

УДК 621.891

DOI: 10.18372/0370-2197.4(97).16955

М. В. КІНДРАЧУК¹, Д. О. ВОЛЬЧЕНКО², Д. Ю. ЖУРАВЛЬОВ²,
Є. Ю. АНДРЕЙЧИКОВ², А. В. ПРИСЯЖНИЙ²

¹Національний авіаційний університет, м. Київ, Україна

²Івано-Франківський національний технічний університет нафти та газу, Україна

КРЕКІНГ-ПРОЦЕС ПРИ ЕЛЕКТРОТЕРМОМЕХАНІЧНІЙ ФРИКЦІЙНІЙ ВЗАЄМОДІЇ В ПАРАХ ТЕРТЯ (ЧАСТИНА 1)

Матеріали статті відносяться до випробувальної техніки, яка використовується для дослідження процесів трибоккрекінгу пар тертя. Ці процеси супроводжуються виділенням газопарових сумішей і води, які при високих температурах, що перевищують допустиму для матеріалів полімерних накладок, інтенсифікують водневий знос робочих елементів пар тертя. При цьому було встановлено, що газодинаміка в міжконтактному просторі пар тертя має складний характер, який, залежно від режимів тертя та механіко-фізико-хімічних властивостей поверхні матеріалів ФК-24А – сталь 35ХНЛ, для яких експлуатаційні параметри коливаються в широкому інтервалі їх зміни. Надлишковий тиск перешкоджає міграції в міжконтактному просторі навколишнього середовища і створює умови для утворення зон плівкового голодування. Розроблено та створено стенд для дослідження процесів трибоккрекінгу під час фрикційної взаємодії в металополімерних парах тертя з урахуванням впливу різних факторів на їх протікання у верхніх шарах фрикційних накладок. На стенді було досліджено зразок із фрикційного матеріалу ФК-24А вагою 125 г на крекінг-процес його верхнього шару із застосуванням термогравіметричного та диференційно-термічного методів аналізу. Термодеструкція зразка починалася при температурі 300°C з розрахованої енергії активації 85,5 кДж/моль. При цьому поверхневий шар зразка розпадався протягом приблизно 15-ти хвилин при температурі 400°C. Кількість води, що опинилася в мірній трубці вакуумного насоса, склало 35,4 мл. До температури 320°C переважали окислювальні процеси, а потім починали виявлятися відновлювальні процеси; сповільнювачами хімічних реакцій виступили інертні гази. З'ясовано, що енергонавантаженість дискретного контакту мікроступів металополімерних пар тертя з урахуванням електричних, теплових і хімічних полів до і вище допустимої температури для верхніх шарів полімерної накладки при окислювально-відновних процесах істотно впливає на динамічний коефіцієнт тертя і інтенсивність зношування полімерної накладки.

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

Вступ. Водневе зношування зумовлене інтенсивним виділенням водню з полімерної накладки внаслідок виникнення трибоккрекінгу. При цьому забезпечується безперервне надходження водню в поверхневий шар сталевого елемента тертя, адсорбція його на поверхнях металополімерних пар тертя і дифузія в деформований шар металу. Її темп залежить від величини градієнта напружень, ступеня деформування та накопичення водню. Все це супроводжується особливим видом руйнування поверхні, зумовленим одночасним збільшенням кількості зародків мікротріщин по всій зоні контакту [1, 2]. Для дослідження цих явищ використовують спеціальні випробувальні стенди.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. Відомий стенд для дослідження процесів тертя, який містить корпус, тримач циліндричного зразка, привод обертання тримача циліндричного зразка, циліндричний зразок, контр-зразок у вигляді вставки, засіб для створення нормального навантаження між робочими поверхнями циліндричного зразка і контрзразка. Цей пристрій оснащений датчиками для визначення величини сили тертя в процесі випробувань [2].

Такий стенд має суттєвий недолік: недостатність контрольованих параметрів. У процесі досліджень на вказаному стенді визначаються лише такі параметри, як величина зношування та сила тертя. Цієї інформації зовсім недостатньо для досконалого вивчення процесів, що відбуваються між мікровиступами тертьових поверхонь, і дослідження механізму руйнування поверхневих шарів в металополімерних парах тертя.

Відомий спосіб визначення теплостійкості (коефіцієнта тертя і енергетичної інтенсивності зносу за вагою), який містить корпус, встановлений в ньому на підшипникових опорах тримач кільцевого фрикційного зразка, привод обертання тримача, кільцевий фрикційний зразок із робочою торцевою поверхнею, нерухомий контрзразок, який виконаний у вигляді металевого кільця та має глухий отвір зі сторони зовнішньої циліндричної поверхні для встановлення термопари, засіб створення осьового навантаження між робочими торцевими поверхнями кільцевого фрикційного зразка та контрзразка і засіб вимірювання температури у зоні тертя [1].

Недоліком відомого способу для дослідження теплостійкості під час тертя є обмежені функціональні можливості, оскільки не дозволяє проводити відбір як твердих, так і газоподібних продуктів зношування елементів металополімерних пар тертя.

Найбільш близьким за сукупністю ознак є пристрій для дослідження процесів трибоккрекінгу під час фрикційної взаємодії в металополімерних парах тертя, який містить корпус, встановлений в ньому на підшипникових опорах тримач циліндричного металевого зразка, привод обертання тримача, циліндричний металевий зразок із робочою зовнішньою циліндричною поверхнею, контрзразок, який виконаний з полімерного матеріалу у вигляді колодки та має радіальні глухі отвори зі сторони робочої внутрішньої циліндричної поверхні тертя для збору продуктів зношування, засіб створення радіального навантаження між робочими поверхнями циліндричного металевого зразка та контрзразка і засіб вимірювання температури у зоні тертя. У процесі випробувань у радіальних отворах контрзразка збираються тверді продукти зношування. Після закінчення випробування ці тверді продукти зношування виймають із радіальних глухих отворів контрзразка та піддають аналізу різними методами досліджень: електронно-мікроскопічним, фракційним, механічним, фізичним тощо. Результати цих досліджень певною мірою дозволяють більш адекватно описувати процеси тертя та встановлювати механізм зношування, що необхідно для вибору раціональних триботехнічних властивостей елементів пар тертя. Недоліком відомого способу дослідження процесів трибоккрекінгу під час фрикційної взаємодії в металополімерних парах тертя є те, що він дозволяє здійснювати аналіз тільки твердих продуктів зносу елементів металополімерної пари тертя, але не дозволяє збирати і аналізувати газоподібні продукти зносу, а також оцінювати проникнення водню в тіло циліндричного металевого елемента пари тертя, що стримує його використання.

Відомо пристрій для дослідження процесів тертя, що містить корпус, встановлений в ньому на підшипникових опорах, тримач циліндричного зразка, привод обертання тримача циліндричного зразка, циліндричний зразок, контрзразок у вигляді колодки, вузол створення нормального навантаження між робочими поверхнями циліндричного зразка і контрзразка, крім того пристрій має датчики визначення величини сили тертя у процесі випробування [3].

Недоліки відомого пристрою полягають у тому, що він не дозволяє визначати та контролювати процеси газовиділення при фрикційній взаємодії елементів металополімерних пар тертя, а також досліджувати проникнення водню вглиб металу циліндричного зразка під час проведення випробувань. Процеси газовиділення в деяких випадках є визначальними, коли йдеться про водневий знос, наприклад, поверхонь металевих фрикційних елементів металополімерних пар тертя.

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

- вплив різних факторів на крекінг-процес у верхніх шарах фрикційних накладок;
- конструкція та робота випробувального стенду для дослідження крекінг-процесу в робочому шарі полімерної накладки;
- обговорення результатів.

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

Вплив різних факторів на крекінг-процес у верхніх шарах фрикційних накладок. Проаналізуємо вплив різних факторів на швидкість протікання хімічних реакцій при крекінг-процесі, що відбуваються в поверхневих шарах полімерних накладок вузлів термічного тертя. З факторів виділимо: поверхневу та об'ємну температури, питомі навантаження, коефіцієнт взаємного перекриття пар тертя, співвідношення між кількістю реагентів, присутність інертних газів та тип реакції [10].

Підвищення поверхневої температури пари тертя "метал-полімер" збільшує вихід продуктів ендотермічних реакцій. Чим інтенсивніша зміна ентропії (ΔH) верхнього шару полімерної накладки, тим швидше зростає константа рівноваги із зростанням температури і, отже, вихід продуктів реакції. Реакція при електротермомеханічному терті супроводжується виділенням теплоти, температура при цьому падає. У зв'язку з цим відповідно до принципу рухомої рівноваги Вант-Гоффа відбувається пружнопластична деформація мікровиступів металевого фрикційного елемента. Зниження поверхневої температури пари тертя сприяє проходженню екзотермічної реакції (зокрема, дисоціації). При збільшенні питомих навантажень p у парі тертя температура T зростає, склад рівноважної системи змінюється, а разом з нею змінюється і коефіцієнт

$$K_v(K_g = \phi(t, p)).$$

Відповідно до рівняння $\Delta G = \Delta T - T\Delta S$ (де ΔG – зміна енергії Гіббса; T – температура; ΔS – зміна ентропії) судити про вплив температури можна і за знаком ΔS : при $\Delta S > 0$ нагрівання сприяє процесу, при $\Delta S < 0$ – навпаки. Обидва критерії (ΔH та ΔS) призводять до аналогічних результатів, оскільки йдеться про вплив T на термодинамічну рівновагу трибосистеми, коли $\Delta G = 0$. При $T \neq 0$ справедлива рівність $\Delta H = T\Delta S$. Знак виразу $\Delta S(\Delta H)$ визначає напрямок усунення рівноваги, його

абсолютна величина – ступінь його усунення. Нерідко легше орієнтуватися на ΔS , ніж на ΔH , так як знак ΔS часто визначити простіше, ніж знак ΔS .

Характер впливу тиску на рівноважний вихід відповідно до залежності, наведеної в [4], визначається знаком різниці числа молей газоподібних реагентів Δn і залежністю K_γ від тиску.

Якщо абсолютне значення Δn велике, то вирішальне значення має перший фактор; при $\Delta n > 0$ збільшення тиску несприятливо позначається на інтенсивності виходу продуктів реакції, при $\Delta n < 0$ – сприятливо. При крекінгу верхнього шару полімерної накладки збільшення тиску призводить до зменшення виходу газоподібних продуктів, у тому числі ненасичених вуглеводнів, що з'єднуються з воднем. При $\Delta n = 0$ вплив тиску на термодинамічну рівновагу визначається тільки залежністю K_γ від тиску, причому встановити її у загальному вигляді не надається можливим. Однак цілком очевидно, що вплив тиску на K_γ суттєвий лише за високих тисках, коли відмінність у стисливості різних газів стає більш значною.

При $\Delta n = 0$ зміна тиску зміщує рівновагу. Але це протирічить принципу Ле-Шательє, оскільки вплив тиску визначається знаком зміни об'єму. При низьких тисках знаки ΔV та Δn збігаються, при високих тисках $\Delta V \neq 0$ (з цією можливістю доводиться рахуватися і в тих випадках, коли абсолютна величина Δn невелика). Наприклад, якщо для реакції $\text{CO}_2 + \text{H}_2 = \text{CO} + \text{H}_2\text{O} (\text{г})$ при $T = 900^\circ\text{C}$

$$(K_\gamma)_{p=1} = \frac{\gamma_{\text{CO}}\gamma_{\text{H}_2\text{O}}}{\gamma_{\text{CO}_2}\gamma_{\text{H}_2}} = \frac{1 \cdot 1}{1 \cdot 1} = 1,0;$$

то

$$(K_\gamma)_{p=50} = \frac{1,26 \cdot 0,76}{1,15 \cdot 1,12} = 0,74,$$

тобто рівновага реакції зміщується у бік утворення CO і $\text{H}_2\text{O} (\text{г})$ (зміщення за рахунок конденсації пара виключено, так як $(T_{\text{крH}_2\text{O}}) < 900^\circ\text{C}$).

Вплив p на γ_i іноді доводиться враховувати і при незначних тисках, особливо якщо реакція протікає без зміни об'єму на початку електротермомеханічної фрикційної взаємодії мікрровиступів пар тертя. У цьому випадку зміна виходу може бути викликана порівняно невеликою зміною p .

Розрахунок такої рівноваги слід проводити ретельніше, ніж для випадків з $\Delta n \neq 0$, коли шляхом незначної зміни тиску легко зрушити рівновагу в бажаному напрямку і цим «виправити» обчислення.

Зміна ступеня дисперсності та компактності фаз у верхньому шарі полімерної накладки істотно впливає на хімічну активність його речовин. Тому при розрахунку рівноваги реакцій, в яких беруть участь дрібнокристалічні, аморфні та склоподібні речовини, необхідно враховувати додаткову зміну енергії Гіббса $dG_{\text{пов}} = \sum d(\sigma_i \omega_i)$ (де σ_i – поверхневий натяг бокових поверхонь мікрровиступів пар тертя; ω_i – i -а термодинамічна ймовірність), і рівновага відповідає умові $dG + dG_{\text{пов}} = 0$ (де dG – зміна енергії Гіббса без урахування фактора, що розглядається).

Так як поверхневий натяг у ході реакції можна вважати постійним, зміна енергії Гіббса, викликана варіюванням величини всіх поверхонь розділу мікрровиступів, так само: $\Delta G_{\text{пов}} = \sum \sigma_i \Delta \omega_i = \Delta H_{\text{пов}} - T \Delta S_{\text{пов}} = RT \ln(K_a / K_a')$, де R – універсальна газова стала; K_a, K_a' – константа хімічної рівноваги та її значення з

урахуванням впливу поверхневої енергії; $\Delta H_{\text{пов}}$ і $\Delta S_{\text{пов}}$ – зміна ентальпії та ентропії одиниці площі поверхні, віднесеної до одного моллю цієї фази.

Для отримання максимального виходу продуктів реакції з верхнього шару накладки при електротермомеханічній фрикційній взаємодії з металевим елементом тертя потрібна суміш стехіометрії вихідних речовин. Для досягнення максимального ступеня перебігу реакції перетворення необхідний надлишок вихідних речовин. Тому якщо витрата одного з них з експлуатаційних міркувань обмежений, то зростання вихідної концентрації інших реагентів збільшує кількість молей продуктів, що утворюються, і тим самим ступінь протікання реакції. При цьому слід враховувати легкість видалення з отриманої суміші непрореагованного надлишку реагентів з міжконтактного зазору пар тертя за рахунок омивання їх потоками циркулюючого повітря.

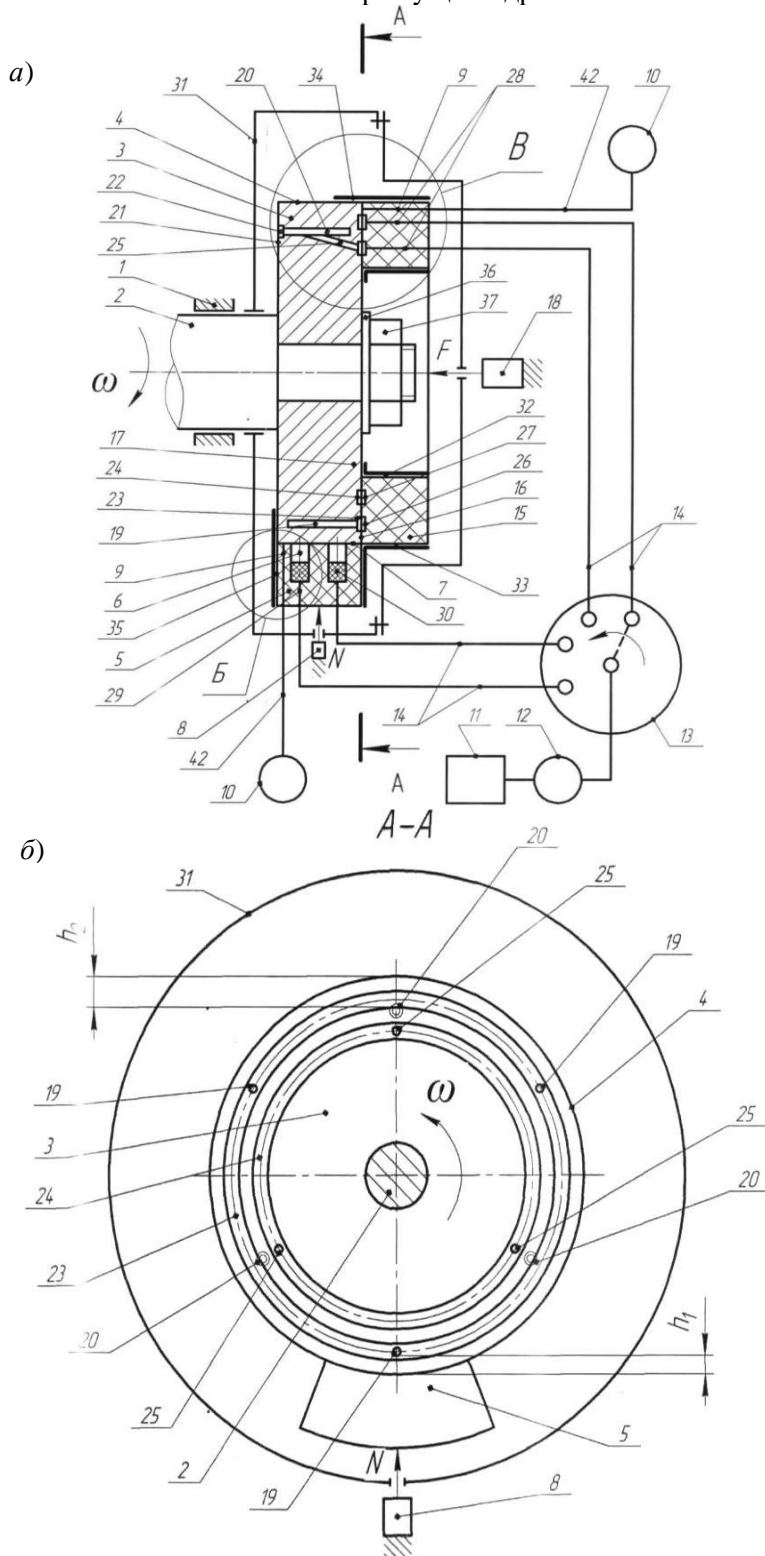
Збільшення ступеня перетворення можна також досягти, якщо видаляти з однієї зони продукти реакції, пов'язуючи їх у малодисоційовані, важкорозчинні або нелегкі речовини. Подібний підхід досить раціональний з огляду на те, що відпадає необхідність у великому надлишку реагенту. Так, якщо при утворенні CO_2 без зміни парціального тиску водяної пари, що знаходиться між мікроступами міжконтактного зазору пар тертя, то зі зменшенням концентрації цього газу суміш збагатиться воднем [5].

Наявність продуктів реакції вихідної суміші призводить до зменшення ступеня перетворення верхнього шару полімерної накладки.

Розглянемо вплив інертних газів (Ar – аргона, Ne – неона, He – гелію, Kr – криптона, Xe – ксенона, Rn – родона) [5] на початку і в кінці електротермомеханічного тертя, коли на деякий час можна вважати, що питомі навантаження в парі тертя сталі ($p = \text{const}$). Інертні гази виконують роль розріджувача інших газів (H_2 , O_2 , N_2 , CO і CO_2) на початку гальмування, що знаходяться у міжконтактному зазорі. До кінця гальмування міжконтактний зазор зменшується, оскільки збільшуються питомі навантаження, ефект розведення інертними газами знижується. Хорошим засобом видалення інертних газів з міжконтактного зазору є продування його повітрям навколишнього середовища. Отже, для хімічних реакцій крекінгу верхнього шару полімерної накладки, що протікають із зменшенням об'єму газів, що виділяються, ефект розведення інертними газами небажаний. При зростанні об'єму суміші, розведеної інертними газами, збільшується ступінь перебігу реакції.

Конструкція та робота випробувального стенду для дослідження крекінг-процесу в робочому шарі полімерної накладки. Випробувальний стенд складається з корпусу 1, тримача 2, металевого циліндричного зразка 3, контрзразка 4, виконаного у вигляді полімерної вставки, притискного пристрою 5 для створення радіального навантаження N в парі тертя «торцева поверхня циліндричного металевого зразка 3 – торцева поверхня полімерної вставки 4». Випробувальний пристрій містить привод обертання (на рис. 1 не показаний), тримача 2, циліндричного металевого зразка 3. Кутова швидкість його обертання задається програмою випробувань. У тілі циліндричного металевого зразка 3 виконані групи осьових газовідвідних каналів 6 і 7. Кожна з груп містить по три газовідвідних канали 6 і 7, розташованих на глибині h_1 і h_2 від робочої поверхні циліндричного металевого зразка 3. Зазначені газовідвідні канали 6 і 7 призначені для відбору газу з певної глибини від поверхні тертя металевого циліндричного

зразка 3. Діаметр осевих газовідвідних каналів 6 і 7 вибирають в залежності від фізико-механічних властивостей матеріалу циліндричного металевого зразка 3.



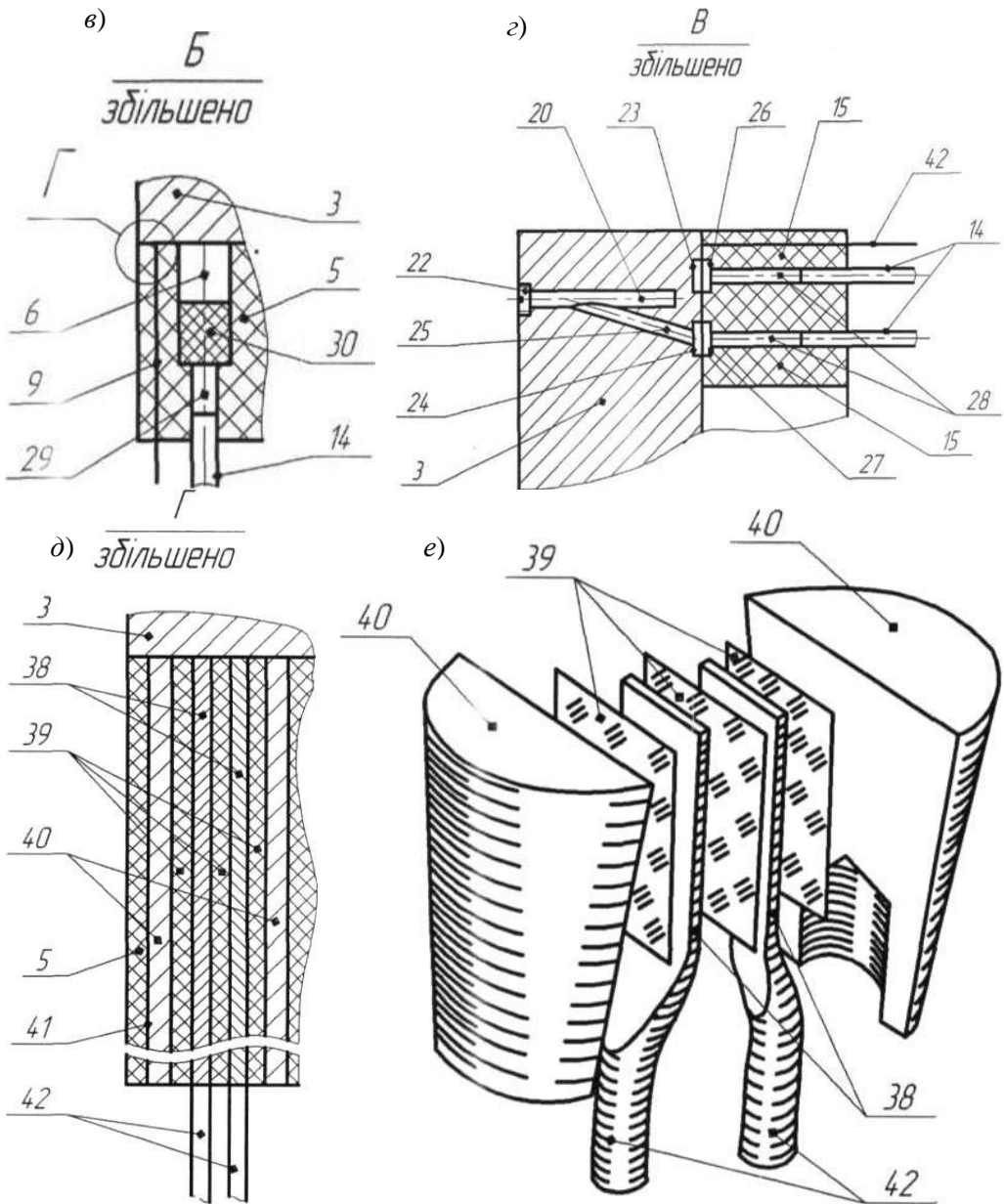


Рис. 1. Загальний вигляд випробувального стенду для дослідження процесів трибокрекінгу при фрикційній взаємодії пар тертя (а) та його переріз А, рис. 1 а (газопроводи та вивід термопари умовно не показані) (б); місцевий вигляд В рис. 1 а (показана пара тертя: робоча зовнішня циліндрична поверхня циліндричного металевого зразка – контрзразок з виконаними в останньому радіальними наскрізними отворами, в яких встановлені фільтри з пористих твердих матеріалів) (в); місцевий вигляд В рис. 1 а (показана система отворів та похилих каналів у циліндричному поверхневому зразку та кільце-колекторі) (г); місцевий вигляд Г рис. 1 в (схема установки стрічкової термопари в контрзразку; установка стрічкової термопари в контрзразку; установка стрічкової термопари в кільці-колекторі, аналогічна (д)); показана конструкція стрічкової термопари (у рознесеному вигляді) (е)

На рис. 1 (виносний елемент *Б*) показана бічна поверхня циліндричного зразка і бічні кільцеві поверхні полімерного диска-колектора з виконаним в ньому радіальним отвором з фільтром, що переходить в газопаровідвідний канал; на рис. 1 *г* (виносний елемент *В*) показана система каналів, виконаних в металевому і в полімерному елементах тертя; на рис. 1 *д* наведена конструкція термопари, на рис. 1 *е* (виносний елемент *Г*) – встановлення термопари в диску-колекторі: 1, 25 – корпус та його кожух; 2 – тримач; 3, 4 та 32 – циліндричний металевий зразок, полімерна вставка та герметизуючий шар; 16 – притискні пристрої; 6, 7 – осьові газовідвідні канали; 8, 9, 17, 18 – кільцеві канали; 10 – різьбові пробки; 11, 19, 20 – похилі та осьові канали; 12, 13 – газопароаналізатор з газопаропроводами; 14 – газопарокомутуюча апаратура; 15 – диск-колектор; 21 – радіальні отвори; 22 – газопаровідвідні канали; 23 – фільтри; 24 – вакуумний насос; 26 та 30 – термоелектроди стрічкової термопари та їх вивід; 27, 28, 29 – ізоляція між отворами з термоелектродами у корпусі; 31 – міліпотенціометр.

На робочій торцевій поверхні циліндричного металевого зразка 3 виконані концентричні кільцеві канавки 8 і 9. Одна з груп 6 осьових газовідвідних каналів виконана у вигляді глухих отворів таким чином, що їх відкритий кінець з'єднаний з кільцевою канавкою 8. Друга група осьових газовідвідних каналів 7 виконана також у вигляді глухих отворів. При цьому з неробочої торцевої сторони циліндричного металевого зразка 3 канали 7 заглушені різьбовими пробками 10. За допомогою системи похилих каналів 11 вони з'єднані з кільцевою канавкою 9. Випробувальний пристрій оснащений також газопароаналізатором 12, газопаропроводами 13 і газопароакумуючою апаратурою 14.

Співвісно тримачеві 2 металевому циліндричному зразка 3 розміщений дискоколектор 15, виготовлений з полімерного матеріалу (має можливість тільки осьового переміщення). Він взаємодіє своєю торцевою робочою поверхнею з робочою торцевою поверхнею циліндричного металевого зразка 3 (перед складанням випробувального пристрою зазначені торцеві поверхні попередньо притирають). Фрикційна взаємодія зазначених пар тертя забезпечується притискним пристроєм 16, що створює осьове зусилля F . На робочій торцевій поверхні диска – колектора 15 виконані концентричні кільцеві канавки 17 і 18 через канали 19 і 20 до газопароаналізатора 12. Можливий варіант виконання випробувального пристрою, коли циліндричний зразок 3 містить більше двох груп газовідвідних каналів 7. У цьому випадку розміщують їх на різних відстанях від робочої поверхні зразка.

У полімерній вставці 4 виконані радіальні отвори 21, призначені для збору продуктів зносу та рідини. Радіальні отвори 21 через газопаровідвідні канали 22, газопаропроводи 13 і газопароакумуючу апаратуру 14 підключену до газопароаналізатора 12. В отвори 21 встановлені фільтри 23, виготовлені з пористих твердих матеріалів (наприклад, методами порошкової металургії). Вакуумний насос 24 служить для відкачування газів, парів та рідини, які утворюються в процесі тертя металополімерної пари.

Досліджувані пари тертя «торцева поверхня циліндричного металевого зразка 3 – торцеві кільцеві поверхні диска-колектора 15» та «зовнішня циліндрична електротермомеханічна фрикційна взаємодія в парах тертя при крекінг-процесі (частина 1) 17 поверхня циліндричного металевого зразка 3 – внутрішня» знаходяться в герметичному кожусі 25. Для контролю ступеня теплонавантаженості пари тертя використана стрічкова термопара, що має

термоелектроди 26, виготовлені з хромелю (+) і копелю (-), між якими розташований шар ізоляції 27. Термопара розміщена в корпусі 28 і встановлена в отвір 29, виконаному в диску-колекторі 15. Виводи 30 термопари підключені до міліпотенціометра 31. Для запобігання прориву газів і парів, а також підтікання рідини з міжконтактного зазору між парами тертя їх поверхні зовні покриті герметизатором 32. Після встановлення і нерухомого закріплення на тримачі 2 циліндричного металевого зразка 3 до його торцевої поверхні з осьової силою F притискається диск-колектор 15. Величина сили притискання F вибирається такою, щоб забезпечити герметичність порожнин, утворених збіжними канавками 8 і 17; та 9 і 18. Диск-колектор 15 виготовляють із антифрикційного щільного матеріалу, наприклад, на основі фторопласту. Тому торцеві поверхні металевого зразка 3 та диска-колектора 15 утворюють свого роду торцеве ущільнення.

Випробувальний стенд працює в такий спосіб. Приводять у обертання тримач 2 із заданою кутовою швидкістю ω . Між циліндричним металевим зразком 3 і диском-колектором 15 в зоні контакту відбувається фрикційна взаємодія, при якій виникає певне газовиділення фону – систематична похибка експерименту. Вона фіксується газопароаналізатором 12. Потім за допомогою радіального притискного пристрою 5 до контрзразка 4, виконаному у вигляді полімерної вставки, прикладають навантаження N , величина якого передбачена програмою випробувань. Це сприяє фрикційній взаємодії його внутрішньої циліндричної поверхні з зовнішньою циліндричною поверхнею циліндричного металевого зразка 3. Штатними засобами машини тертя та зносу (на кресленнях не показана) фіксуються основні трибологічні параметри процесу: динамічний коефіцієнт тертя, температура в зоні тертя, величина зношування елементів пари тертя. Для випробувань металевий циліндричний зразок виготовляють з різних металів, у тому числі і з захисними покриттями.

При терті в металополімерних парах відбуваються процеси газовиділення та дифузії газів, зокрема, водню, вглиб зразків. Гази збираються в осьових газовідвідних каналах 6 і 7. З осьового газовідвідного каналу 6 газове середовище відкачується з порожнин, утворених суміщеними концентричними кільцевими канавками 8 і 17, 9 і 19. Далі газ по каналу 19 і газопроводу 13 надходить до газопароакумуруючої апаратури 15 і через вакуумний насос 24 – до газопароаналізатора 12. Газ, зібраний в осьових газовідвідних каналах 8, через систему похилих каналів 11 надходить у порожнини кільцевих канавок 9 і 18 і потім – до газопароаналізатора 12. Газове середовище, створюване безпосередньо у міжконтактному просторі між робочими поверхнями циліндричного металевого зразка 3 і полімерного контрзразка 4, відводиться через радіальні отвори 21. При цьому воно проходить через фільтр 23 газопаровідводячого каналу 22, газопаропровід 13, газопарокомую апаратуру 14, вакуумний насос 24 і поступає в газопароаналізатор 12. Випробувальний стенд дозволяє здійснювати аналіз складу газів, які утворюються в результаті тертя та дифундують углиб циліндричного зразка 3, а також визначати об'єм цих газів. Радіальні отвори 21 служать для відбору продуктів зносу, які утворюються при терті.

Для дослідження стану полімерного матеріалу в зоні температур вище за допустиму розглянемо дериватограму зразка ФК-24А. Фрикційні матеріали для гальмівних пристроїв повинні досліджуватися з позицій фізико-хімічної механіки тертя у режимі гальмування із застосуванням термогравіметричного та диференційно-термічного методів аналізу. Результати цих досліджень для зразка

з матеріалу ФК-24А представлені на рис. 2. Встановлено, що термодеструкція зразка ФК-24А починається за температури 300 °С. Розрахована енергія активації розкладання зразка ФК-24А становила 85,5 кДж/моль. Доведено, що зразок розпадається протягом 15 хвилин за температури 400 °С. Швидкість зменшення його маси при подальшому збільшенні температури зростає. Необхідно відзначити, що режими дослідження матеріалу ФК-24А на термостійкість у вигляді зразка не завжди повною мірою відповідають реальним умовам роботи приповерхневих шарів фрикційних накладок в парах тертя гальмівних пристроїв.

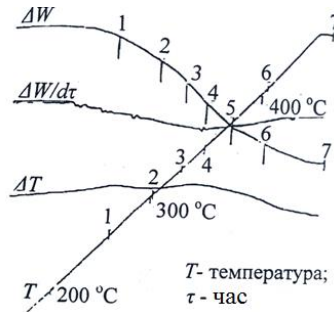


Рис. 2. Деривотограма образца ФК-24А: ΔW – потери массы, определяющие по термогравиметрической кривой; $dW/d\tau$ – скорость изменения (дифференциально-термогравиметрическая кривая); ΔT – дифференциально-термическая кривая

Таблиця 1

Відсоткове співвідношення компонентів газової суміші, утвореної у міжконтактному просторі при терті фрикційної пари (дані І. М. Богатчука)

Номер проби	Фрикційний матеріал	Температура, °С	Вміст газу, мас. частка, %						
			H ₂	O ₂	N ₂	CO ₂	CO	ΣC _n H _m	інші гази***
1	ФК-24А	150	*	19,8	78,8	0,28	*	*	Решта
2	-	215	*	19,8	78,8	0,23	*	*	
3**	-	420	0,123	19,1	79,5	0,13	*	*	
4**	-	500	0,171	16,3	81,6	0,24	0,43	0,24	
5	-	730	0,308	9,8	81,2	0,08	6,51	1,06	

Примітка:

* Наявність слідів зазначених газів.

** Відбір проб здійснювався із чотирьох зон (точок) одночасно.

*** Під іншими газами мається на увазі: Ar, Ne, He, Kr, N₂O, Xe, O₂, Rn

Деструкція фрикційних матеріалів супроводжується інтенсивним димленням, а потім утворенням рідких фракцій у порах поверхневого шару. При цьому молекули адсорбенту міцно утримуються в мікропорах поверхневого шару матеріалу внаслідок того, що вони оточені великою кількістю атомів вуглецю. Адсорбція газової фази - це процес конденсації, який відбувається в умовах, коли енергія адсорбції виявляється достатньою для конденсації пари. Пар, що конденсувався, накопичується в пористій структурі вуглецю.

Кількість води, що опинилась у мірній трубці вакуумного насоса, становило 354 мл. У табл. 1 наведено енергонавантаженість дискретного контакту мікровиступів металоолімерних пар тертя трибосистем з урахуванням зміни динамічного коефіцієнта тертя (рис. 3).

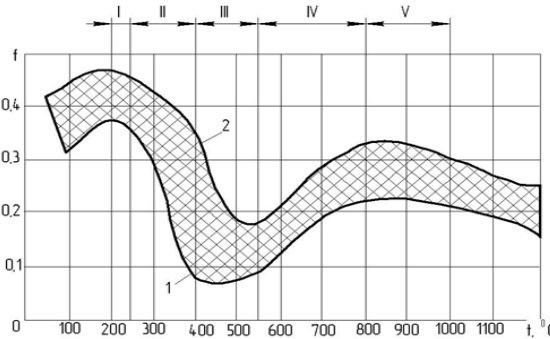


Рис. 3. Еталонна зміна коефіцієнта тертя матеріалу «Ретинакс» ФК-24А функції температури поверхні тертя по зонах: I – 200...250°C; II – 250 ... 400°C; III – 400 ... 550°C; IV – 550 ... 800°C; V – 800 ... 1000 °C

Таким чином, за результатами досліджень трибокрекінгу плям контактів мікроступів металополімерних пар тертя оцінено їх енергонавантаженість з урахуванням окисно-відновних процесів, що відбуваються на робочих поверхнях. Встановлено закономірності зміни динамічного коефіцієнта тертя залежно від енергонавантаженості металополімерних пар тертя, що піддаються впливу електричних, теплових та хімічних полів. Показано, що трибокрекінг носить складний трибохімічний характер з вигоранням із поверхневого шару полімерної накладки формальдегідної смоли. Цей процес супроводжується виділенням води, водню, кисню та інших газових сумішей.

Обговорення результатів. Теоретичні та експериментальні дослідження термодеструкції робочої поверхні накладки з матеріалу ФК-24А фрикційно взаємодіючого з фрикційним елементом сталь 35ХНЛ дозволили встановити таке:

- газодинаміка у міжконтактному просторі пар тертя має складний характер, який, залежно від режимів тертя та механіко-фізико-хімічних властивостей поверхні матеріалів ФК-24А – сталь 35ХНЛ, для яких експлуатаційні параметри коливаються у широкому інтервалі їх зміни. Надлишковий тиск перешкоджає міграції у міжконтактному просторі навколишнього середовища та створює умови для утворення зон плівкового голодування;

- розроблено та створено стенд для дослідження процесів трибокрекінгу під час фрикційної взаємодії у металополімерних парах тертя з урахуванням впливу різних факторів на їх протікання у верхніх шарах фрикційних накладок;

- на стенді було досліджено зразок з фрикційного матеріалу ФК-24А вагою 125 г на крекінг-процес його верхнього шару із застосуванням термогравіметричного та диференційно-термічного методів аналізу;

- термодеструкція зразка починалася при температурі 300°C з розрахованої енергії активації 85,5 кДж/моль. При цьому поверхневий шар зразка розпадався протягом приблизно 15 хвилин при температурі 400°C. Кількість води, що опинилась у мірній трубці вакуумного насоса, становило 354 мл. До температури 320°C переважали окислювальні процеси, а потім починали виявлятися відновлювальні процеси; уповільнювачами хімічних реакцій виступили інертні гази;

- з'ясовано, що енергонавантаженість дискретного контакту мікроступів металополімерних пар тертя з урахуванням електричних, теплових та хімічних полів до і вище допустимої температури для верхніх шарів полімерної накладки при окислювально-відновлювальних процесах істотно впливає на динамічний коефіцієнт тертя та інтенсивність зношування полімерної накладки.

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. Зиновьев Е. В. Физико-химическая механика трения и оценка асбофрикционных материалов / Е. В. Зиновьев, А. В. Чичинадзе, - М.: Наука, 1978. – 203 с.
5. Крагельский И. В. Основы расчета на трение и износ / И. В. Крагельский, М. Н. Добычин, В. С. Комбалов. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.
6. 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.
7. 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.
8. Бакли Д. Поверхностные явления при адгезии и фрикционном взаимодействии / Д. Бакли. – М.: Машиностроение, 1986. – 360 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 ингредиентов 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.

Стаття надійшла до редакції 25.10.2022.

Кіндрачук Мирослав Васильович – докт. техн. наук, професор, професор кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів Національний авіаційний університет, пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, <https://orcid.org/0000-0002-0529-2466>.

Вольченко Дмитро Олександрович – докт. техн. наук, професор кафедри видобування нафти і газу Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна, 76019, тел.: +38 0342 72 71 41, моб. 050-373-82-42, E-mail: divo99@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-1565-749X>

Журавльов Дмитро Юрійович – канд. техн. наук, доцент кафедри технічної механіки Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна, 76000, тел.: +38 0342 72 71 41, моб. 050-950-04-18, E-mail: dmytro.2103@ukr.net <https://orcid.org/0000-0002-2045-9631>.

Андрейчиков Євген Юрійович – підполковник, старший викладач кафедри військової підготовки Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна, 76019, <https://orcid.org/0000-0002-4579-3636>.

Присяжний Андрій Володимирович – майор, викладач кафедри військової підготовки Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна, 76019, E-mail: pav041284@ukr.net <https://orcid.org/0000-0002-6894-496X>.

*M. V. KINDRACHUK, D. O. VOLCHENKO, D. YU. ZHURAVLYEV,
E. YU. ANDREYCHIKOV, A. V. PRYSIAZHNYI*

CRACKING PROCESS UNDER ELECTROTHERMECHANICAL FRICTION INTERACTION IN FRICTION PAIRS (PART 1)

The materials of the article refer to the testing technique used to study the processes of tribocracking of friction pairs. These processes are accompanied by the release of gas-vapor mixtures and water, which, at high temperatures exceeding the allowable for polymer lining materials, intensify hydrogen wear of the working elements of the friction pairs. At the same time, it was established that the gas dynamics in the intercontact space of friction pairs has a complex character, which, depending on the friction modes and mechanical-physical-chemical properties of the surface of the materials FK-24A - 35KHNL steel, for which the operational parameters fluctuate in a wide range of their changes. Excess pressure prevents migration in the intercontact space of the environment and creates conditions for the formation of film starvation zones. A stand was developed and created for researching tribocracking processes during frictional interaction in metal-polymer friction pairs, taking into account the influence of various factors on their occurrence in the upper layers of friction linings. At the stand, a sample of FK-24A friction material weighing 125 g was examined for the cracking process of its upper layer using thermogravimetric and differential thermal analysis methods. Thermal destruction of the sample began at a temperature of 300°C with a calculated activation energy of 85.5 kJ/mol. At the same time, the surface layer of the sample disintegrated for about 15 minutes at a temperature of 400°C. The amount of water that ended up in the measuring tube of the vacuum pump was 35.4 ml. Oxidative processes prevailed up to a temperature of 320°C, and then reducing processes began to appear; inert gases acted as moderators of chemical reactions. It was found that the energy load of the discrete contact of the microprotrusions of the metal-polymer friction pairs, taking into account the electric, thermal and chemical fields up to and above the permissible temperature for the upper layers of the polymer coating during oxidation-reduction processes, significantly affects the dynamic coefficient of friction and the intensity of wear of the polymer coating.

Key words: test stand, friction couple, frictional 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 nefci 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-struktsionnykh 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. Zinov'ev Ye. V. Fiziko-khimicheskaya mekhanika treniya i otsenka asbofriktsionnykh materialov / Ye. V. Zinov'ev, A. V. Chichinadze, - M.: Nauka, 1978. – 203 s.
5. 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.
6. Patent na vinakhid Ukraïni 126018. G01N 3/56. Sposib doslidzhennya protsesiv tribokrekingu pid chas friktsiynoï vzaïmodiï v metalopolimernikh parakh tertya ta pristrïy dlya yogo zdiysnennya / O. Í. Vol'chenko, D. O. Vol'chenko, M. Y. Burda ta ín.: vlasnik Ivano-Frankivs'kiy natsional'niy tekhnichniy unïversitet nafci í gazu, №201809783; opubl. 05.08.2022. Byul. №31. – 15 s.

7. 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.

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

9. Pokusayev V. V. Issledovaniye raskhoda vozdukha 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 ingrediyyentov na friktsionnyye 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. Kovyrshin O. N. Khronika izucheniya vliyaniya gazovoy sredy na treniye / O. N. Kovyrshin // *Sreda i treniye v mekhanizmax.* – Taganrog, 1974. – Vyp. 1. – S. 125 – 131.

Kindrachuk Myroslav Vasyliovych – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Applied Mechanics and Materials Engineering, National Aviation University, 1 Lubomyra Huzar Ave., Kyiv, Ukraine, 03058, E-mail: nau12@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-0529-2466>.

Dmytro Oleksandrovych Volchenko - doctor technical sciences, professor of the Department of Oil and Gas Extraction, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, str. Karpatska, 15, Ivano-Frankivsk, Ukraine, 76019, phone: +38 0342 72 71 41, mob. 050-373-82-42, E-mail: divo99@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-1565-749X>.

Zhuravlyev Dmytro Yuriyovych - candidate technical of sciences, associate professor of the Department of Technical Mechanics, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, str. Karpatska, 15, Ivano-Frankivsk, Ukraine, 76000, phone: +38 0342 72 71 41, mob. 050-950-04-18, E-mail: dmytro.2103@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-2045-9631>.

Andreychikov Yevgen Yuriyovych - lieutenant colonel, senior lecturer of the Department of Military Training, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, str. 15 Karpatska Street, Ivano-Frankivsk, Ukraine, 76019, <https://orcid.org/0000-0002-4579-3636>.

Prisyazhniy Andrii Volodymyrovych - major, teacher of the Department of Military Training, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, str. Karpatska, 15, Ivano-Frankivsk, Ukraine, 76019, E-mail: pav041284@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-6894-496X>.