

УДК 631.3:004.624:621.891

М. Денисенко, канд. техн. наук

Національний університет біоресурсів і природокористування України

САМОРЕГУЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ РУЙНУВАННЯ ТА УТВОРЕННЯ ВТОРИННИХ СТРУКТУР ПРИ АБРАЗИВНОМУ ЗНОШУВАННІ

Резюме. Досліджено саморегулювання процесів руйнування та утворення вторинних структур при абразивному зношуванні. Спільними для вторинних структур обох основних типів є їхня поверхнева локалізація, ультрадисперсна будова, здатність мінімізувати руйнування поверхневого шару й екранувати недопустимі процеси втоми, корозії зношування.

Ключові слова: абразивне зношування, зносостійкість покриттів, тертя ковзання, поверхня тертя.

М. Denysenko

SELF – REGULATION PROCESS OF DESTRUCTION OF PRODUCTION SECONDARY STRUCTURE AND ABRASIVE WEAR

The summary. In article lay out and question organize and demolish secondary structure what suitable for reduce to a minimum damage surface layer and brake inadmissible process drip ping, fatigue, corrosion, wear-and-tear. The article describes complex approaches of friction processes of machine tooling and its elements.

Key words: abrasive wear process, cove rages wear ability, sliding friction, friction surface.

Вступ. Абразивне зношування є одним із основних видів для багатьох деталей будівельних, дорожніх, транспортних, сільськогосподарських та інших машин, що працюють у середовищах, які містять абразивні частинки; при цій швидкості зношування дуже високі (0,1 мкм/год). Руйнуючими тілами при абразивному зношуванні є зокрема мінеральні високотверді частинки неметалевого походження, за яких адгезія та схоплювання дуже малі [1], що зумовлює відносну простоту фізичних процесів, які призводять до зношування.

Як і в процесах поверхневої втоми, стирання частинок матеріалу в процесі абразивного зношування спричиняються, в основному, процесами контактної деформації. Явище стирання відбувається в процесі прямого фізичного контакту двох поверхонь, з яких одна значно твердіша іншої. Нерівності твердої поверхні втілюються в м'яку поверхню при пластичному стіканні м'якого матеріалу навколо твердих нерівностей. При накладанні тангенціального руху тверда поверхня буде ковзати по м'якій, руйнуючи її. Процеси абразивного зношування широко розповсюджені і за оцінками дослідників на їх долю припадає більше 60% випадків зношування [2]. При терті структура поверхневого шару, а відповідно, його властивості змінюються. Це зумовлено самою природою зовнішнього тертя, і через яке виникає пластична деформація в зоні тертя.

Велике значення мають процеси утворення, руйнування та відтворення на поверхнях тертя деталей і вузлів машин вторинних структур [3, 4]. У результаті взаємодії активних пластично-деформованих (текстурованих) поверхневих шарів металу з киснем повітря або мастила, що адсорбується на поверхні, утворюючи хімічно-адсорбовані плівки, тверді розчини або хімічні сполуки металу з киснем. Вилучення їх з поверхні тертя протікає як стаціонарний процес динамічної рівноваги і

відновлення окислювальних плівок [4], при цьому відокремлення частинок зношування настає в результаті багатократних повторюваних навантажень.

Мета роботи. Дослідити процеси руйнування та утворення вторинних структур на поверхнях тертя при абразивному зношуванні деталей і вузлів сільськогосподарських машин.

Матеріали та методика досліджень. Дослідження починали із всебічного вивчення стану поверхонь тертя і поверхневих шарів деталей машин і умов їх експлуатації, що дозволило вивчити фактори, які зумовлюють протікання абразивного зношування. Для дослідження механізмів абразивного зношування і поверхневого руйнування, а також особливостей утворення вторинних структур використано сучасні методи тонкого фізичного експерименту. При вивченні процесів, які відбуваються в поверхневих шарах металів при абразивному зношуванні, використовували комплексну методику досліджень, яка містить: дослідження зміни структури в поверхневих шарах пар тертя; зміну хімічного складу в тонких поверхневих шарах металу; геометрію і мікрогеометрію поверхонь тертя; фазовий склад тонких поверхневих шарів. Усі дослідження поверхневих шарів здійснювали за допомогою металознавчого аналізу і методів експериментальної фізики.

Для комплексного вивчення специфіки абразивного зношування в роботі досліджено понад 200 деталей сільськогосподарських машин, що працюють в умовах абразивного зношування. В якості захисних покриттів від абразивного зношування використовували: сталь 65Г, тришарову сталь Х6Т2, індукційне наплавлення сплавом ПГ-С27, індукційне наплавлення евтектичними покриттями №1, точкове дугове зварювання порошковим дротом ПП-АН170, виготовлення деталей з композиційних порошкових матеріалів КХЖ-70, КХНФ-15, твердий сплав ВК-8, мікроплазмове зварювання порошковим дротом ПП-АН148.

Результати досліджень та їх обговорення. Вивченню абразивного зношування присвячена: велика кількість наукових робіт. Огляд існуючих уявлень про механізми і види абразивного зношування показав, що більшість авторів розглядають абразивні процеси як шкрябання, впровадження, проорювання, зняття мікростружки, тобто чисто механічні явище. За межами механічних уявлень не показана взаємодія активованого металу з активними компонентами зовнішнього середовища – з киснем повітря, розчиненим в мастилі, та іншими окислювачами. Перші роботи з вивчення впливу кисню повітря на зношування виконав 1930 року німецький вчений Макс Фінк [5], який є основоположником трибохімії. Він уперше встановив наявність закису заліза на поверхні тертя.

З іншої точки зору до вивчення плівок окису підійшов американський вчений С. Розенберг, який вказав на захисні властивості плівок окису, що утворюються при терті. Продовженням робіт М.Фінка є дослідження Х.Краузе. Частинки зношування в його експериментах склалися з $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$. При збільшенні вологості атмосфери можуть відокремлюватися частинки з чистого заліза. Швидкість зростання плівки складала до 300 А/хв. Суттєвим внеском у дослідження механохімічних процесів окислювання металів були роботи К. Діса [6]. Випробування великої кількості металевих пар в як сухому стані, так і з мастилом дозволило йому зробити такі висновки.

Окремі ділянки тонкого поверхневого шару металу внаслідок значних напружень і деформацій, що розвиваються на них при терті, переходять в активований нестійкий стан. Окислювальний знос спостерігається тоді, коли пара тертя зазнає впливу кисню повітря або кисню, який міститься в мастилі, при цьому оксиди, які утворюються на поверхні тертя, зношуються.

На рис. 1 показана залежність інтенсивності зношування від тиску за даними Майлендера і Діса при стиранні зразка по твірній диску (м'яка сталь по твердій хромистій сталі) при швидкості ковзання 1 м/с. Інтенсивність зношування зростає в

міру збільшення тиску, потім падає і далі знову зростає.

Вивчаючи продукти зношування, Дис показує, що зниження інтенсивності зношування пов'язане з утворенням оксиду Fe_2O_3 , який запобігає від пошкоджень (рис. 2) поверхні тертя. Наявність у продуктах зносу оксидів установлено, як при терті в сухому стані, так і з мастилом.

При терті навіть нержавіючих сталей продуктами зносу є окисли. Це відбувається за того, що в звичайних умовах на поверхні такої сталі утворюється захисна плівка із оксидів компонентів сталі, наприклад, оксидів хрому, яка попереджує міграцію атомів заліза до поверхні. В умовах тертя, коли безперервно руйнується плівка, такий захист є неефективним.

Арчард і Хірт [7], використовуючи електронний мікроскоп і дифракцію рентгенівських променів, встановили хімічну відповідність між частинками зносу і продуктами окислення при корозії в атмосфері й показали, що окислення поверхонь тертя має важливе значення за слабого зношування.

Квинн (T.F.J. Quinn) [8] показав, що існує кореляція між оксидами, які отримують в експериментах при зношуванні, і тими оксидами, які виникають при температурі спалаху.

Однак Тенвік (N. Tenwick) і Ерлс (S. W. E. Earls) [9] вважають, що температура спалаху діє дуже короткий час, тому розумніше вважати відповідальною за процес окислення деяку середню поверхневу температуру.

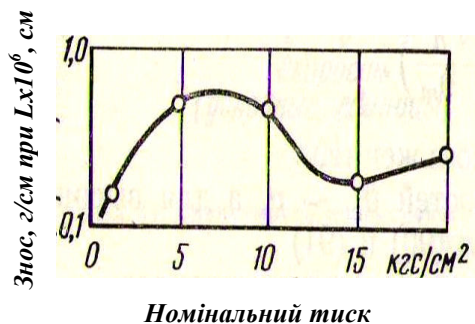


Рисунок 1. Зношування змащених поверхонь металів в залежності від тиску (L – шлях тертя)

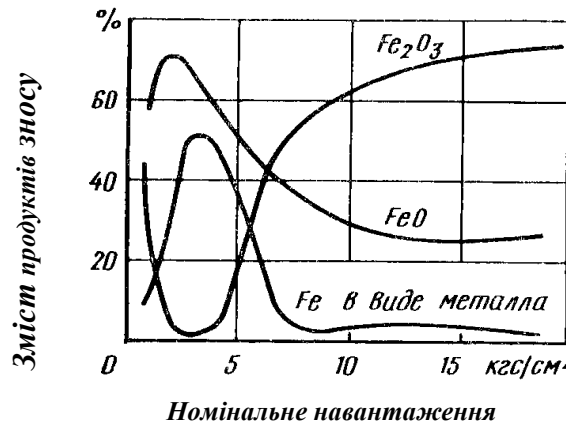


Рисунок 2. Склад продуктів зношування м'якої сталі, яка ковзає по поверхні хромистої сталі в залежності від тиску

Слід пом'ятати, що швидкість окислення в звичайних умовах може значно відрізнитися від тієї, яка має місце при терті. Відомо, що ювенільні поверхні металу більш активні [10], крім того, механічний вплив може істотно змінити активаційний бар'єр, що впливає на швидкість окислення і навіть на хімічний склад оксидів.

Б.І. Костецький зв'язує підвищення активності металу з текстуруванням – особливим видом пластичної деформації при терті, яка характеризується найбільшим збільшенням щільності дислокацій і вакансій [14].

Одну з перших спроб пов'язати зношування з процесом утворення оксидних плівок здійснив Улінг (H.H. Uhlig) [10] при аналізі явища фретинг - корозії.

Ця модель зношування в подальшому була розвинена рядом дослідників.

Квин [8] розглянув дві моделі окислювального зношування при терті:

- 1) плівка окислу утворюється в той час, коли нерівність поверхні не торкається з іншою нерівністю поверхонь контртіла;
- 2) на кожному контакті утворюється однакова кількість окислу. Після того, як плівка досягне критичної товщини, відбувається її зріз, котрий локалізується по границі метал – оксид.

За Кубашевським і Гопкінсом швидкість окислення M є експоненціальною функцією температури:

$$M \sim \exp\left(-\frac{\alpha}{\vartheta_m}\right), \quad (1)$$

де α – константа; ϑ_m – температура.

Тоді для першого випадку

$$W_1 \sim \exp\left(-\frac{\alpha'}{\vartheta_m}\right). \quad (2)$$

Для другого – швидкість зносу повинна бути пропорційна часу контактування, тобто $\frac{1}{v}$:

$$W_2 \sim \frac{1}{v} \exp\left(-\frac{\alpha''}{\vartheta_m}\right),$$

де v – відносна швидкість ковзання.

Враховуючи, що для низьких швидкостей $\vartheta_m \sim v$, а для високих $\vartheta_m \sim v^{1/2}$, з урахуванням формул (1) і (2) отримаємо:

$$\left. \begin{aligned} W_1 &\sim \exp\left(-\frac{\alpha'}{v}\right); \\ W_1 &\sim \exp\left(-\frac{\alpha'}{v^{1/2}}\right); \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} W_2 &\sim \frac{1}{v} \exp\left(-\frac{\alpha''}{v}\right); \\ W_2 &\sim \frac{1}{v} \exp\left(-\frac{\alpha''}{v^{1/2}}\right). \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Зміна інтенсивності зношування залежно від швидкості ковзання, згідно з рівнянням (3) і (4), зображена на рис. 3.

Згідно з Тао (F. F. Tao) процес корозійного зносу можна розбити на ряд стадій: 1) дифузія кисню до поверхні металу [11]; 2) зростання окисної плівки; 3) руйнування її при ковзанні [11].

Тао розглянув дві моделі процесу:

модель 1 – плівка зростає в часі, а її знос відбувається миттєво;

модель 2 – час утворення плівки критичної товщини незрівнянно менше її часу руйнування.

З експериментальних результатів, які отримані при терті в мастилі пари куля – циліндр, автор робить висновок, що перша модель більше відповідає дійсності. Однак аналіз даних, які наведені автором, скоріше свідчать про те, що дійсна картина описується моделлю, де враховується як час окислення, так і час руйнування.

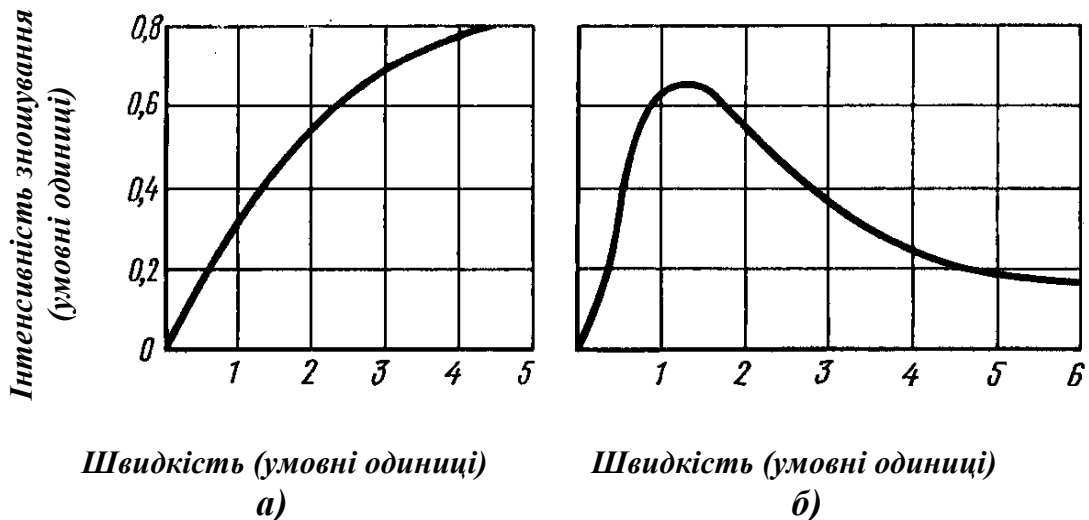


Рисунок 3. Залежність інтенсивності зношування від швидкості ковзання (за Квином) [8]:

a – по першому механізму [рівняння (3)]; *б* – по другому механізму [рівняння (4)];

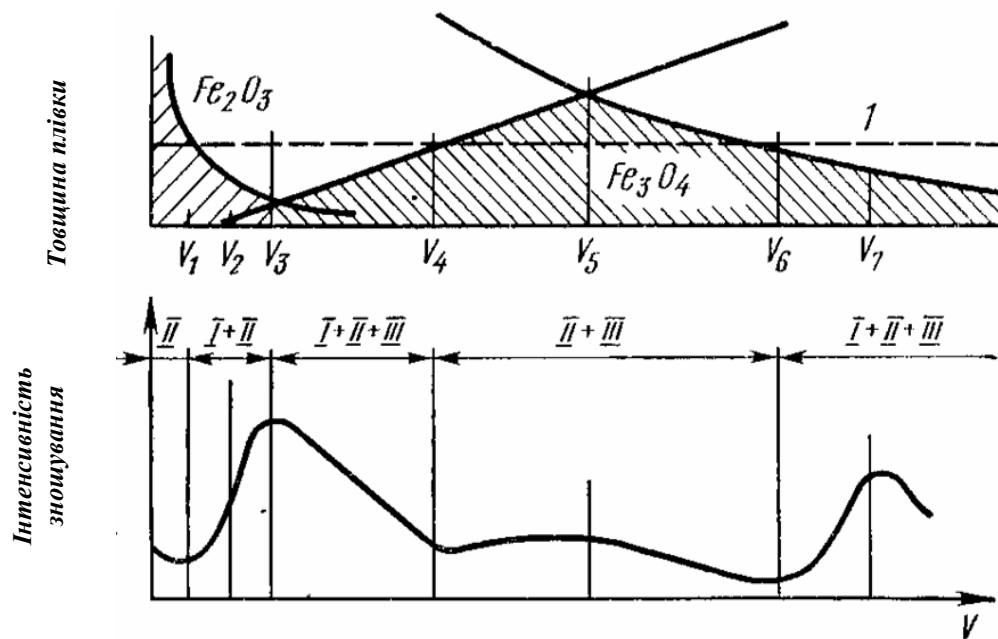


Рисунок 4. Залежність інтенсивності зношування від швидкості ковзання (за Яшимото і Цзукіое) [12]:

I – гранична товщина окисної плівки; *I* – механічний знос; *II* – знос плівки Fe_2O_3 ; *III* – знос плівки Fe_3O_4

Час, який потрібен для руйнування окисної плівки, залежить від міцності зчеплення її з підкладкою і діючих напруг. Згідно з правилом Піллінга–Бедворса зчеплення буде тим краще, чим менше відношення питомих об'ємів окислу й основного металу. Для Fe_2O воно дорівнює 1,72, для Fe_2O_3 – 2,15 і для Fe_3O_4 – 2,1.

Згадані вище дослідження не торкалися особливостей рельєфу шорстких тіл. Тут слід відзначити роботу Яшимото і Цзукіое [12], в якій зроблено розрахунок розмірів плям контакту і їх щільності для однієї моделі шорсткої поверхні. Автори розрізняють механічний знос (за класифікацією фрикційних зв'язків – це когезійний відрив) і знос

плівок. При малих питомих навантаженнях і низьких швидкостях ковзання плівка, в основному, складається з Fe_2O_3 , а при великих тисках і високих швидкостях ковзання – із Fe_3O_4 .

Автори отримали розрахункові формули для обчислювання всіх видів зносу залежно від швидкості ковзання, причому вплив швидкості ковзання розглядається в двох аспектах. З одного боку, швидкість визначає температуру на контакті, отже, і вид окисної плівки; з другого боку, швидкість впливає на товщину окисної плівки. На основі цих залежностей побудовані графіки змінення інтенсивності зношування і товщини окисної плівки (в умовних одиницях) у функції швидкості ковзання (рис. 4). На графіку бачимо, що при швидкостях ковзання: $v < v_1$ – має місце лише знос плівки Fe_2O_3 , бо її товщина більше критичної товщини окисної плівки; при $v_1 < v < v_2$ має місце як знос плівки Fe_2O_3 , так і механізм зносу, причому швидкість останнього значно перевищує знос плівки; при $v_2 < v < v_4$ на контакті досягається температура плавлення та починається знос плівки Fe_3O_4 і частково механічний знос; при $v_4 < v < v_5$ має місце лише знос плівки Fe_3O_4 .

У результаті взаємодії активованих поверхневих шарів сталі з активними елементами середовища–пасиваторами (киснем, сіркою, фосфором, хлором, азотом та ін.) утворюються нові однофазні або гетерофазні тонкоплівкові об'єкти, які отримали назву вторинних структур [13]. Механохімічні процеси формування вторинних структур на поверхнях тертя зумовлені зовнішніми механічними впливами, природою тертьових матеріалів та складом робочих середовищ. У результаті досліджень кінетики механізмів утворення та властивостей трансформованих поверхневих плівок, проведених на різних матеріалах і в різних середовищах, було визначено існування двох основних типів вторинних структур [14]. Поверхні тертя, вкриті вторинними структурами I і II типів, відрізняються за зовнішніми ознаками. Вторинні структури I типу – перенасичені розчини кисню, сірки, фосфору та інших реагентів у металах, мають бездислокаційну будову. Товщина плівок вторинних структур I типу знаходиться в межах 2·10...4·10 НМ (рис. 5) [15].

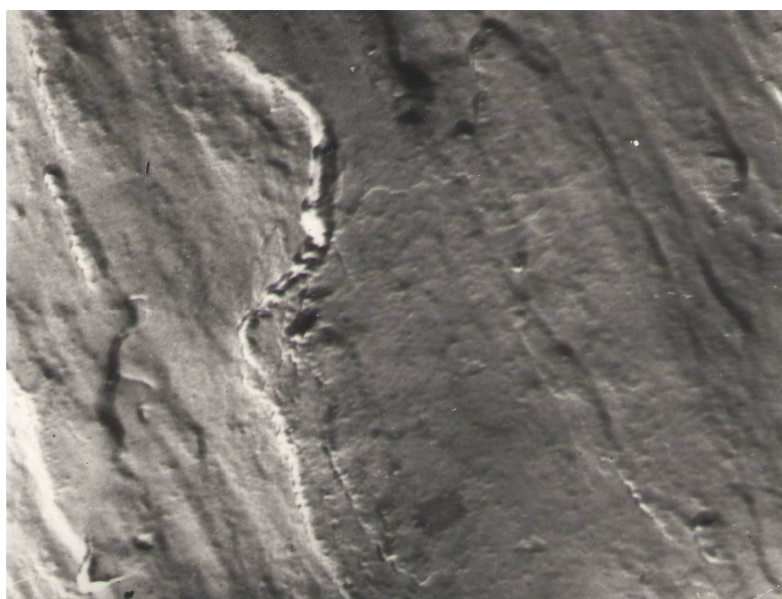


Рисунок 5. Плівки вторинних структур I типу: x10000

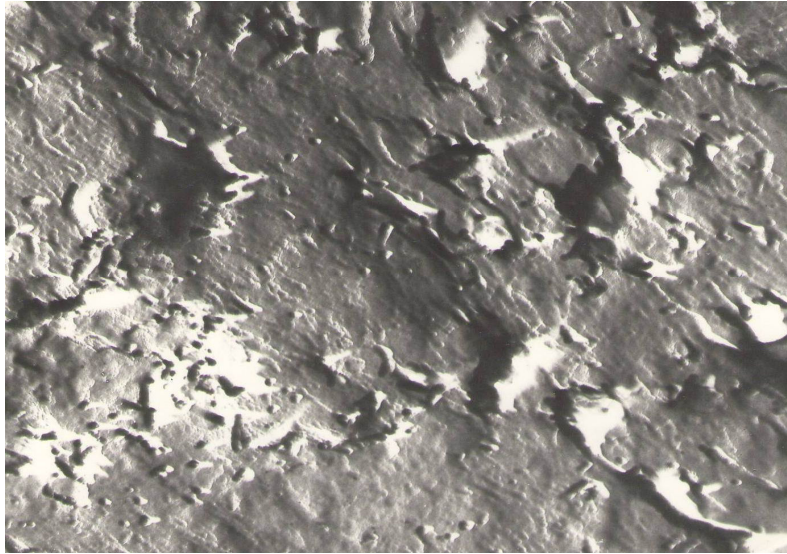


Рисунок 6. Плівки вторинних структур II типу: x10000

Вторинні структури II типу – це хімічні з'єднання нестехіометричного складу. В результаті блокуючого і зміцнюючого впливу цих з'єднань вторинні структури II типу мають аномально високу твердість, при терті відбувається переважно пружна деформація. Товщина плівок вторинних структур II типу знаходиться в межах $4 \cdot 10 \dots 8 \cdot 10$ НМ, вміст реагентів – у межах 10...28% (для сплавів на основі заліза) [13, 14] (рис.6). На поверхнях тертя утворюється оптимальний самовідновлювальний мікрорельєф, який відповідає станам поверхневих шарів і процесам формування вторинних структур I і II типів. Поряд з утворенням шарів, насичених киснем та іншими хімічно активними елементами середовища, виявляється інтенсивна дифузія вуглецю, азоту, міді та інших менш активних елементів (таблиця 1). Більшість дослідників вважали, що утворення zdeформованого шару на поверхнях металів при поліруванні є результат плавлення і переохолодження поверхневих шарів. Вторинні структури I типу також, як і «шари Бейльбі», треба розглядати, як перенасичені тверді розчини кисню в пластично-деформованих, мікроскопічних поверхневих об'ємах металу. Ця точка зору у відповідності з сучасними уявленнями фізики кристалічних матеріалів є найбільш достовірною [16].

Таблиця 1. Вміст кисню і основних хімічних елементів у поверхневому шарі матеріалів деталей машин, які працюють в умовах абразивного середовища

Матеріали і методи зміцнення поверхонь	Вихідний				На робочій грані			
	O	C	Cr	Cu	O	C	Cr	Cu
Сталь 65Г (серійний)	0	-	0,04	0,19	14	-	0,08	0,4
Карбідна сталь ДІ-54 (У20Х6Т2Д)	1,02	0	7,8	0,04	10,1	0	7,3	0,1
Тришарова сталь Х6Т2	1,5	-	6	-	12,4	-	6,8	-
Індукційне наплавлення сплавом ПГ-С27	2,5	1,5	21,5	0	6,8	0	26,7	0,8
Індукційне наплавлення евтектичними покриттями (ЕП) №1	0	-	0,04	-	16,8	-	0	-
Точкове дугове наплавлення порошковим дротом ПП АН170	1,35	-	3,6	-	6,0	-	8,7	-
Виготовлення деталей з композиційних	0	5	3,2	2,6	1,84	3,5	8,9	-

матеріалів КЖХ-70, КХНФ-15								
Мікроплазмове зварювання порошковим дротом ПП-АН148	0	0	9	-	7,1	0	10,1	-
Сплав ВК-8	0,04	-	-	-	0,37	-	-	-

При збільшенні питомої роботи тертя відбувається перехід від вторинних структур I типу до вторинних структур II типу [4, 13]. Для кожного металу і сплаву існують певні критичні умови зовнішніх механічних впливів і середовища, за яких на поверхнях тертя утворюються вторинні структури II типу, які являють собою хімічні з'єднання металу з активними елементами середовища (зокрема, з киснем). Результати досліджень [13] показали, що за механічними властивостями і міцністю зчеплення з основою оксидні плівки, утворені безпосередньо при терті (вторинні структури), суттєво відрізняються від плівок, які утворюються термічним шляхом. При термічному окисленні можливо кілька механізмів утворення плівок [14]. Частіше тонкі плівки утворюються за механізмом Кабрерра-Мотта, відповідно до якого зростання плівки відбувається в результаті дифузії катіонів металу до поверхні, зумовленої градієнтом потенціалу на межі метал–окис. При утворенні плівок великої товщини (окаліни), відповідно теорії Вагнера, окислення зумовлено процесами зустрічної дифузії атомів металу і кисню. На відміну від термічного окислення дифузія при структурно-термічній активації відбувається переважно по дільницях ультрадисперсної структури, що зумовлює формування окислів з компонентами дефектів, які утворюють мікродомени, насичені металом. Тому вторинні структури II типу являють собою окисли нестехіометричного складу з дефіцитом кисню [13]. Зміна хімічного складу і структури вихідного матеріалу за рахунок легування або спеціальних видів обробки призводить до збільшення, або зниження показників механічних властивостей. Залежно від цього рівень активації поверхонь тертя і товщина активованого шару будуть відповідно меншими. Зміна хімічного складу може призвести до збільшення або зниження сплаву до пасивації. Це також може бути причиною зміни типу вторинних структур на поверхнях тертя. Результати ОЖЕ – спектрального аналізу, проведеного в роботі, свідчать про важливу роль хімічних процесів у формуванні структури поверхонь тертя в процесі експлуатації й насиченні поверхонь тертя деталей машин киснем (рис. 7).

Для деталей робочих органів треба виділити дві характерні дільниці, що відрізняються концентрацією досліджуваних елементів (залізо, кисень, вуглець і кремній). Склад нового трансформованого шару суттєво відрізняється від елементного складу основного матеріалу деталі. Глибина трансформованого й окисленого шару деталей робочих органів (леміш плугу, диск борони, лапа культиватора) складає до 0,15...0,20 мкм, концентрація кисню складає в межах 15...18% [17]. Рентгено-структурний аналіз поверхонь зразків заліза і сталі, випробуваних у режимах нормального зношування, схоплювання I і II роду підтверджує, що тільки за нормального зношування вторинні структури є продуктом взаємодії металу з киснем повітря [15]. Утворення вторинних структур заданого типу, що мають оптимальні властивості, суттєво залежить від хімічного складу вихідного матеріалу. Легуючі домішки зумовлюють кінетику утворення й весь комплекс властивостей вторинних структур, що визначають їх міцність і зв'язок із основним матеріалом.

Критичні величини навантажень, швидкостей і температур, що порушують

динамічну рівновагу, суттєво залежать від структури механічних і хімічних властивостей матеріалів, складу та властивостей мастильних середовищ. Додатковим фактором, який впливає на порушення нормального тертя, є наявність абразиву, що неминуче присутній у дільницях контактування спряжень сільськогосподарських машин. Руйнування вторинних структур I і II типу відбувається на лініях (поверхнях) розділу основного матеріалу і нової фази, де зосереджуються (накопичуються) неоднорідності різного виду. В результаті перебудови поверхневих шарів матеріалу структура пристосовується до умов навантаження. Переміщення плівок внаслідок дискретності контакту призводить до руйнування (зношування) матеріалу тільки за критичних умов на деяких дільницях поверхні.

Утворення оксидів на поверхнях тертя багато дослідників розглядали як результат термічних процесів, що протікають у відповідності з класичними механізмами окислення металів, або безпосередньо в процесі тертя, або після тертя, в результаті взаємодії поверхонь з киснем повітря. Складність вивчення механізмів абразивного зношування полягає в неможливості використання традиційних засобів контролю фізико-хімічного стану поверхонь під час протікання фрикційних процесів. У зв'язку з цим вивчення механізмів поверхневого руйнування здійснюється, як правило, на основі непрямих, поточних методів дослідження.

Усі відомі види зношування поверхонь при терті мають яскраві зовнішні ознаки, що дозволили професору Костецькому Б.І. [15] створити альбом зовнішніх ознак, за яким можливо визначити вид поверхневого руйнування. Незалежність складу вторинних структур від номінального контактного тиску є переконливим, оскільки фактичний тиск на дільницях контакту практично не залежить від зовнішнього навантаження.

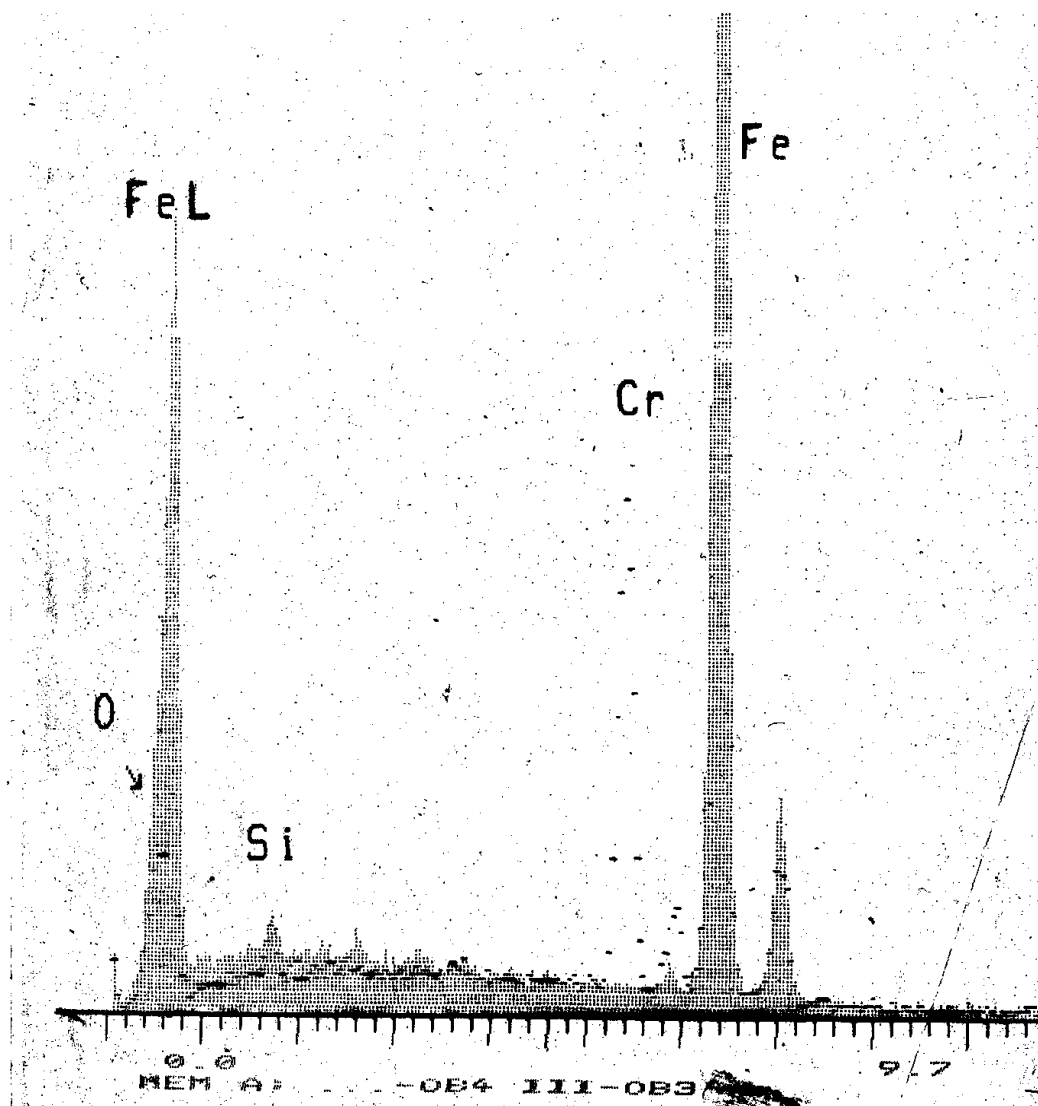


Рисунок 7. Рентгенівські спектри поверхні тертя композиційного матеріалу

Внаслідок дифузії елементів з глибинних шарів до поверхні тертя концентрація того чи іншого легуючого елемента в утворенні вторинних структур суттєво зростає [14]. Вивчено вплив хрому, нікелю, кремнію, алюмінію і вуглецю на швидкість утворення вторинних структур та їх властивості. Зі збільшенням концентрації нікелю в сталі час утворення вторинних структур при терті зростає і, відповідно, перехід до динамічної рівноваги утворення та руйнування вторинних структур уповільнюється [15]. Зі збільшенням концентрації хрому час утворення вторинних структур зменшується, а перехід до динамічної рівноваги прискорюється. Як і у випадку ковзання не змащених поверхонь, кисень і вода відіграють важливу роль при формуванні складу навантажених поверхонь і, відповідно, впливають на їх функціональний стан. Підвищення концентрації кисню чинить вплив на величину зносу, а також несучу здатність ковзких поверхонь. Фактичний склад поверхонь недостатньо вивчено, аналіз літературних джерел показує, що тільки в окремих випадках на зношених поверхнях були ідентифіковані реальні речовини. Ця неможливість визначити хімічний склад зношених поверхонь зумовлена в основному тим, що шари надто тонкі ($\sim 10^{-3}$ мкм) і частіше аморфні. Плівки, крім як об'єкта руйнування, також виконують екранну функцію, захищаючи основний матеріал від пошкодження.

Висновки

1. Хімічний, фазовий склад та властивості вторинних структур залежать від комплексу характеристик вихідної структури матеріалу, але прямо не пов'язані ні з однією окремо взятою властивістю.

2. Вплив легування на фазовий склад вторинних структур вивчено недостатньо. Багаточисленні побічні данні, насамперед результати випробування матеріалів на абразивне зношування, свідчать про те, що зі зміною хімічного складу вторинних структур змінюється їх поверхнева міцність.

3. У багатьох випадках залежно від конструкції вузла тертя на робочій поверхні деталей машин утримується деяка кількість продуктів тертя – частинок зношування. Ці частинки можуть самі деформуватися, а також впливати на процеси тертя і зношування.

Література

1. Кашеев, В.Н. Абразивное разрушение твердых тел [Текст] / В.Н. Кашеев. – М.: Наука, 1970. – 248с.
2. Eyrre, T.S., Wear characteristics of metals, Tribology International, 203 (1976).
3. Надежность и долговечность машин [Текст] / Б.И. Костецкий, И.Г. Носовский, Л.И. Бершадский, А.К. Караулов. – К.: Техніка, 1975. – 408с.
4. Костецкий, Б.И. Сопротивление изнашиванию деталей машин [Текст] / Б.И. Костецкий. – К.: Машгиз, 1959. – 478 с.
5. Fink, M. Wear Oxidation a New Component of Wear. Amer. Soc for Steel Treating, vol. 18, 1930, p.1026–1034.
6. Dies, K. Die Reiboxidations als chemische mechanische Vorgang. Techn. Mitteilungen Grupp. Forschungsberichte, Heft 10, 1942, S.127.
7. Archard, J. F., Hirst W. An Examination of a Mild Wear Process. Proc. Roy. Soc. Lond. Ser A, vol. 236, 1956, p.397–410.
8. Quinn, T.F.J. The Effect of Hot Spot Temperature on the Unlubricated Wear of Stell. ASLE Trans. Vol.10, 1967, p.158–168.
9. Tenwick, N., Earles S.W.E A Simplified Theory for the Oxidative. Wear of Steels. Wear, vol. 18, N5, 1971, p.381–391.
10. Uhlig, H.H. Mechanism of Fretting Corrosion. J. Appl. Mech., vol.21, N4, 1954, p.401.
11. Tao F.F. A Studi of Oxidation Phenomena in Corrosive Weer. ASLE-Trans., vol.12, N2, 1969, p.97–105.
12. Yoshimoto G., Tsukizoe T. On the Mechanism of Wear between Metal Surfaces. Wear, tol. L, N6, 1958, p.472–490.
13. Поверхностная прочность материалов при трении [Текст] / Б.И. Костецкий, И.Г. Носовский, А.К. Караулов и др.; под общ. ред. Б.И. Костецкого. – К.: Техника, 1976. – 296с.
14. Костецкий, Б.И. Механо-химические процессы при граничном трении [Текст] / Б.И. Костецкий, М.Э. Натансон, Л.И. Бершадский. – М.: Наука, 1972. – 170 с.
15. Костецкий, Б.И. Износостойкость и антифрикционность деталей машин [Текст] / Б. Костецкий, И. Носовский. – К.: Техника, 1965. – 206 с.
16. Осипов, К.Ф. Аморфные и ультрадисперсные кристаллические материалы [Текст] / К.А. Осипов. – М.: Наука, 1972. – 76 с.
17. Зазимко, О.В. Закономерности механохимических процессов при абразивном изнашивании сталей [Текст]: автореф. дис. канд. техн. наук. – Киев, 1998. – 19 с.