

УДК 621.891

DOI: 10.18372/0370-2197.4(97).16956

В. С. СКРИПНИК<sup>1</sup>, Н. М. ФІДРОВСЬКА<sup>2</sup>, І. О. БЕКІШ<sup>1</sup>, О. С. БУРАВА<sup>1</sup>,  
В. В. НИЦУК<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Івано-Франківський національний технічний університет нафти та газу, Україна

<sup>2</sup>Харківський національний автомобільно-дорожній університет

## КРЕКІНГ-ПРОЦЕС ПРИ ЕЛЕКТРОТЕРМОМЕХАНІЧНІЙ ФРИКЦІЙНІЙ ВЗАЄМОДІЇ В ПАРАХ ТЕРТЯ (ЧАСТИНА 2)

Встановлено, що рушійною силою ендо- та екзотермічних хімічних реакцій, що відбуваються у верхньому шарі полімерної накладки, а також окислювально-відновлювальних процесів на плямах контактів мікроставупів металополімерних пар тертя є хімічні потенціали, що виникають при електротермомеханічній фрикційній взаємодії робочої поверхні металевого елемента тертя з верхнім шаром електроліту і нижнього шару електроліту з поверхню кювета накладки. Результати досліджень дозволили встановити і прогнозувати наступне: електрони, що утворюються в електроліті, сильно орієнтовані і їх ефективний дипольний момент великий, що призводить до інверсії множини струмів за схемою «полімер-метал»; трибоадсорбований газ адсорбує робочою поверхню металу, після чого відбуваються його хімічні перетворення; при швидкості трибосорбції та трибореакції одного порядку хімічна реакція зміщується у бік робочої поверхні металевого елемента тертя; зміна ступеня дисперсності та компактності фаз, що виникає у верхньому шарі полімерної накладки, що містять аморфні та склоподібні речовини, істотно впливає на їх хімічну активність; при цьому необхідно враховувати зміну енергії Гіббса; зміна енергії Гіббса поверхневого шару полімерної накладки пов'язана з його температурою та теплоємністю, які впливають на напрямок зміщення рівноваги хімічної реакції. У результаті дослідження термокінетичної взаємодії плям контактів мікроставупів робочих поверхонь при терті в різних середовищах і впливу різних факторів на крекінг-процес у верхніх шарах накладок встановлено наступне: ефекти іонної адсорбції істотно різняться при суто електростатичній або так званій специфічній (обумовленої ковалентною взаємодією з металом) адсорбції. Її граничним випадком є адсорбція з повним переносом заряду і переходом іона до складу атома; збільшення поверхневої температури сприяє зростанню об'єму виходу продуктів ендо-термічних реакцій з верхнього шару полімерної накладки, а також константи рівноваги, що супроводжується виділенням теплоти. При цьому відповідно до принципу рухомої рівноваги Вант-Гоффа відбувається пружно-пластична деформація мікроставупів робочої поверхні металевого елемента тертя. Зниження поверхневої температури пар тертя сприяє інтенсифікації екзотермічної реакції з дисоціацією іонів поверхневого шару полімерної накладки; збільшення питомих навантажень у парі тертя призводить до зменшення виходу газоподібних продуктів, у тому числі ненасичених карбонів, що з'єднуються з воднем, з їх міжконтактного зазору; при цьому питомі навантаження в парах тертя безпосередньо залежать від їхнього коефіцієнта взаємного перекриття; для досягнення максимального ступеня перебігу реакції перетворення необхідний надлишок вихідних речовин; при цьому якщо витрата одного з них з експлуатаційних міркувань обмежена, то зростання вихідної концентрації інших реагентів збільшує кількість молей продуктів, що утворюються, і тим самим ступінь протікання реакції.

**Ключові слова:** випробувальний стенд, пара тертя, фрикційний контакт, міжконтактний об'єм, щільний ефект, крекінг-процес.

**Вступ.** Дослідження показали, що якісний та кількісний склад газових середовищ, що оточують фрикційні металеві елементи, значно впливає на їх триботехнічні характеристики. Експериментально встановлено, що при роботі пари тертя «метал-полімер» в кисневмісних газових середовищах у певних діапазонах зміни параметрів тертя досягається її максимальна зносостійкість і відсутнє схоплювання, внаслідок утворення на третьових поверхнях окисних плівок. Існуючі дослідження процесів тертя та зношування металевих тіл у газових середовищах носять, в основному, експериментальний характер і в більшості випадків розглядають режим тертя, при якому швидкість ковзання та середньоповерхнева температура не змінюється у часі.

**Аналіз літературних даних та постановка проблеми.** Механізм газодинаміки у фрикційному контакті теоретично розглянуто у роботі [1]. Передбачається, що існують два способи проникнення газового середовища на фрикційні поверхні пар тертя: перший, через контактний зазор (так званий щілинний ефект) і другий шляхом адсорбування на відкритих для газу ділянках контакту тертя (адсорбційний ефект) – у разі неповного перекриття пар тертя, що спостерігається в гальмівних пристроях різних видів. Кількість повітря, що проникає в контакт, до складу якого входить кисень, визначає інтенсивність термоокислювальних, деструктивних та інших хімосорбційних процесів. Крім того, у роботі [2] вказується на наявність ефекту перекачування середовища.

Поверхневі шари будь-якого тіла за своїми властивостями значно відрізняються від внутрішніх шарів, тому що їх енергія перевищує значення енергії елементарних об'ємів речовини у внутрішніх шарах. На характеристики поверхневих шарів різних матеріалів також суттєво впливає газове середовище, що оточує об'єкт. Лабораторні дослідження закономірностей надходження газового середовища ззовні до міжконтактного простору поверхонь тертя дозволить створити фізико-хімічну та математичну модель міграції та довкілля на фрикційний контакт.

Фізико-хімічні характеристики середовища та її склад безпосередньо пов'язані зі зносо-фрикційними властивостями матеріалів [4]. При контакті з атмосферою, найважливішими, з погляду розвитку адсорбції, компонентами середовища є: азот, кисень, водень. Ці компоненти є у вигляді двоатомних молекул, а не окремих атомів. Вони осідають на поверхнях і можуть вступати до хімічних сполук з поверхневими шарами фрикційних матеріалів.

Процеси з приєднанням електронів, що протікають на мікровиступах металевої поверхні, є катодом, відносяться до відновлювальних, а процеси з втратою електронів, що протікають на мікровиступах полімерної накладки (тобто на анодах) – до окислювальних. Окисно-відновні процеси при електротермомеханічній фрикційній взаємодії мікровиступів пар тертя відносяться до складних процесів.

Дослідження енергонавантаженості плям контактів мікровиступів пар тертя «метал – полімер» при електротермомеханічній фрикційній взаємодії [5-8] показало, що електротеплопровідність тонких плівок мікровиступів керується цілим рядом факторів, до яких відносяться імпульсні питомі навантаження та динамічний коефіцієнт тертя.

Трибологія досліджує зв'язок між імпульсними питомими навантаженнями на мікровиступах пар тертя «метал-полімер» та перетвореннями у верхньому шарі полімерної накладки при їх фрикційній взаємодії. При цьому виникає природне

питання: які необхідно додати імпульсні питомі навантаження до мікроставів, щоб мінімізувати хімічні ефекти при електротермомеханічній фрикційній взаємодії плям контактів.

У [9] викладено уявлення про основні фактори, що визначають електронний транспорт у металевих плівках, товщина яких порівняна з довжиною вільного пробігу електронів провідності. Наведено аналіз методів вимірювання електричного опору тонких плівок у розчинах електролітів. Особливий акцент зроблено на використання методу поверхневої провідності вивчення адсорбції атомів водню, кисню, іонів розчину органічних сполук (у тому числі з повним перенесенням заряду) та плівок провідних полімерів. Розглянуто специфіку резистивних електродів як систем із розподіленими параметрами.

Для електрохімічних систем опір плівки чутливий до зміни електричного стану поляризованої поверхні (ефект електричного поля), а також до кількості та стану адсорбованих частинок та до природи адсорбованого зв'язку. Щоб встановити вплив частинок адсорбату на провідність, ймовірно, вимірювання необхідно повторити в умовах мінливості електричного заряду плям контактів мікроставів, який до кінця електротермомеханічної фрикційної взаємодії стає максимальним. Тому в цих випадках необхідно здійснювати дистанційне перемикання взаємодіючих мікроставів поверхонь тертя за схемами "метал-полімер" та "полімер-метал" для підтримки постійним їх електричний опір [10].

В [11] виконано тривимірне моделювання розриву тонких плівок рідини внаслідок ефекту Марантоні, що знаходяться на плоскій твердій поверхні, яка змочується. Розрив тонких плівок рідини пов'язаний із зміною їх поверхневого натягу внаслідок підвищення температури, внаслідок чого виникає перебіг (термокапілярний ефект). При цьому встановлено, що в плівці виникає течія рідини, що розходить, яка призводить до розриву плівки в її центрі там, де температура максимальна.

У [5] запропоновано метод промислових досліджень пар тертя стрічково-колодкових гальм бурових лебідок, спрямованих на запобігання виділенню водню зі сталевих поверхні обода шків електричним полем з однойменними позитивними зарядами, що обмежують рух іонів водню.

**Постановка задачі.** У цій публікації розглянуто такі питання стосовно вирішуваної проблеми:

- характеристика електролітів;
- взаємодія процесів трибодеструкції з навколишнім середовищем;
- обговорення результатів.

**Мета роботи** – дослідити крекінг-процес при електротермомеханічній фрикційній взаємодії в парах тертя гальм.

**Характеристики електролітів.** Електроліти – речовини, розчини (або розплави), які проводять електричний струм. Переносниками електрики є іони, що утворилися внаслідок дисоціації молекул електроліту. Здатність поділу молекул на іони у різних речовин неоднакова. Кількісно вона оцінюється ступенем дисоціації  $\alpha$ , яка визначається відношенням числа дисоційованих молекул до розчинених молекул.

За величиною  $\alpha$  електроліти поділяються на слабкі та сильні. Сильні – це ті, які практично повністю дисоційовані ( $\alpha$  велика) і тому добре проводять струм, слабкі електроліти дисоціюють незначно ( $\alpha$  мала) і, внаслідок цього, проводять струм гірше.

Електропровідність розчинів електролітів залежить від концентрації, тиску, температури, природи речовини та розчинника, в'язкості, діелектричної проникності. Механізм та особливості поведінки іонів описуються теоремою Арреніуса та Дебая-Хюккеля.

Для розчинів електролітів розрізняють два основні види електропровідності: питому  $\kappa$  і еквівалентну  $\lambda$ . Питомою електропровідністю називається електропровідність  $1 \text{ см}^3$  розчину, який знаходиться між двома паралельними  $1 \text{ см}$  один від одного. Встановлено, що  $\kappa$  - провідність постійного об'єму розчину ( $1 \text{ см}^3$ ) зі змінною кількістю розчиненого електроліту. В той же час - провідність різних об'ємів розчину, що містять постійну ( $1 \text{ г-екв}$ ) кількість електроліту. Між собою вони пов'язані рівнянням

$$\lambda = \frac{1000 \cdot \kappa}{C}, \quad (1)$$

де  $C$  – концентрація розчину, виражена в г-екв/л.

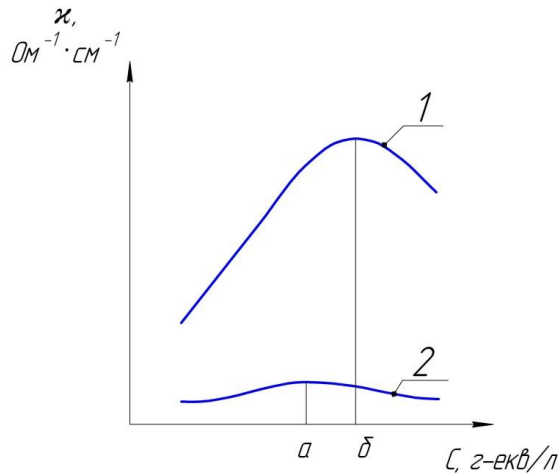


Рис. 1. Залежність питомої електропровідності від концентрації розчину електроліту: 1 та 2 – сильний та слабкий електроліт.

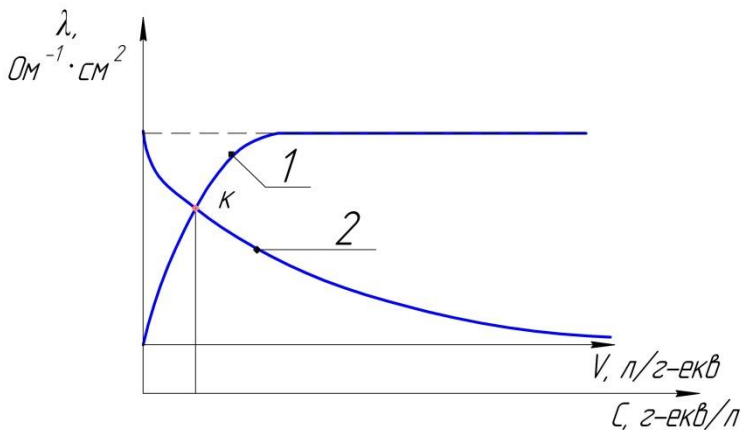


Рис. 2. Залежність еквівалентної електропровідності від розведення розчину (1) та його концентрації (2)

Із графічних залежностей, наведених на рис. 1 і 2 слідує:

– в області малих концентрацій  $\kappa$  та із зростанням концентрації збільшується

(оскільки із збільшенням концентрації зростає кількість іонів в  $1 \text{ см}^3$  розчину), досягає максимального значення, а потім зменшується. У розчинах сильних електролітів це зменшення пояснюється уповільненням руху іонів через релаксаційний ефект і ефект електрофоретичного гальмування, а в розчинах слабких електролітів – зниженням ступеня дисоціації; при цьому спостерігається зміщення максимуму на величину  $ab$  (рис. 1);

– розгляд впливу концентрації розчину на величину  $\lambda$  зручніше почати з аналізу залежності еквівалентної електропровідності від розведення розчину. Розбавлення (розведення) розчину  $V=1/C$  – величина, обернена концентрації  $C$ . Як показують досліди, із збільшенням розбавлення (зменшенням концентрації) еквівалентна електропровідність зростає та досягає деякого граничного значення, як показано на рис. 1. Це граничне значення  $\lambda$  називається електропровідністю при нескінченному розбавленні та позначається  $\lambda_\infty$  (або  $\lambda_0$ ); точка  $K$  (перетин кривих 1 і 2) характеризує однакову рухливість іонів в електроліті (рис. 2);

– з підвищенням температури збільшуються обидва види електропровідності. Це пояснюється збільшенням швидкості руху іонів через зменшення в'язкості середовища, часткову дегідратацію іонів (зменшення радіуса гідратованого іона) та збільшення ступеня дисоціації (для слабких електролітів).

**Взаємодія процесів трибодеструкції з навколишнім середовищем.** Відомо, що процес адсорбції поділяється на два види – хімічний та фізичний. Рушійна сила адсорбованого процесу, з одного боку, визначається енергією твердого тіла, з другого – активністю адсорбату, тобто атомів і молекул довкілля.

При зближенні адсорбату з поверхнею твердого тіла енергія взаємодії змінюється відповідно до графічної залежності, яка наведена на рис. 3. Точка  $l_0$  на осі абсцис відповідає рівноважній відстані між адсорбентом (поверхнею твердого тіла) та адсорбатом.

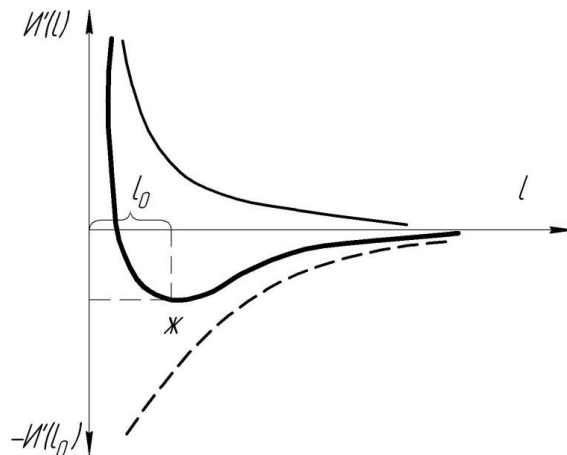


Рис. 3. Енергія адсорбції в залежності від відстані між адсорбентом та адсорбатом

Значення, що відповідає рівноважному стану енергії зв'язку (точка Ж ( $l_0$ )) визначаються природою адсорбату та адсорбенту. Фундаментальна залежність може бути використана для розгляду як фізичної, так і хімічної адсорбції на поверхні будь-якого твердого тіла. Відповідно до цієї залежності на поверхнях відбувається утворення плівок всіх типів. При утворенні поверхневих сполук, наприклад, у процесі окислення, на першому етапі, за хімічною реакцією настане

фізична адсорбція.

Реальні поверхні металів покриті хемосорбованими газами, а в кисневмісному середовищі, як правило, спостерігається і їх окислення. У навколишньому середовищі, крім кисню, містяться й інші компоненти, але на поверхні найчастіше знаходиться кисень. Процес хемосорбції газів продовжується до досягнення певної концентрації адсорбату, при якій настає насичення та утворюється мономолекулярний шар. Потім припиняється, і може тривати лише фізична адсорбція або утворення об'ємної окислювальної плівки, за умови, що вистачить енергії для реакції окислення. Поняття хемосорбції стосується тільки двомірних утворень.

Необхідно відзначити, що характерною особливістю хемосорбції, що відрізняється від хімічних реакцій, є властивість оборотності зі збереженням хімічного складу адсорбенту. Причому енергія хемосорбційної взаємодії значно більша, ніж енергія фізичної адсорбції. Кількість газового середовища, що припадає за одиницю часу на одиницю номінальної поверхні тертя за рахунок адсорбованого ефекту, визначається за залежністю [8]

$$Q_a = \frac{k_1 V_a \omega n}{2\pi K_{ac}}, \quad (2)$$

де  $Q_a$  – об'єм газового середовища;  $k_1$  – коригуючий коефіцієнт, що враховує різницю між площами істинної та номінальної поверхні адсорбції з урахуванням глибини її проникнення в нерівності;  $V_a$  – об'єм (зведений до нормальних умов) молекулярного шару газового середовища, адсорбованого на  $1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$  гладкою поверхнею;  $\omega$  – кутова швидкість відносного руху зразків;  $n$  – число елементів азбофрикційної пластмаси, що становлять вузол тертя.

На адсорбенті адсорбування газових молекул відбувається, в основному, мономолекулярний шар. Утворення такого шару визначається виразом вигляду:

$$\left( \frac{1 - K_{ac}}{in\omega} \right) \geq \frac{1,1}{0,48 \cdot 10^{20} \frac{P}{N} \sqrt{MT} + e \frac{\Delta H}{RT}}, \quad (3)$$

де  $P$  – тиск, Па;  $N$  – число молекул газу в суцільному моношарі на  $1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$  поверхні;  $M$  – молекулярна маса газу, кг;  $T$  – абсолютна температура газу, К;  $\Delta H$  – теплота адсорбції;  $R$  – газова стала.

Оцінивши баланс кількості повітря, що надходить у зазор між мікроставами пар тертя і газами, які виділилися при трибодеструкції з робочого шару полімерної накладки згідно методик [8-13] перейшли до процесу розпаду фенолформальдегідного матеріалу під дією повітря і без його доступу. При низьких температурах (570 – 670 К) виділяються лише рідкі продукти за рахунок виділення непрореагованих їх вихідних мономерів і розщеплення молекул смоли [6]. З підвищенням температури збільшується глибина розпаду та відсоток виходу газоподібних речовин, а відсоток рідких продуктів знижується. Причому за високих температур (670 – 770 К) вихід CO та органічних газоподібних продуктів зменшується з допомогою підвищеного окислення. Залежність відсоткового вмісту газів у продуктах розпаду від температури відбувається через максимум при температурі 670 К. Продукти розкладання, які виділяються, зокрема, рідини, що утворюються на поверхні тертя, можуть створювати умови граничного або напіврідкого тертя з низьким динамічним коефіцієнтом тертя, при цьому утворюються газоподібні продукти деструкції CO<sub>2</sub> та інші, які можуть грати роль «газової подушки», сприяють зниженню динамічного коефіцієнта тертя.

Газоподібні органічні продукти деструкції, які утворюються (речовини типу  $\text{CH}_4$ ), що згоряють при температурі 1070 К, створюють умови для спалахів і горіння фрикційного матеріалу в процесі гальмування при високих температурах. Відновлювальне середовище, що запобігає перебігу хімічних реакцій з неорганічними інгредієнтами, створюється при утворенні  $\text{CO}$ . Вплив щільного ефекту на доставку кисню в зону тертя з підвищенням температури знижується, особливо інтенсивно починаючи з позначки 670 К.

Виходячи з поставленого завдання досліджень у процесі експерименту реєструвалося різниця тисків  $\Delta P$  у міжконтактному просторі, щодо тиску навколишнього середовища, а також температури поверхонь тертя та моменту тертя. Нижче наведені дані є усередненими значеннями випробувань семи пар зразків досліджуваних матеріалів: сталі 35Л і ретинакса ФК-24А. Випробування проводилися при питомому навантаженні  $P = 1,0$  МПа, зміна швидкості обертання відбувалася поступово при  $V = 5,0; 10,0; 15,0; 20,0; 25,0$  м/с.

Узагальнення та математична обробка даних експерименту проводилася з урахуванням інтенсифікації процесу окислення при зростанні поверхневої температури, а отже, з підвищенням режимів навантаженості та тривалості контактування, при терті азбopolімерних матеріалів пропорційно зношування [11-13].

На рис. 4 видно, що у міжконтактному просторі пари ФК-24А – сталь при початкових випробуваннях, а також при повторних, з'являється надлишковий тиск газоподібних продуктів деструкції. Різниця між початковими та повторними випробуваннями в даному випадку є свідченням зміни фізико-механічних властивостей поверхонь, насамперед як найуразливішої від температурного впливу.

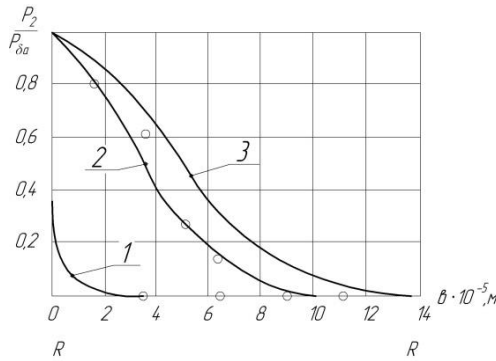


Рис. 4. Розподіл відносного тиску повітря на доріжці тертя залежно від шорсткості кільцевих зразків: 1 – 0,5 мкм; 2 – 3,2 мкм; 3 – 6,3 мкм

Залежність тиску газу міжконтактному просторі від температури показує наявність прямої пропорційності (рис. 5) в зазначених діапазонах навантажень. Зі зростанням температури тиск газу зростає як за початкових, і при повторних випробуваннях.

На рис. 5, 6 показані залежності лінійного та масового зношування від швидкості ковзання. З них видно, що в інтервалі температур (480-680) К спостерігається різка зміна фізико-механічних властивостей поверхневих шарів ФК-24А. Фенолформальдегідні полімерні матеріали починають набухати, лінійні розміри збільшуються. Одночасно їхня маса різко зменшується, що призводить до зростання масового зношування. Це досить повно свідчить про переважання фізико-хімічних процесів над фізико-механічними через виходу на поверхню тертя рідкісних продуктів деструкції. Воно призводить до заповнення

міжконтактного простору, що сприяє повному виродженню щілинного зазору та ефекту перекачування між поверхнями тертя.

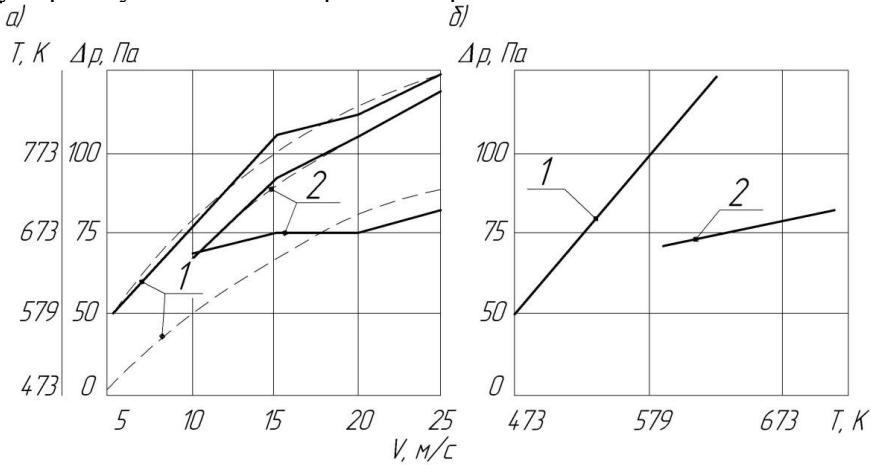


Рис. 5. Закономірності зміни: температури поверхні тертя та тиску газу від швидкості ковзання (а) та тиску газу від температури поверхні тертя (б) у міжконтактному обсязі: 1, 2 – випробування вихідне, повторне

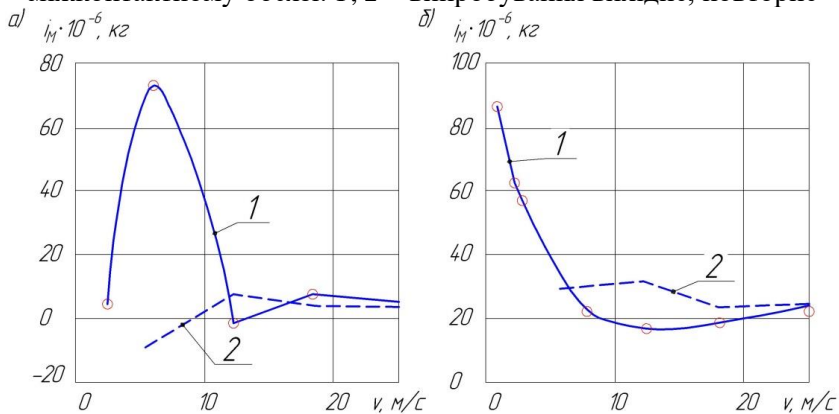


Рис. 6. Закономірності зміни відносного лінійного (а) та масового (б) зношування ФК-24А від швидкості ковзання: 1, 2 – випробування вихідне, повторне

Результати газодинаміки при повторних дослідженнях тих самих пар тертя відрізняються від значень, отриманих при випробуванні нових зразків у бік зниження надлишкового тиску  $P$ . Аналізуючи сутність цих змін, було проведено серію експериментів щодо визначення зміни густини фенолформальдегідних полімерних матеріалів за товщиною досліджуваного зразка залежно від об'ємної температури та тривалості нагрівання.

Необхідна температура поверхні ФК-24А у процесі дослідження досягалася шляхом зміни швидкості ковзання та навантаження на парі тертя. Визначення густини відбувалося шляхом зважування зразків до та після пошарового зняття на плоскошліфувальному верстаті контрольованого шару ФК-24А.

**Обговорення результатів.** Рушійною силою ендо- та екзотермічних хімічних реакцій, що відбуваються у верхньому шарі полімерної накладки, а також окислювально-відновних процесів на плямах контактів мікроступів металополімерних пар тертя є хімічні потенціали, що виникають при



електротермомеханічній фрикційній взаємодії робочої поверхні нижнього шару електроліту із поверхнею кювету накладки.

Результати досліджень дозволили встановити і прогнозувати наступне: електрони, що утворюються в електроліті, сильно орієнтовані і їх ефективний дипольний момент великий, що веде до інверсії множини струмів за схемою «полімер-метал»; трибоадсорбований газ адсорбує робочою поверхнею металу, після чого відбуваються його хімічні перетворення; при швидкості трибосорбції та трибореакції одного порядку хімічна реакція зміщується у бік робочої поверхні металевого елемента тертя; зміна ступеня дисперсності та компактності фаз, що виникають у верхньому шарі полімерної накладки, що містять аморфні та склоподібні речовини, суттєво впливає на їх хімічну активність; при цьому необхідно враховувати зміну енергії Гіббса; зміна енергії Гіббса поверхневого шару полімерної накладки пов'язана з його температурою та теплоємністю, які впливають на напрямок зміщення рівноваги хімічної реакції.

В результаті дослідження термодинамічної взаємодії плям контактів мікрровиступів робочих поверхонь при терті в різних середовищах та впливу різних факторів на крекінг-процес у верхніх шарах накладок встановлено наступне:

– ефекти іонної адсорбції суттєво різняться при суто електростатичній або так званій специфічній (обумовленій ковалентною взаємодією з металом) адсорбції її граничним випадком є адсорбція з повним перенесенням заряду та переходом іона до складу атома;

– збільшення поверхневої температури сприяє зростанню об'єму виходу продуктів ендотермічних реакцій з верхнього шару полімерної накладки, а також константи рівноваги, що супроводжується виділенням теплоти. При цьому відповідно до принципу рухомої рівноваги Вант-Гоффа відбувається пружно-пластична деформація мікрровиступів робочої поверхні металевого елемента тертя. Зниження поверхневої температури пар тертя сприяє інтенсифікації екзотермічної реакції з дисоціацією іонів поверхневого шару полімерної накладки;

– збільшення питомих навантажень у парі тертя призводить до зменшення виходу газоподібних продуктів, у тому числі ненасичених карбонів, що з'єднують із воднем, з їхнього міжконтактного зазору; при цьому питомі навантаження в парах тертя безпосередньо залежать від їхнього коефіцієнта взаємного перекриття;

– для досягнення максимального ступеня перебігу реакції перетворення необхідний надлишок вихідних речовин; при цьому якщо витрата одного з них з експлуатаційним міркуванням обмежена, то зростання вихідної концентрації інших реагентів збільшує кількість молей продуктів, що утворюються, і тим самим ступінь протікання реакції.

### Список літератури

1. ГОСТ 10851-94. Изделия фрикционные из ретинакса. Технические условия. – М.: Из-во стандартов, 1995. – 18 с.
2. А. с. 137765 СССР, МКИ G01N 3/56. Способ контроля изнашивания поверхностей трения / И. М. Богатчук, В. Я. Белоусов, М. И. Бурда и др.; заявитель и патентообладатель Ивано-Франковский институт нефти и газа. - №3848200/25-28; заявл. 28.01.85; опубл. 29.08.88, Бюл. №8. – 2 с.
3. Комбалов В. С. Методы и средства испытаний на трение и износ конструкционных и смазочных материалов: справочник / Под ред. К. В. Фролова, Е. А. Марченко. – М.: машиностроение, 2008. – 334 с, С. 93-97, рис. 1.21 и 1.22.

4. Смирнов Л. И. Диффузия и закономерности поведения водородной подсистемы в системах «металл-водород»: автореф. дисс. докт. техн. наук. 01.04.07 – физика конденсированного состояния. М.: 2003. 36 с.
5. Зиновьев Е. В. Физико-химическая механика трения и оценка асбофрикционных материалов / Е. В. Зиновьев, А. В. Чичинадзе, - М.: Наука, 1978. – 203 с.
6. Соколов В. И. Распределение давления сжимаемой и несжимаемой жидкости в плоском стыке по направлению ее расхода / В. И. Соколов // Межвуз. сборник Калинин. Гос. ун-т. – 1979. – С. 133 – 141.
7. Бакли Д. Поверхностные явления при адгезии и фрикционном взаимодействии / Д. Бакли. – М.: Машиностроение, 1986. – 360 с.
8. Крагельский И. В. Основы расчета на трение и износ / И. В. Крагельский, М. Н. Добычин, В. С. Комбалов. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.
9. Покусаев В. В. Исследование расхода воздуха через контакт точечных поверхностей / В. В. Покусаев // Сб. «Контактные взаимодействия твердых тел». Калинин. гос. ун-т., 1982. – С. 22 – 27.
10. Георгиевский Г. А. Влияние различных инградентов на фрикционные свойства пластмасс / Г. А. Георгиевский // Сб. «Трение и износ в машинах». – Изд-во АН СССР, 1962. – Вып. 16. – С. 121 – 150.
11. Ахназарова С. Л. Методы оптимизации эксперимента в химической технологии / С. Л. Ахназарова, В. В. Каферов. – М.: Высшая школа, 1985. – 327 с.
12. Ковыршин О. Н. Хроника изучения влияния газовой среды на трение / О. Н. Ковыршин // Среда и трение в механизмах. – Таганрог, 1974. – Вып. 1. – С. 125 – 131.
13. Патент на винахід України 126018. G01N 3/56. Спосіб дослідження процесів трибоккрекінгу під час фрикційної взаємодії в металополімерних парах тертя та пристрій для його здійснення / О. І. Вольченко, Д. О. Вольченко, М. Й. Бурда та ін.: власник Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, №201809783; опубл. 05.08.2022. Бюл. №31. – 15 с.

Стаття надійшла до редакції 25.10.2022.

**Скрипник Василь Степанович** – докт. техн. наук, професор, кафедри автомобільного транспорту Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, 76019, Україна, тел.: +38 067 369 66 50, E-mail: [skripnik-vs07@ukr.net](mailto:skripnik-vs07@ukr.net), <https://orcid.org/0000-0001-9023-6524>.

**Фідровська Наталія Миколаївна** – доктор. техн. наук, професор, завідувач кафедри будівельних і дорожніх машин, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Я. Мудрого, 25, м. Харків, Україна, 61002, тел.: +38 057 700 3864, моб. 097 996 7641, E-mail: [nfidrovskaya@ukr.net](mailto:nfidrovskaya@ukr.net), <https://orcid.org/0002-5248-273X>.

**Бекіш Ірина Орестівна** – канд. техн. наук, доцент кафедри інженерної та комп'ютерної графіки, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна, 76019, тел. +38 (0342) 72-47-19, E-mail: [ikg@nung.edu.ua](mailto:ikg@nung.edu.ua), <https://orcid.org/0000-0003-1910-9009>.

**Бурава Олександр Степанович** – старший викладач, підполковник кафедри військової підготовки Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна, 76019, тел.: +38 0342 50 25 06, E-mail: [burava2012@ukr.net](mailto:burava2012@ukr.net), <https://orcid.org/0000-0003-1489-7763>.

**Ніщук Віктор Вікторович** – викладач, майор кафедри військової підготовки Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна, 76019, тел.: +38 0342 50 25 06, E-mail: [nviktov@ukr.net](mailto:nviktov@ukr.net), <https://orcid.org/0000-0001-9142-4738>.

V. S. SKRIPNIK, N. M. FIDROVSKA, I. O. BEKISH, O. S. BURAVA, V. V. NISCHUK

### CRACKING PROCESS UNDER ELECTROTHERMECHANICAL FRICTION INTERACTION IN FRICTION PAIRS (PART 2)

It has been established that the driving force of endothermic and exothermic chemical reactions occurring in the upper layer of the polymer coating, as well as redox processes on the contact spots of microprotrusions of metal-polymer friction pairs, are chemical potentials that arise during electrothermomechanical frictional interaction of the working surface of the metal element of friction with the upper layer of the electrolyte and the lower layer of the electrolyte with the surface of the lining cuvette. The results of the research made it possible to establish and predict the following: the electrons formed in the electrolyte are strongly oriented and their effective dipole moment is large, which leads to the inversion of the set of currents according to the "polymer-metal" scheme; triboadsorbed gas adsorbs on the working surface of the metal, after which its chemical transformations take place; at the rate of tribosorption and triboreaction of the same order, the chemical reaction shifts towards the working surface of the metal friction element; a change in the degree of dispersion and compactness of the phases that occurs in the upper layer of the polymer coating containing amorphous and glassy substances significantly affects their chemical activity; at the same time, it is necessary to take into account the change in Gibbs energy; the change in the Gibbs energy of the surface layer of the polymer coating is related to its temperature and heat capacity, which affect the direction of the shift in the equilibrium of the chemical reaction. As a result of the study of the thermokinetic interaction of the contact spots of the microprotrusions of the working surfaces during friction in different environments and the influence of various factors on the cracking process in the upper layers of the overlays, the following was established: the effects of ion adsorption differ significantly with purely electrostatic or so-called specific (due to covalent interaction with the metal) adsorption - sorption. Its limiting case is adsorption with complete charge transfer and transition of the ion to the composition of the atom; an increase in the surface temperature contributes to an increase in the output volume of the products of endothermic reactions from the upper layer of the polymer coating, as well as the equilibrium constant, which is accompanied by the release of heat. At the same time, in accordance with the Van't-Hoff mobile equilibrium principle, elastic-plastic deformation of the microprotrusions of the working surface of the metal friction element occurs. A decrease in the surface temperature of the friction pairs contributes to the intensification of the exothermic reaction with the dissociation of the ions of the surface layer of the polymer overlay; an increase in the specific loads in the friction pair leads to a decrease in the output of gaseous products, including unsaturated carbons that combine with hydrogen, from their contact gap; at the same time, specific loads in friction pairs directly depend on their mutual overlap coefficient; to achieve the maximum rate of the conversion reaction, an excess of starting substances is required; at the same time, if the consumption of one of them is limited for operational reasons, then the increase in the initial concentration of other reagents increases the number of moles of products formed, and thereby the degree of reaction.

**Key words:** test stand, friction pair, friction contact, inter-contact volume, gap effect, cracking process.

#### References

1. GOST 10851-94. Izdeliya friktsionnyye iz retinaksa. Tekhnicheskkiye usloviya. – M.: Izvo standartov, 1995. – 18 s.
2. A. s. 137765 SSSR, MKI G01N 3/56. Sposob kontrolya iznashivaniya poverkhnostey treniya / I. M. Bogatchuk, V. YA. Belousov, M. I. Burda i dr.; zayavitel' i patentoobladatel' Ivano-Frankovskiy institut nefti i gaza. - №3848200/25-28; zayavl. 28.01.85; opubl. 29.08.88, Byul. №8. – 2 s.

3. Kombalov V. S. Metody i sredstva ispytaniy na treniye i iznos kon-struksionnykh i smazochnykh materialov: spravochnik / Pod red. K. V. Frolova, Ye. A. Marchenko. – M.: mashinostroyeniye, 2008. – 334 s, S. 93-97, ris. 1.21 i 1.22.

4. Smirnov L. I. Diffuziya i zakonmernosti povedeniya vodorodnoy podsistemy v sistemakh «metall-vodorod»: avtoref. diss. dokt. tekhn. nauk. 01.04.07 – fizika kondensirovannogo sostoyaniya. M.: 2003. 36 s.

5. Zinov'yev Ye. V. Fiziko-khimicheskaya mekhanika treniya i otsenka asbofriksionnykh materialov / Ye. V. Zinov'yev, A. V. Chichinadze, - M.: Nauka, 1978. – 203 s.

6. Sokolov V. I. Raspredeleniye davleniya szhimayemoy i neszhimayemoy zhidkosti v ploskom styke po napravleniyu yeye raskhoda / V. I. Sokolov // Mezhvuz. sbornik Kalinin. Gos. un-t. – 1979. – S. 133 – 141.

7. Bakli D. Poverkhnostnyye yavleniya pri adgezii i friksionnom vzaimodeystvii / D. Bakli. – M.: Mashinostroyeniye, 1986. – 360 s.

8. Kragel'skiy I. V. Osnovy rascheta na treniye i iznos / I. V. Kragel'skiy, M. N. Dobychin, V. S. Kombalov. – M.: Mashinostroyeniye, 1977. – 526 s.

9. Pokusayev V. V. Issledovaniye raskhoda vozdukhha cherez kontakt tochechnykh poverkhnostey / V. V. Pokusayev // Sb. «Kontaktnyye vzaimodeystviya tverdykh tel». Kalinin. gos. un-t., 1982. – S. 22 – 27.

10. Georgiyevskiy G. A. Vliyaniye razlichnykh ingradyentov na friksionnyye svoystva plastmass / G. A. Georgiyevskiy // Sb. «treniye i iznos v mashinakh». – Izd-vo AN SSSR, 1962. – Vyp. 16. – S. 121 – 150.

11. Akhnazarova S. L. Metody optimizatsii eksperimenta v khimicheskoy tekhnologii / S. L. Akhnazarova, V. V. Kaferov. – M.: Vysshaya shkola, 1985. – 327 s.

12. Kovyrrshin O. N. Khronika izucheniya vliyaniya gazovoy sredy na treniye / O. N. Kovyrrshin // Sreda i treniye v mekhanizmakh. – Taganrog, 1974. – Vyp. 1. – S. 125 – 131.

13. Patent na vinakhid Ukraini 126018. G01N 3/56. Sposib doslidzhennya protsesiv tribokrekingu pid chas friksionno vzaemodii v metalopolimernikh parakh tertya ta pristryi dlya yogo zdziysnennya / O. I. Vol'chenko, D. O. Vol'chenko, M. Y. Burda ta in.: vlasnik Ivano-Frankivskiy natsional'niy tekhnichniy universitet nafti i gazu, №201809783; opubl. 05.08.2022. Byul. №31. – 15 s.

**Skrypnyk Vasyl Stepanovych** - Dr. technical of Sciences, professor, department of road transport, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, str. Karpatska, 15, Ivano-Frankivsk, 76019, Ukraine, phone: +38 067 369 66 50, E-mail: skripnik-vs07@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-9023-6524>.

**Nataliya Mykolaivna Fidrovskaya** – doctor technical Sciences, professor, head of the Department of Construction and Road Machinery, Kharkiv National Automobile and Road University, str. 25 Ya. Mudroho 097 996 7641, E-mail: [nfidrovskaya@ukr.net](mailto:nfidrovskaya@ukr.net), <https://orcid.org/0002-5248-273X>.

**Bekish Iryna Orestivna** – candidate technical Sciences, associate professor of the department of engineering and computer graphics, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, str. Karpatska, 15, Ivano-Frankivsk, Ukraine, 76019, tel. +38 (0342) 72-47-19, E-mail: [ikg@nung.edu.ua](mailto:ikg@nung.edu.ua), <https://orcid.org/0000-0003-1910-9009>.

**Oleksandr Stepanovych Burava** – senior lecturer, lieutenant colonel of the Department of Military Training, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, st. Karpatskaya, 15, Ivano-Frankivsk, Ukraine, 76019, phone: +38 0342 50 25 06, E-mail: [burava2012@ukr.net](mailto:burava2012@ukr.net), <https://orcid.org/0000-0003-1489-7763>.

**Nishchuk Viktor Viktorovych** – teacher, major of the Department of Military Training, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, str. Karpatskaya, 15, Ivano-Frankivsk, Ukraine, 76019, phone: +38 0342 50 25 06, E-mail: [nviktorv@ukr.net](mailto:nviktorv@ukr.net), <https://orcid.org/0000-0001-9142-4738>.