, а, точка 1)	
4	Тонка структура зверху (рис. 2, б, точка 2)	3+4
5	Тонка структура знизу (рис. 2, б, точка 2)	3+4
6	Верхівка дендриту зверху	2+5
7	Верхівка дендриту в центральній зоні	2+5
8	Вершина пагорба центральної зони (рис. 3, б)	2+6
9	Тонка структура зверху (рис. 3, б, точка 2)	3+4

* Співвідноситься з табл. 2 та рис. 4

Це підтверджує провідну роль поверхні рухомої кулі (контртіла) в механохімічному формуванні структур тертя.

Результати оже-спектрального дослідження елементного складу характеристичних ділянок поверхонь тертя наведено в табл. 2.

Аналіз засвідчує присутність активних елементів (цинку, кальцію, сірки, фосфору) від залишків консерваційного мастила в адсорбційних прошарках практично на всіх досліджених поверхневих ділянках. Значна кількість цинку та фосфору виноситься за межі зони тертя у складі продуктів зношування вже на початкових стадіях тертя (рис. 1, а, точка 1; табл. 2, точка 3). Для порівняння відзначимо відсутність цинку на мікроділянках «звичайної» поверхні тертя (табл. 2, точка 1).

В цілому, сполуки цинку та кальцію здатні суттєво впливати як на утворення нових поверхневих структур, так й на тертя та зношування сталі [14; 15]. Але вже після перших стадій розпорошення адсорбційного шару в камері спектрометра йонами аргону домішки цинку та фосфору на більшості характеристичних ділянок зникають, а отже, вплив цих домішок на властивості відповідних поверхневих структур не є визначальним. Значними, у всіх випадках, є концентрації домішок вуглецю, кисню, а також певною мірою сірки. Але її вплив відбувається на тлі значної концентрації кисню.

Таблиця 2

Елементний склад поверхневих шарів стаціонарних куль у характеристичних точках поверхонь тертя *

Номер точки	Концентрація, ат. %							
	Fe	O	C	Zn	Ca	S	P	Інші
Адсорбційний шар								
1	22,8	31,0	40,5	–	0,5	2,7	1,4	1,1
2	18,0	37,5	24,6	6,9	2,3	2,4	7,4	0,9
3	27,1	36,2	2,6	15,4	4,4	2,6	11,7	–
4	19,8	20,8	55,8	2,2	0,2	0,7	–	0,5
5	18,7	19,8	58,8	1,3	0,2	1,2	–	–
6	19,3	28,8	45,0	1,2	0,8	4,2	–	0,7
7	20,3	27,6	42,1	0,9	1,0	2,1	–	1,4
8	24,7	34,4	37,3	1,9	0,3	1,4	–	–
9	23,7	35,9	35,0	1,3	–	1,0	–	2,3
Після розпорощення поверхневого шару товщиною 30 нм								
1	54,3	36,9	7,2	–	–	1,6	–	–
2	31,9	41,1	5,3	7,5	3,1	4,7	6,4	–
3	25,4	31,0	–	24,2	4,6	5,3	9,5	–
4	55,4	26,2	15,7	–	0,1	2,6	–	–
5	43,5	27,5	21,7	1,3	0,6	5,4	–	–
6	36,6	41,0	13,2	0,8	0,1	8,3	–	–
7	45,8	38,5	11,4	–	0,6	3,7	–	–
8	45,7	40,5	7,2	–	0,3	6,3	–	–
9	59,0	22,2	13,8	–	–	4,0	–	1,0

* Нумерація точок відповідає табл. 1.

Аналіз мікроструктури поверхні тертя, відображеної на рис. 2, *a*, доводить існування в центральній зоні особливої фази (точки 2), з утворенням якої припиняється інтенсивне зростання температури початкового періоду тертя (рис. 1, *b*, пряма 1). В структурі цієї фази залишаються значними концентрації всіх вищевказаних домішок (табл. 2, точка 2). Ця обставина пояснює суттєвий статистичний розкид вимірюваних значень діаметра сліду зношування (рис. 1, *в*) для різних пар тертя. Залишкові сліди консерваційного мастила елементів пари тертя відчутно впливають на утворення поверхневих плівок та на вимірювані трибологічні характеристики лише в околі критичної частоти $n = n_{ef}$.

Наступне незначне підвищення частоти обертання призводить до суттєвої перебудови поверхонь тертя (рис. 2, *b*). Мікро-

структура поверхні після цього зберігається в діапазоні $n_{ef} < n < n_1$. Її характерними ознаками є чітко сформована (на відміну від «особливої» фази (рис. 2, а, точки 2)) в верхній та нижній частинах сліду зношування тонка періодична мікроструктура смуг ковзання, охарактеризована нами раніше в [8] (рис. 2, б, точки 2). В центральній частині сліду зношування виникає груба топографічна мікроструктура «відтиснених пагорбів» та «прорізів» [8].

Водночас, вже в діапазоні $n_{ef} < n < n_1$ на межі тонкої та грубої топографічних мікроструктур утворюється специфічно вищерблена структура хребтів (рис. 2, б, мікроділянка 3), яка набуває розвитку та стабільності в наступному діапазоні частот $n_1 < n < n_2$. Аналіз ділянок 1 на рис. 3, а засвідчує дендритну природу вищерблених хребтів, морфологічні особливості яких на якісному рівні збігаються з особливостями відомих типів дендритних структур [16]. Дендрити стовпчастої будови [17] розташовуються перпендикулярно поверхні тертя та стають складовою частиною мікроструктурних хребтів як на поверхні стаціонарних, так і на поверхні рухомих куль чотирикулькових пар тертя.

Досягнення наступної критичної частоти обертання $n = n_2$ призводить до утворення поверхневої мікроструктури (рис. 3, б), певною мірою подібної до мікроструктури поверхні в частотному діапазоні $n_{ef} < n < n_1$ (рис. 2, б). Зокрема, знову виникає тонка періодична мікроструктура смуг ковзання (ділянка 2).

З метою феноменологічного дослідження структури виділених поверхневих фаз на атомарному рівні побудуємо своєрідну фазову діаграму поверхневого шару сталі після тертя (рис. 4), співвідносячи концентрацію заліза з концентраціями інших елементів (табл. 2). Аналіз цієї діаграми виявляє існування декількох фазових траєкторій: 1 – однокомпонентних стехіометричних фаз заміщення та проникнення Fe_xX_{1-x} ; 2 – фази FeO в двофазній системі FeO+Fe₂C; 3 – фази FeO в двофазній системі FeO+Fe; 4 – фази Fe₂C в двофазній системі Fe₂C+Fe; 5 – дво(три)фазної системи Fe₂C+Fe₃C(+ледебурит); б – вуглецю ледебуриті.

Точки діаграми, що стосуються елементів заміщення та проникнення для одних й тих самих ділянок попадають на фазові траєкторії різних структур (табл. 1). Це може свідчити про утворення багатофазної суміші субмікро(нано)структурних конгломератів [18], які водночас попадають у зону електронного пучка під час

Оже-спектрального аналізу. З іншого боку, це може бути властивістю складних карбооксидних (оксокарбідних) структурних фаз.

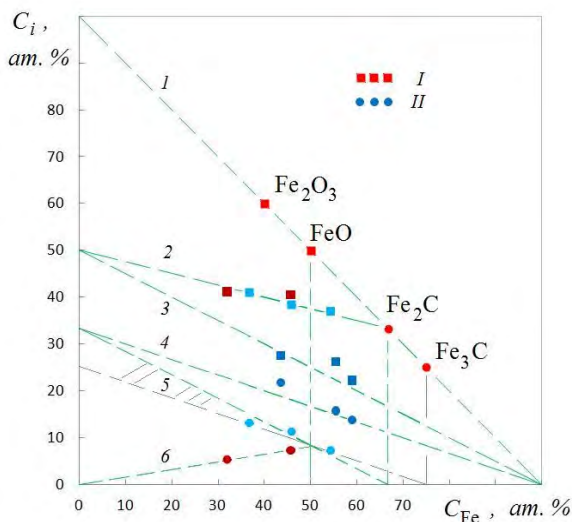


Рис. 4. Фазова діаграма сталевій поверхні тертя – кореляційні залежності між концентраціями заліза C_{Fe} та домішок C_i , виміряними після розпорощення поверхневого шару товщиною 30 нм (табл. 2): *I* – кисню (квадратні точки); *II* – вуглецю (округлі точки)

Тонка періодична мікроструктура смуг ковзання ((рис. 2, б, та 3, б, точки 2) утворюється для структур типу 3+4 (табл. 1). Інші структурні фази сприяють грубій топографічній мікроструктурі поверхонь тертя. Верхівки дендритів (рис. 3, а), які викликають специфічне зростання коефіцієнта тертя (рис. 1, а), мають структуру типу 2+5.

Збільшення частоти обертання призводить до перетворення структур 2+5 на структури типу 2+6 (рис. 3, б). Спостерігається поєднання структурних типів 3+4 (у верхній та нижній частині сліду зношування) та 2+6 (у центральній частині) в діапазонах частот $n_{ef} < n < n_1$ та $n > n_2$.

Поява структурного типу 2+5 (дендритів) супроводжується зникненням (руйнуванням) двох інших типів (рис. 3, а) та є, на нашу думку, наслідком поглядання структури мартенситу в поверхневих шарах рухомої кулі (контртіла) [8]. Цьому висновку сприяли

також результати наступних досліджень, які виявили, що діапазон частоти обертання, в якому проявляється ефект дендритної мікроструктури поверхні тертя, зменшується пропорційно величині навантаження пари тертя (рис. 5, *a*).

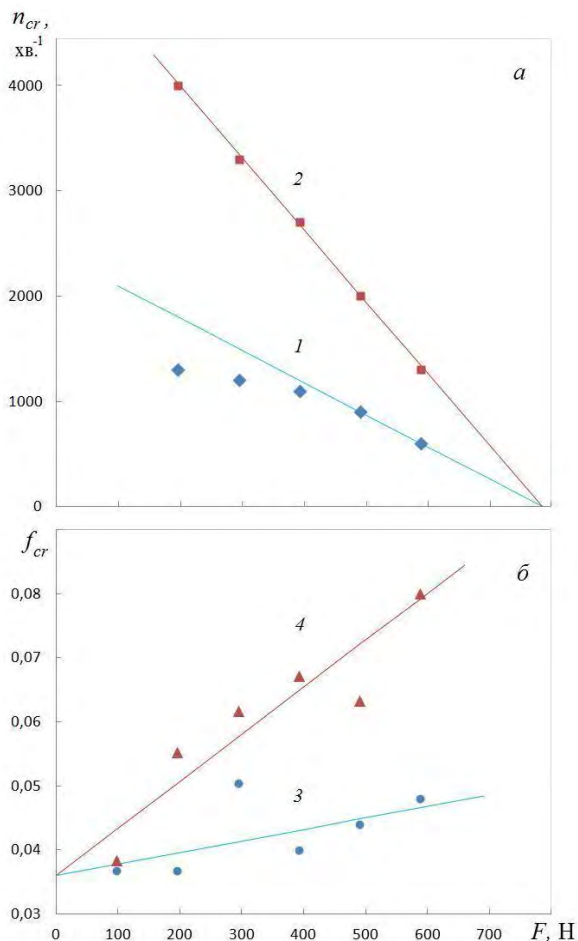


Рис. 5. Залежність критичних величин частоти обертання n_{cr} рухомої кулі (*a*) та характеристичних значень коефіцієнта тертя f_{cr} (*б*) чотирикулькової пари тертя від осевого навантаження F : 1 – n_1 ; 2 – n_2 ; 3 – f_1 ; 4 – f_{\max} (1200 обертів на кожному ступені зростання частоти обертання)

Водночас зменшуються значення критичних частот n_1 та n_2 та змінюється інтенсивність цього ефекту, що відображається на величині $f_{\max}-f_l$ (рис. 5, б). За високих навантажень можливості дослідження обмежені проявом процесів схоплювання пари тертя. За низьких навантажень значення величини $f_{\max}-f_l$ зменшуються за межі похибки вимірювань. Також на величини f_l та n_1 суттєво впливають процеси, що відбуваються в попередньому діапазоні частот $n_{ef} < n < n_1$, зокрема, важливим є наявність залишків консерваційного мастила.

Висновки. Метод періодичної зміни частоти обертання створює умови нерівноважного механохімічного активування поверхневих шарів сталі, за яких було виявлено та досліджено ефекти утворення на поверхнях тертя специфічних тонких періодичних, а також дендритних поверхневих мікроструктур. Аналіз експериментальних даних доводить, що механізми утворення структур пов'язані з перетвореннями мартенситу, виділеннями аустеніто-оксидно-карбідних колоній під впливом процесів зовнішнього окиснення та науглецювання, які взаємопов'язані зі змащувальною активністю мастильного середовища. Деталізація природи цих мікроструктур вимагає, однак, подальших досліджень.

Список літератури

1. *Ищук Ю.Л.* Дослідження змащувальної здатності антифрикційних мастил різного призначення методами ASTM / Ю.Л. Ищук, О.О. Мищук, О.О. Македонський, О.В. Шапошник, А.В. Богайчук // Проблеми тертя та зношування: Наук.-техн. зб. – К.: НАУ, 2009. – Вип. 51. – С. 186–198.
2. *Ищук Ю.Л.* Смазующие свойства мыльных пластичных смазок различного назначения: рейтинги эффективности / Ю.Л. Ищук, О.А. Мищук, А.В. Богайчук, О.А. Македонский, А.В. Шапошник // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2011. – № 1. – С. 16–22.
3. *Dayson C.* The friction of very thin solid film lubricants on surfaces of finite roughness // *ASLE Transactions*. – 1971. – V. 14. – P. 105–115.
4. *Костецкий Б.И.* Поверхностная прочность материалов при трении / Б.И. Костецкий, И.Г. Носовский, А.К. Караулов, Л.И. Бершадский, Н.Б. Костецкая, В.А. Ляшко, М.Ф. Сагач / Под общ. ред. Б.И. Костецкого – К.: Техніка, 1976. – 292 с.
5. *Umemoto M.* Nanocrystallization of steels by severe plastic deformation // *Materials Transactions*. – 2003. – V. 44, No. 10. – P. 1900–1911.

6. *Шевеля В.В., Олександренко В.П.* Трибохимия и реология износостойкости. Хмельницкий: ХНУ, 2006. – 278 с.

7. *Роик Т.А.* Композиционные материалы для высокотемпературных подшипников скольжения / Т.А. Роик, Ю.Ф. Шевчук // *Металлообработка: Оборудование и инструмент.* – 2007. – № 1. – С. 36–38.

8. *Мищук О.О.* Вплив процесів розкладу структури мартенситу на формування поверхонь пари тертя в мастильному середовищі / О.О. Мищук, А.В. Богайчук // *Проблеми тертя та зношування: наук.-техн. зб.* – К.: НАУ, 2010. – Вип. 54. – С. 121–133.

9. *Матвеевский Р.М.* Температурная стойкость граничных смазочных слоев и твердых смазочных покрытий при трении металлов и сплавов. М.: Химия, 1978. – 223 с.

10. *Буяновский И.А.* Температурно-кинетический метод оценки температурных пределов работоспособности смазочных материалов при тяжелых режимах граничной смазки // *Трение и износ.* – 1993. – Т. 14, № 1. – С. 127–142.

11. *Аксенов А.Ф.* Трение и изнашивание металла в углеводородных жидкостях. – М.: Машиностроение, 1977. – 152 с.

12. *Мищук О.О.* Поверхнева активність мастильних матеріалів різного функціонального призначення при терті // *Вісник Державного університету “Львівська політехніка”.* Сер. Хімія, технологія речовин та їх застосування. – 1998. – № 342. – С. 297–305.

13. *Мищук О.О.* Класифікація авіаційних олів за механізмами їх поверхневої активності при терті // *Технологические системы.* – 2000. – № 1. – С. 22–26.

14. *Vipper A.B.* Tribological performance of molybdenum and zinc dithiocarbamates and dithiophosphates / A.B. Vipper, O.P. Parenago, A.K. Karaulov, G.N. Kuz'mina, O.A. Mishchuk, T.A. Zaimovskaya // *Lubrication Science.* – 1999. – V. 11, No. 2. – P. 187–196.

15. *Ward W.C.* Properties of tribochemical films from various additives in grease generated under load / W.C. Ward, M. Najman // *NLGI Spokesman.* – 2006. – V. 70, No. 7. – P. 20–26.

16. *Закономерности* формирования структуры сплавов эвтектического типа / 2 Всес. науч. конф. / Под ред. Ю.Н. Тарана – Днепропетровск, 1982. – 333 с.

17. *Кіндрачук М.В.* Структуроутворення та формування триботехнічних властивостей евтектичних покриттів / М.В. Кіндрачук, Ю.А. Куницький, О.І. Дудка, Ю.Г. Сухенко, В.М. Коржик. – К.: Вища школа, 1997. – 120 с.

18. *Левинский Ю.В.* Внутреннеокисленные и внутреннеазотированные наноматериалы. – Москва: Экомет, 2007. – 400 с.

Мищук О.А., Цаплій М.П. **Особенности структуры стальных поверхностей трения в условиях неравновесной механохимической активации** // Проблемы тертя та зношування: наук.-техн. зб. – К.: НАУ, 2011. – Вип. 56. – С. 151–165.

Исследованы изменения трибологических характеристик и физико-химического состояния поверхностей трения закаленной стали под влиянием неравновесных условий трения и смазочной среды.

Табл. 2, рис. 5, список лит. 18 наим.

Mishchuck O.A., Tsaplyi M.P. **The peculiarities of the steel friction surface structure in the conditions of non-equilibrium mechanical and chemical activation**

The effects of non-equilibrium friction conditions and lubricant medium on the changes of tribological characteristics and physical-chemical state of the friction surfaces of high hardening martensitic steel are investigated.

Стаття надійшла до редакції 12.11.2011