

ВПЛИВ ВОЛОГОСТІ ПОВІТРЯ НА ТРИБОТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПАРИ ТЕРТЯ

Хмельницький національний університет, ndc@beta.tup.km.ua

Розглянуто вплив вологості повітря на фрикційно-зносні властивості пари тертя у зв'язку із трибохімічними явищами.

Вступ. У природних умовах в атмосфері повітря завжди присутня волога. Розрізняють відносну й абсолютну вологість. Відносна вологість характеризує межовий вміст парів води в газовій атмосфері. Характеристики динамічного контактування поверхонь – коефіцієнт тертя і величина зносу залежать від насиченості навколишнього середовища водяною парою [1–5]. При цьому її вплив на процеси, що відбуваються під час фрикційної взаємодії металів, досить складний.

Результати досліджень [1–4] свідчать, що, з одного боку, зі зростанням відносної вологості спостерігається збільшення зносу і моменту тертя. Підвищення вологості навколишнього середовища може призвести до зростання зносу більше ніж у 200 разів [1]. З іншого боку, в роботах [2; 5] зазначається, що з підвищенням парціального тиску водяної пари величина зносу і момент тертя знижуються.

Показовими є дослідження, проведені при терті м'якого заліза в парі із м'яким залізом [2]. При навантаженні $p = 10^6$ Па зі зростанням відносної вологості збільшується і величина питомого зносу. Продукти зношування являють собою металевий неокиснений порошок, що свідчить про розвиток процесу схоплення. При зниженні навантаження до $p = 5 \cdot 10^4$ Па залежність питомого зносу від відносної вологості набуває іншого вигляду – із підвищенням відносного вмісту води в повітрі знос пари тертя знижується.

Процес тертя і пружно-пластична деформація матеріалу контактуючої пари, що його супроводжує, сприяють суттєвому зростанню фізико-хімічної активності поверхневих шарів. Це створює передумови для протікання трибохімічних реакцій, які належать до потужних релаксаційних процесів, що сприяють дисипації підведеної до твердого тіла механічної енергії. Трибохімічна взаємодія

може відбуватись як між активованим твердим тілом і компонентами навколишнього середовища, так і між твердими тілами, що перебувають у контакті, наприклад, реакції в твердих фазах – схоплювання. При цьому реакційна здатність матеріалу буде визначатись як хімічними властивостями самого матеріалу, так і інтенсивністю механічного впливу. При помірних навантаженнях, вочевидь, переважатимуть трибохімічні реакції матеріалу спряженої пари із хімічно-активними компонентами навколишнього середовища, результатом яких є утворення на поверхні тертя пасивувальних плівок, які захищають основний метал насамперед від адгезійного зношування. І чим нижче в даному випадку інтенсивність гетерогенної взаємодії, яка пов'язана зі складом середовища навколо зони тертя зокрема й вологістю, тим вище може бути опір пари тертя руйнуванню. При важких умовах контактної взаємодії у випадку перевищення рівня підведеної механічної енергії над розсіяною за трибохімічними механізмами за участі середовища в поверхневому шарі буде накопичуватись енергія деформації і при досягненні деякого межового значення, достатнього для активації трибохімічних процесів у твердих фазах, дістане розвиток процес схоплювання. Адгезія також є проявом дисипативних процесів у трибосистемі [6]. І в цьому випадку зниження інтенсивності взаємодії спряжених поверхонь із хімічно-активними компонентами середовища вже сприятиме розвитку між ними схоплення і, як результат, зростанню зношування. Про це свідчать результати досліджень [1], коли умови випробувань були вибрані такими: швидкість ковзання низька, а навантаження високе, що сприяють не стільки активації взаємодії між середовищем і металом, скільки адгезійній взаємодії елементів пари тертя і в тим більшому степені, чим вище вологість повітря.

Підсилення зносу з підвищенням відносної вологості може спостерігатись і умови конденсації парів води на поверхні тертя. Сконденсована пара утворює тонку плівку води, що являє собою електролітичний провідний шар, який сприяє розвитку на контактуючих поверхнях процесів електрохімічної корозії, що зумовлює роз'їдання мікроділянок поверхні, утворення корозійних виразок і як наслідок зростання зносу спряжених пар і моменту тертя [4].

Таким чином, роль вологи, що міститься в повітрі, на формування властивостей трибосистем до кінця не з'ясована. Враховуючи наявність причинно-наслідкового зв'язку між фрикційно-

зносними характеристиками і трибохімічними реакціями [7], значний інтерес становить дослідження впливу вологості повітря на триботехнічні властивості пари тертя у зв'язку із хімічними явищами, що відбуваються в ході динамічного контактування поверхонь.

Мета роботи. Встановлення взаємозв'язку між зносостійкістю пари тертя і трибохімічними явищами, що відбуваються у повітряному середовищі з різною відносною вологістю.

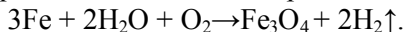
Методика досліджень. Триботехнічні дослідження проводили на установці КИИГА-2 [8] на парі тертя куля–площина, виготовленій із сталі ШХ-15. Вузол тертя розміщувався в герметичній камері. Осьове навантаження становило $P_{oc} = 100$ Н, швидкість ковзання $V = 1,18$ м/с. Для усунення впливу зростання температури в процесі тертя на відносну вологість та запобігання конденсації парів води в камері підтримувалася температура 373 К.

Осушування повітря проводилось його пропусканням крізь колону, заповнену селікагелем. Підвищення вологості відбувалося при проходженні повітря судів із термостатованою до різних температур водою. Контроль відносної вологості середовища здійснювався вологоміром «Волна-2М» і хроматографічно за кількістю водню, що утворюється в результаті взаємодії гідриду кальцію з парами води.

Аналіз зміни компонентного складу газового середовища, викликаного трибохімічними явищами, проводили на хроматографі «Газохром-3101».

Результати досліджень та їх обговорення. Проведені дослідження кінетики трибохімічних реакцій в середовищі повітря із різною відносною вологістю показали лінійний характер залежностей виділення водню, метану, оксиду і діоксиду вуглецю та поглинання кисню (рис. 1). В стаціонарних умовах окиснення сталі водною парою супроводжується значним дифузійним гальмуванням [9], тобто його доступ до поверхні металу утруднений. Такі особливості трибохімічних реакцій, як постійне видалення твердих продуктів реакції й утворення ювенільної поверхні, незначний час контакту середовища із поверхнею тертя між актами дотикання, протікання хімічних процесів у тонких плівках, приводять до усунення дифузійного гальмування, і швидкість взаємодії в пароповітряному середовищі визначається власне хімічною реакцією.

Випробування, проведені в середовищі повітря з різним умістом парів води, показали (рис. 2) значну зміну складу середовища навколо зони тертя внаслідок трибохімічних реакцій. Зі зростанням відносної вологості спостерігається взаємозв'язане підвищення кількості водню, що виділився. Пари води є вихідним компонентом трибохімічної реакції, водень – продуктом. Виділення водню – це результат реакції взаємодії парів води з активованим металом доріжки тертя. До складу сталі ШХ 15 входить і вуглець. Але якщо порівнювати в статичних умовах енергетичні характеристики реакцій, то побачимо, що енергія активації (E_A) реакції окиснення заліза водою становить 56 кДж/моль [9] і значно менше ніж окиснення вуглецю водою, для якої $E_A=146$ кДж/моль. Враховуючи, що досліджувані зразки виготовлені зі сталі ШХ 15, в основі якої лежить залізо і в атмосфері міститься кисень, переважно протікає реакція:



Залежно від складу середовища і зовнішніх умов твердими продуктами реакції можуть бути і гідроксиди $\text{Fe}(\text{OH})_2$ і $\text{Fe}(\text{OH})_3$.

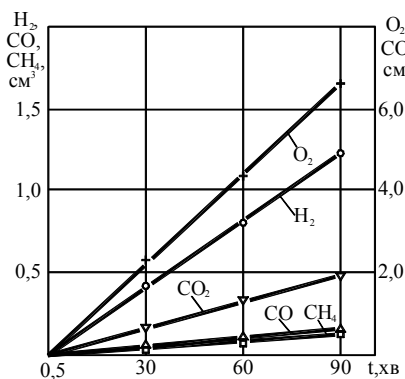


Рис. 1. Кінетика виділення газів і витрачання кисню при терті в середовищі повітря ($\omega = 63\%$)

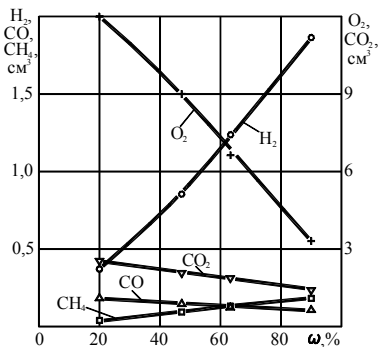
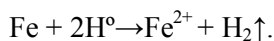


Рис. 2. Залежність кількості газів, що виділилися під час тертя, і витрачуваного кисню від відносної вологості повітря

Однією зі стадій гетерогенних реакцій є адсорбція реагенту на твердій поверхні. Між кількістю адсорбованої речовини (g) та її парціальним тиском (p) у газовій фазі існує пропорційна залежність, яка для неоднорідних поверхонь зазвичай виражається ізоте-

рмою Фрейндліха $g = c \cdot p^{\frac{1}{n}}$. Із підвищенням відносної вологості відбувається збільшення парціального тиску парів води, що призводить до відповідного зростання трибосорбції води на утвореній в процесі тертя свіжій поверхні. В результаті підвищується число одиничних актів взаємодії води з активованим металом доріжки тертя і зростає об'єм, а отже, і швидкість виділення водню.

Утворення водню може відбуватись як у результаті безпосередньої хімічної взаємодії води з активованим матеріалом, так і в результаті дисоціації молекул води на активних центрах доріжки тертя, після чого атоми водню, що утворилися, молялізуються і виділяються в газову фазу у вигляді молекул. Хімізм процесу можна виразити схемою:



Зниження парціального тиску кисню при підвищенні відносної вологості повітря зумовлює уповільнення його трибодсорбції на поверхні тертя, в результаті чого спостерігається зменшення витрачання O_2 (див. рис. 2). Наслідком зниження доступу кисню в зону тертя є уповільнення хімічних процесів з його участю, про що свідчать, зокрема, зменшення кількості оксиду і діоксиду вуглецю, що утворилися (див. рис. 2).

Зростання об'єму виділеного метану, із підвищенням відносної вологості середовища (див. рис. 2) є результатом збільшення парціального тиску водню, що являє собою один із компонентів трибохімічного синтезу CH_4 . У присутності водяних парів відбувається прискорення реакції взаємодії вуглецю з воднем [10].

В умовах динамічної взаємодії фрикційно-зносні характеристики пари тертя чутливі до присутності в повітрі водяної пари (рис. 3). При зростанні відносної вологості відбувається зниження величини зносу і моменту тертя.

Взаємодія металу поверхні з парами води може відбуватись у вигляді електрохімічних і хімічних реакцій. Для протікання електрохімічного процесу на поверхні твердого тіла необхідна наявність шару електроліту, яким може виступати конденсована волога [11]. Конденсація парів води і розвиток електрохімічних реакцій призводить до підсиленої корозії поверхні металу і зниження зносостійкості пари тертя. Але встановлено [12], що в статичних умовах

за температур вище 373–393 К гази, що містять пари води, не викликають корозії вуглецевих сталей, якщо не відбувається конденсація рідини і не можуть протікати електрохімічні процеси. Проведені дослідження [11] показали, що, починаючи з температури поверхні 333 К, вода, раніше була конденсована, починає на ній, інтенсивно випаровуватись, і цей процес екстремальний при температурі сушіння порядку 378 К. Умови наших випробувань: висока об'ємна температура всередині камери $T = 373$ К, достатньо жорсткі швидкісно-навантажувальні режими роботи вузла тертя, що зумовлюють розігрів поверхонь тертя до значних температур (аналіз кольорів мінливості [13] на зразках тертя після випробувань свідчать про те, що температура на робочій поверхні зростала до 500 К і вище), не сприяють конденсації парів води і утворенню шару електроліту. Таким чином, в умовах експерименту взаємодія металу пари тертя й парів води відбувається за механізмом газової, а не електрохімічної корозії.

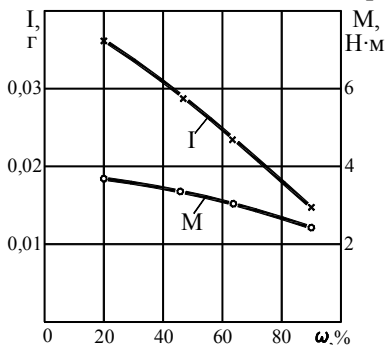


Рис. 3. Залежність зносу і моменту тертя від відносної вологості повітря

Окиснення поверхонь тертя парами води відбувається або через взаємодію з киснем, що виділяється при дисоціації молекул води, або через пряму реакцію. В більшості випадків продуктами окиснення металів і сплавів у парах води при високій температурі, яка безумовно розвивається на контактуючих площинах у процесі тертя, є окисли [10]. Властивості утворених твердих продуктів реакції залежать від складу газового середовища. Чим більше парів води і менше парціальний тиск кисню, в умовах стаціонарного високотемпературного окиснення [14], тим вище вміст у твердих продуктах взаємодії окисненого двовалентного заліза, що

пов'язано із нестачею кисню для більш повного протікання хімічних реакцій. Аналогічні залежності ми спостерігаємо і при динамічному контактуванні поверхонь тертя.

Аналіз співвідношень компонентів трибохімічних реакцій (рис. 4) виявив, що із підвищенням відносної вологості повітря з 20 до 90 % відношення об'єму кисню, витраченого на окиснення металу (O_2^Σ), до величини зносу пари тертя (I_{me}) O_2^Σ / I_{me} , знижується відповідно з 284 cm^3/g до 209 cm^3/g . Продуктами окиснення сталі є сполуки із вмістом трихвалентного заліза (Fe_2O_3), двовалентного (FeO) і змішаного стехіометричного складу (Fe_3O_4). При цьому вміст кисню у сполуках різний і становить для гематиту (Fe_2O_3) – 300,9 cm^3/g , магнетиту (Fe_3O_4) – 267,3 cm^3/g та вюститу (FeO) – 200,1 cm^3/g .

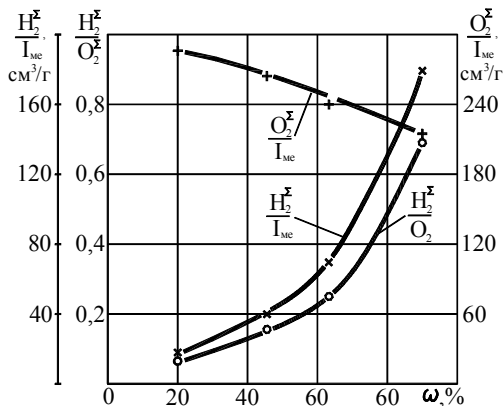


Рис. 4. Залежність співвідношень трибохімічних компонентів від відносної вологості повітря

Отже, в умовах динамічної контактної взаємодії поверхонь при низькому вмісті в повітрі води ($\omega = 20\%$) утворюються окисли із переважно тривалентним залізом – гематит, а також частково магнетит. Зі зростанням відносної вологості набувають превалюючого розвитку процеси окиснення заліза до двовалентного – від магнетиту до вюститу. Масильна здатність окислів заліза залежить від хімічного складу і підвищується в ряду: $Fe_2O_3 \rightarrow Fe_3O_4 \rightarrow FeO$ [15]. Крім того, захисна плівка в присутності парів води утворюється швидше ніж чисто оксидний шар на повітрі [16], що має велике значення в процесі тертя, коли її регенерація має відбуватися за ду-

же короткий проміжок часу. Таким чином, при зростанні відносної вологості повітря високі антифрикційні та зносостійкі властивості вюститу, що при цьому утворюється, та його значна регенераційна здатність, зумовлена присутністю парів води, сприяють зниженню зносу і моменту тертя контактуючих поверхонь.

Висновки. Отже, прояв триботехнічних властивостей пари тертя в умовах різного вмісту в повітрі вологи пов'язаний зі зміною характеру, інтенсивності трибохімічних реакцій та складу продуктів взаємодії. Підвищення відносної вологості призводить до інтенсифікації трибоокиснення металу поверхні парами води, про що свідчить зростання величини співвідношення H_2^{Σ} / I_{me} , а вільним киснем відповідно зниження. Енергетичні витрати на хімічну взаємодію металу з киснем, який перебуває у зв'язаному стані (H_2O), перевищують витрати за участі вільного кисню (O_2). Тож за однакових умов трибоконтакту зі зростанням вмісту в середовищі парів води на спряжених поверхнях кількість, а відповідно і товщина утворених продуктів взаємодії, які при роботі вузла тертя зношуються, буде зменшуватися. При цьому збільшення в повітрі парціального тиску води призводить до нестачі кисню і, як наслідок, зниження повноти окиснення з утворенням на контактуючих елементах окислів двовалентного заліза. В результаті підвищення відносної вологості повітря з 20 до 90 % обумовлює зростання зносостійкості пари тертя в 2,5 разу та зниження моменту тертя.

Список літератури

1. *Утц Н.* Общие представления о процессах в поверхностных слоях при сухом трении стали по стали / Н. Утц, К.Зоммер, К. Рихтер // Теория трения, износа и проблемы стандартизации. – Брянск: Приокское, 1978. – С. 90–110.
2. *Uetz H.* Einfluß der Luftfeuchtigkeit auf den Gleitverschleiß metallischer Werkstoffe // Verstoffe und Korrosion. – 1968. – Het 8. – P. 665–676.
3. *Мадаминов Б.А.* Исследование влияния влажности воздуха на степень наводораживания стали У8 при трении и ее износ / Б.А. Мадаминов, А.В. Сахаров // Тезисы докладов ВНТК «Влияние среды на взаимодействие твердых тел при трении». – Днепропетровск, 1981. – С. 144–145.
4. *Ковыришин О.Н.* Влияние влажности воздуха на трение в шарикоподшипниках // Среда и трение в механизмах. – Таганрог, 1970. – С. 56–60.

5. *Дедков А.К.* Влияние влагосодержания атмосферы на фрикционно-износные характеристики пар трения // Известия вузов: Машиностроение. – 1975. – № 1. – С. 65–69.
6. *Тейбор Д.* Трение как диссипативный процесс // Трение и износ. – 1994. – Т. 15, №2. – С. 296–315.
7. *Шевеля В.В.* Трибохимия и реология износостойкости / В.В.Шевеля, В.П. Олександренко. – Хмельницкий: ХНУ, 2006. – 278 с.
8. *Аксенов А.Ф.* Трение и изнашивание металлов в углеводородных жидкостях. – М.: Машиностроение, 1977. – 152 с.
9. *Розовский А.А.* Кинетика топохимических реакций. – М.: Химия, 1974. – 221 с.
10. *Кубашевский О.* Окисление металлов и сплавов / О. Кубашевский, Б. Гопкинс. – М.: ИЛ, 1955. – 312 с.
11. *Розенфельд И.Л.* Атмосферная коррозия металлов. – М.: АН СССР, 1960. – 372 с.
12. *Климов И.Я.* Коррозия химической аппаратуры и коррозионно-стойкие металлы. – М.: Машиностроение, 1967. – 468 с.
13. *Полевой С.Н.* Упрочнение металлов / С.Н. Полевой, В.Д. Евдокимов. – М.: Машиностроение, 1986. – 320 с.
14. *Тихомиров В.И.* Окисление железа в водяном паре, пароводородных и паро-кислородных смесях при высоких температурах / В.И. Тихомиров, В.В. Ипатьев, А.А. Гофман // ДАН СССР. – 1954. – Т. 2. – С. 305–306.
15. *Костецкий Б.И.* Трение, смазка и износ в машинах. – Киев: Техника, 1970. – 395 с.
16. *Хайнике Г.* Трибохимия. – М.: Мир, 1987. – 584 с.

Стаття надійшла до редакції 26.03.09.