

УДК 621.891

**ДОСЛІДЖЕННЯ ГАЗОДИНАМІКИ У МІЖКОНТАКТНОМУ
ПРОСТОРІ ФРИКЦІЙНИХ ПОВЕРХОНЬ****Л. І. Криштопа**

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу;
76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15;
тел. +380 (342) 72-71-31; e-mail: L.I.Kryshytopa@mail.ru*

Для моделювання фізико-хімічної та математичної моделі механізму міграції оточуючого середовища на фрикційний контакт розглянуто: адсорбційний, перекачувальний, щільний ефекти та процес розкладу фенолформальдегідного матеріалу під дією повітря та без його доступу.

Ключові слова: міжконтактний простір, фрикційний контакт, поверхні тертя, адсорбція, адсорбат, адсорбент, перекачувальний ефект, щільний ефект, фенолформальдегідні матеріали.

Механізм газодинаміки у фрикційному контакті теоретично розглянуто в роботі [1]. Припускається, що існує два механізми проникнення газового середовища на фрикційні поверхні: перший, через контактний зазор (так званий щільний ефект) та другий, шляхом адсорбування на відкритих для газу ділянках контакту тертя (адсорбційний ефект) – у випадку неповного перекриття пар тертя. Кількість повітря, що проникає до контакту, до складу якого входить кисень, визначає інтенсивність термоокисних, деструктивних та інших хемосорбційних 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, так як їхня енергія [3] перевищує значення енергії елементарних об'ємів речовини у внутрішніх шарах. На характеристики поверхневих шарів різних матеріалів також значний вплив робить газове середовище, що оточує об'єкт. Лабораторні дослідження механізму поступлення газового середовища із зовні до міжконтактного простору поверхонь тертя дозволили створити фізико-хімічну та математичну модель механізму міграції оточуючого середовища на фрикційний контакт.

Фізико-хімічні характеристики середовища та його склад істотно пов'язані з фрикційно-зношувальними властивостями матеріалів [4]. При контакті з атмосферою, найважливішими, з точки зору розвитку адсорбції, компонентами середовища є: азот, кисень, водень. Ці компоненти присутні у вигляді двоатомних молекул, а не окремих атомів. Во-

ни осідають на поверхнях та можуть вступати в хімічні з'єднання з поверхневими шарами фрикційних матеріалів.

Таким чином процес адсорбції поділяється на два види – хімічний та фізичний. Рушійна сила адсорбційного процесу, з одного боку, визначається енергією твердого тіла, а з другого – активністю адсорбата, тобто атомів та молекул оточуючого середовища.

При зближенні адсорбата з поверхнею твердого тіла, енергія взаємодії змінюється у відповідності з залежністю, що представлена на рис. 1. точка l_0 на осі абсцис відповідає рівноважній відстані між адсорбентом (тобто поверхнею твердого тіла) та адсорбатом.

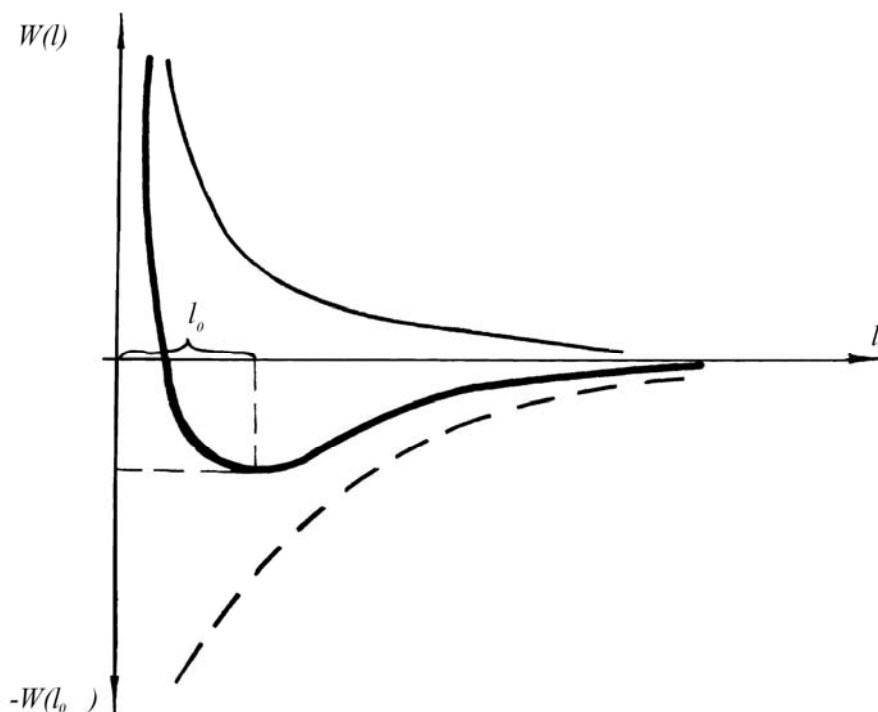


Рис. 1. Енергія адсорбції в залежності від відстані між адсорбентом та адсорбатом

Значення відповідної рівноважній енергії зв'язку (точка $W(l_0)$) визначаються природою адсорбата та адсорбента. Фундаментальна залежність може бути використана при розгляді як фізичної, так і хімічної адсорбції на поверхні будь-якого твердого тіла. У відповідності з цією залежністю на поверхнях відбувається осаджування плівок усіх видів. При утворенні поверхневих з'єднань, наприклад, в процесі окислення) на першому етапі, попередньою хімічною реакцією буде фізична адсорбція.

Реальні поверхні металів покриті хемосорбованими газами, а в кисневмісному середовищі, як правило, спостерігається й їхнє окислення. В атмосфері, окрім кисню, містяться й інші компоненти, але на поверхні найчастіше знаходиться саме він. Процес хемосорбції газів продовжується до досягнення достатньо визначеної концентрації адсорбата, при якій настає насичення та утворюється мономолекулярний шар. Потім він припиняється, та може продовжуватися лише фізична адсорбція або утворення об'ємної окисної плівки, якщо енергії вистачить для протікання реакції окислення. Поняття хемосорбції застосовне лише до двоірних утворень.

Необхідно відзначити, що характерною рисою хемосорбції, яка відрізняє її від хімічних реакцій, є властивість оборотності зі збереженням хімічного складу адсорбента. Причому енергія хемосорбційної взаємодії значно вища ніж енергія фізичної адсорбції. Кількість газового середовища, що походить за одиницю часу на одиницю номінальної поверхні тертя за рахунок адсорбційного ефекту визначається [1]:

$$Q_a = \frac{k_1 V_a \omega n}{2\pi K_{\text{вз}}}, \quad (1)$$

де Q_a – об'єм газового середовища; k_1 – корегуючий коефіцієнт, враховуючий різницю між площами істинної та номінальної поверхонь адсорбції з урахуванням глибини проникнення нерівностей; V_a – об'єм (зведений до нормальних умов) молекулярного шару газового середовища, адсорбованого на $1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ гладкою поверхнею; ω – кутова швидкість відносного руху взірців; n – число елементів асбффрикційної пластмаси, що складає вузол тертя.

На адсорбенті адсорбування газових молекул відбувається в основному в мономолекулярний шар при порівняно невисокій швидкості їхнього випаровування за час $10^{-5} - 10^{-10} \text{ с}$. Умови утворення такого шару визначаються виразом наступного вигляду:

$$\left(\frac{1 - K_{\text{вз}}}{n\omega} \right) \geq \frac{1,1}{0,48 \cdot 10^{20} \frac{P}{N} \sqrt{MT} + e^{\frac{\Delta H}{RT}}}, \quad (2)$$

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

Отже, згідно умови (2), можна оцінити розхід газового середовища за рахунок адсорбційного ефекту. При цьому додатково слід оцінити щільний ефект, зробивши наступні припущення:

- контактний зазор вважатимемо щільною постійної висоти:

$$h_{\text{эф}} = h_{\text{эф}_1} + h_{\text{эф}_2}, \quad (3)$$

де h_{ef_1} , h_{ef_2} – висота ефективного зазору:

$$h_{ef_i} = \left[\left(\frac{1}{2b_i} \right)^{\frac{1}{v_i}} - \left(\frac{P_{num}}{HB_i b_i} \right)^{\frac{1}{v_i}} \right] h_{max_i}, \quad (4)$$

де b_i , v_i – параметри опорної кривої поверхні; HB_i – твердість; P_{num} – питоме навантаження; h_{max_i} – максимальна висота мікронерівностей;

- при $K_{\epsilon_3} < 1$ не враховується потрапляння газового середовища на контактний зазор по сторонам асбофрикційного елемента, що направлено вздовж радіуса;

- на середньому діаметрі тертя при термоокислювальній деструкції повністю використовується весь кисень зі складу повітря та тиск газового середовища знижується на величину парціального тиску кисню в оточуючому вузол тертя повітрі. Кількість газу, що проходить через радіально-кільцеву щілину при ламінарній течії:

$$Q_{uz} = \frac{\pi h_{ef}^3 \Delta P_{ef}}{6\mu \ln \frac{D}{d}}, \quad (5)$$

де Q_{uz} – спільна витрата газу при щілинному ефекті, $1 \cdot 10^{-6} \frac{M^2}{c}$; μ – динамічний коефіцієнт в'язкості при відповідній температурі; ΔP_{ef} – перепад тиску на кінцях щілини.

Щосекундна витрата газового середовища в контактній щілині на одиниці площі тертя:

$$Q_{uz} = \frac{\pi h_{ef}^3 \Delta P_{ef} K_{\epsilon_3}}{6\mu A_a \ln \frac{D}{d}}. \quad (6)$$

Для кільця площа $A_a = \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) K_{\epsilon_3}$ а також вираз (6) набуває вигляду:

$$Q_{uz} = \frac{2h_{ef}^3 \Delta P_{ef}}{3\mu (D^2 - d^2) \ln \frac{D}{d}}. \quad (7)$$

Загальна кількість газового середовища Q , що поступає на фрикційний контакт, визначається сумарною дією адсорбційного та щілинного ефекту:

$$Q = Q_a + Q_{uz}. \quad (8)$$

Оскільки газове середовище перекачується від центра до периферії в радіально-кільцевих парах тертя (рис. 2), то для визначення поточного тиску рідин (газів), що стискаються по ширині доріжки тертя, запропоновано залежність:

$$P_x = \sqrt{P_{ex}^2 - \frac{4k\mu \sum (R_z - H_e) - GRT_{ex}}{\sum (R_p + W - a)^4 \pi R_1}}, \quad (9)$$

де P_x – вхідний тиск зі сторони внутрішньої щілини; k – коефіцієнт Козені-Кармана; G – вагова витрата рідини; H_e – висота хвиль; T_{ex} – температура рідини на вході; R_p – глибина згладжування шороховатого шару; W – глибина згладжування хвилі; a – абсолютне зближення; R_1 – радіус кільця.

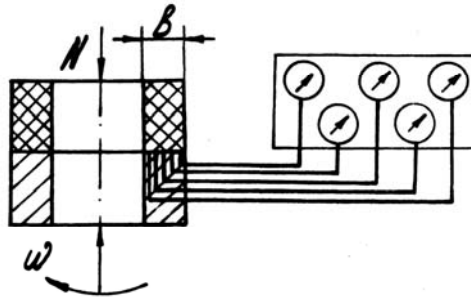


Рис. 2. Схема вузла тертя для визначення перекачувального ефекту

Протікання газу у подібній системі можна описати рівнянням [5]:

$$Q = \frac{P\bar{h}^3(P_{ex}^2 - P_{eux}^2)}{24bL(1 - \eta_a)P_a\mu Ku^2}, \quad (10)$$

де Q – об'ємна витрата газу; b, L – ширина і довжина зони контакту; η_a – відносна фактична площа контакту; Ku – коефіцієнт звивистості; \bar{h} – середня висота між контактним зазором.

За наведеними залежностями до конкретного вузла тертя можна оцінити витрату газового середовища у між контактному просторі. Проте даний метод розрахунку не можна застосовувати при дослідженні полімерних матеріалів, а зокрема асбофрикційних полімерних матеріалів.

Розглянемо процес розкладу фенолформальдегідного матеріалу під дією повітря та без його доступу. За низьких температур (570-670 К) виділяються тільки рідкі продукти за рахунок виділення непрореагованих вихідних мономерів та розщеплення молекул смоли [6]. З підвищенням температури збільшується глибина розкладу та процент виходу газоподібних речовин, а процент рідких продуктів падає. Причому за високих температур (870-970 К) вихід CO та органічних газоподібних

продуктів зменшується за рахунок більшого окислення. Залежність процентного вмісту газів в продуктах розкладу від температури проходить через максимум при температурі 870 К. Продукти розкладу, що виділяються, зокрема рідини, що утворюються на поверхні тертя, можуть утворювати умови межового або напіврідкого тертя з нижчим коефіцієнтом тертя, при цьому утворюються газоподібні продукти деструкції CO_2 та інші, що також можуть відігравати роль “газової подушки”, що сприяє зниженню коефіцієнта тертя. Газоподібні органічні продукти деструкції, що утворюються (речовини на кшталт CH_4), що згоряють при температурі 1070 К, створюють умови для спалахів та горіння фрикційного матеріалу у процесі гальмування за високих температур. Відновлюване середовище, що попереджує протікання хімічних реакцій з неорганічними інгредієнтами, створюється при утворенні CO . Вплив щільного ефекту на постачання кисню в зону тертя з підвищенням температури падає, особливо інтенсивно починаючи з відмітки 670 К.

Виходячи з поставленої задачі досліджень в процесі експерименту реєструвалась різниця тисків ΔP , у між контактному просторі, відносно тиску оточуючого середовища, а також температури поверхонь тертя та моменту тертя. Представлені нижче дані є усередненими значеннями випробувань семи пар взрів досліджуваних матеріалів: сталі 35Л та гетинаксу ФК-24А. Випробування проводились за питомого тиску $P = 0,5 \text{ МПа}$, зміна швидкості обертання відбувалась ступінчато зі швидкостями $V = 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5; \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$.

Узагальнення та математичне опрацювання даних експерименту проводилось з урахуванням інтенсифікації процесу окислення при рості температури, а отже, с підвищенням режимів навантаження та тривання контактування, притерті асбополімерних матеріалів пропорційно зношуванню. При цьому швидкість окислювального зношування можна подати у вигляді:

$$W = A_0 e^{\frac{E}{RT}} c^m, \quad (11)$$

де A_0 – коефіцієнт пропорційності; E – енергія активації; R – універсальна газова стала ($8,314472 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$); T – температура; c – концентрація окислювача; m – показник степеня що визначає порядок реакції. Вищевикладене призводить до трибодеструкції зв’язуючого ФАПМ. Серед продуктів деструкції присутні також газоподібні речовини, що підтверджується експериментом. Отже, надлишковий тиск у між контактному просторі можна кількісно визначити за експериментальними даними у залежності від швидкості (пропорційній температурі) у вигляді:

$$y = k_0 x^{k_1} e^{k_2 x}. \quad (12)$$

Після лінералізації одержується двофакторна залежність:

$$z = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2. \quad (13)$$

Методом найменших квадратів знаходимо значення a_0, a_1, a_2 параметрів лінійної регресії.

При цьому розрахунок дав наступні залежності:

$$T = 183V^{0,74}e^{-0,14V} + 273, \quad (14)$$

$$\Delta P = 91V^{1,53}e^{-0,54V}. \quad (15)$$

При повторному випробуванні тих самих взірців:

$$T = 264V^{0,86}e^{-0,23V} + 273, \quad (16)$$

$$\Delta P = 43V^{-1,06}e^{0,12V}. \quad (17)$$

Адекватність одержаних залежностей перевіряємо за F – критерієм Фішера [7],

$$F = \frac{S_{ad}^2}{S_{відмс.}^2}, \quad (18)$$

де S_{ad}^2 – дисперсія адекватності; $S_{відмс.}^2$ – дисперсія відтворення.

Дисперсія відтворення визначається як сума квадратів відтворюваності:

$$S_{відмс.}^2 = \frac{SS_{відмс.}}{f_{відмс.}}, \quad (19)$$

де $f_{відмс.}$ – число ступенів вільності дисперсії відтворення:

$$f_{відмс.} = \sum_{i=1}^n (m_i - 1), \quad (20)$$

де m_i – число дослідів при однакових значеннях x_i ; n – число різних значень.

$$SS_{відмс.} = \sum_{i=1}^n \sum_{u=1}^{m_i} (y_{iu} - \bar{y}_i)^2, \quad (21)$$

де \bar{y}_i – середнє значення при одному x_i :

$$\bar{y}_i = \frac{1}{m_i} \sum_{u=1}^{m_i} y_{iu}. \quad (22)$$

Залишкова сума квадратів:

$$SS_{зал.} = \sum_{i=1}^n \sum_{u=1}^{m_i} (y_{iu} - \hat{y}_i)^2, \quad (23)$$

де \hat{y}_i – значення функції при x_i .

Число ступенів вільності дисперсії залишкової суми квадратів:

$$f_{зал.} = \sum_{i=1}^n m_i - l, \quad (24)$$

де l – число коефіцієнтів у рівнянні.

Сума квадратів адекватності дорівнює:

$$SS_{ад.} = SS_{зал.} - SS_{відтв.} \quad (25)$$

Число ступенів вільності дисперсії адекватності:

$$f_{ад.} = f_{зал.} - f_{відтв.} \quad (26)$$

Порівняння одержаних критеріїв адекватності з 97,5% критичною точкою $F_{2,30} = 4,18$ свідчить, що середні квадрати неадекватності незначно відрізняються від середнього квадрата помилки (відтворюваності), а отже, одержані рівняння адекватно описують експериментальні дані.

На рис. 3 видно, що у міжконтактному просторі пари ФАПМ + сталь при початкових випробуваннях, а також при повторних, з'являється надлишковий тиск газоподібних продуктів деструкції. Різниця між початковими та повторними випробуваннями у даному випадку є свідченням зміни фізико-механічних властивостей поверхонь, насамперед ФАПМ, як найуразливішого до температурного впливу.

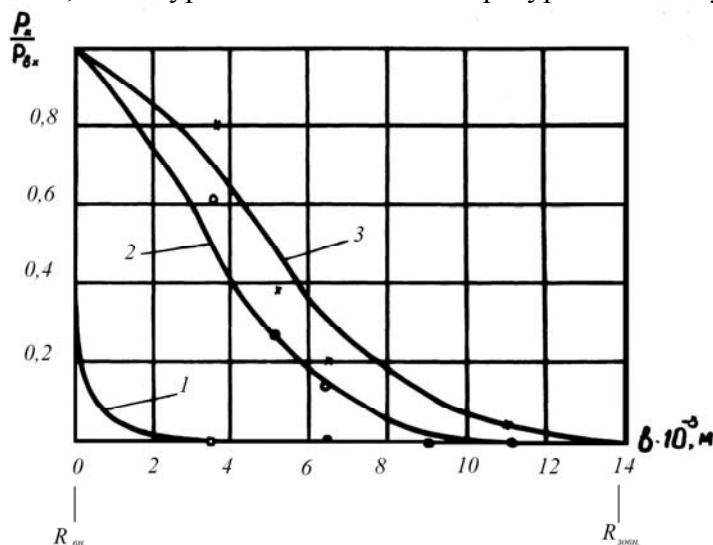


Рис. 3. Розподіл відносного тиску повітря по доріжці тертя у залежності від шорховатості кільцевих взірців: 1 – 0,5 мкм; 2 – 3,2 мкм; 3 – 6,3 мкм

Залежність тиску газу у міжконтактному просторі від температури показує наявність прямої пропорційності (див. рис. 4) у вказаних діапазонах навантажень. З ростом температури тиску газу росте як при початкових, так і при повторних випробуваннях.

На рис. 6, 7 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 ФАПМ. Фенолформальдегідні полімерні матеріали починають набрякати, лінійні розміри збільшуються. Одночасно їхня маса різко зменшується, що призводить до росту масового зношування. Це

достатньо повно свідчить про перевагу фізико-хімічних процесів над фізико-механічними через вихід на поверхню тертя рідких продуктів деструкції. Він призводить до заповненню міжконтактного простору, що сприяє повному виродженню щільового зазору та ефекту перекачування між поверхнями тертя.

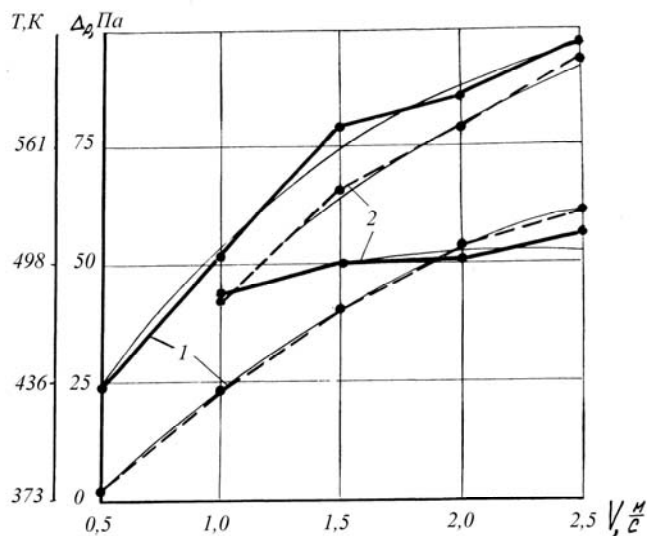


Рис. 4. Залежність температури поверхні тертя та тиску газу у міжконтактному просторі від швидкості: 1 – випробування вихідного матеріалу; 2 – повторні випробування

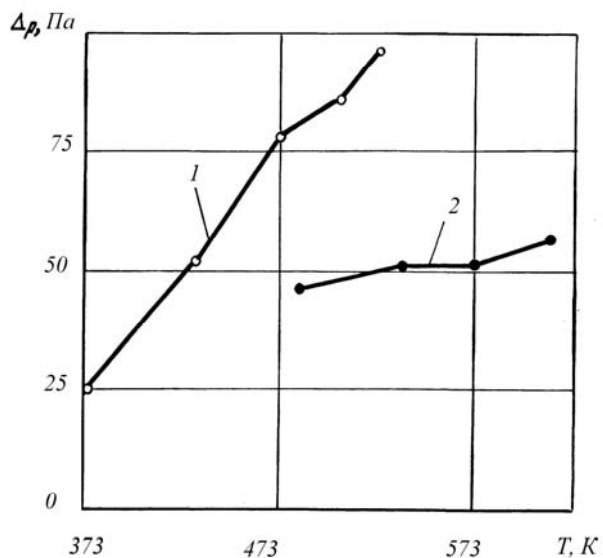


Рис. 5. Залежність тиску газу у між контактному просторі від температури поверхні тертя: 1 – випробування вихідного матеріалу; 2 – повторні випробування

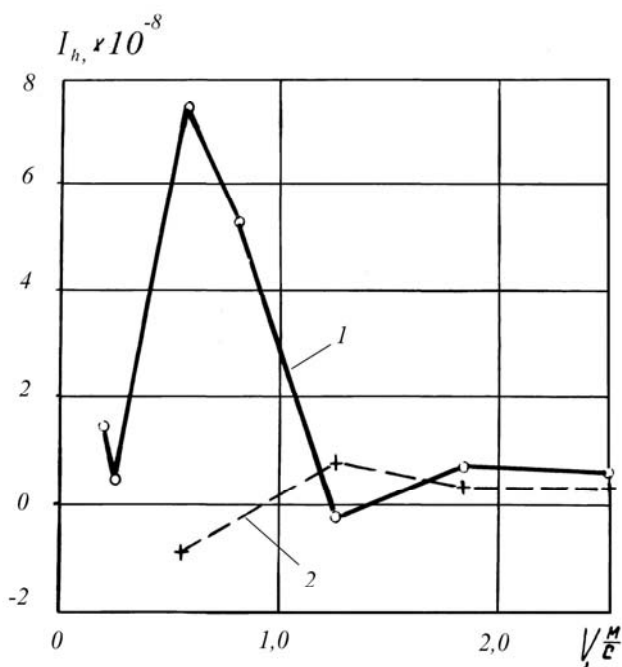


Рис. 6. Залежність лінійного відносного зношування ФАПМ від швидкості ковзання: 1 – випробування вихідного матеріалу; 2 – повторні випробування

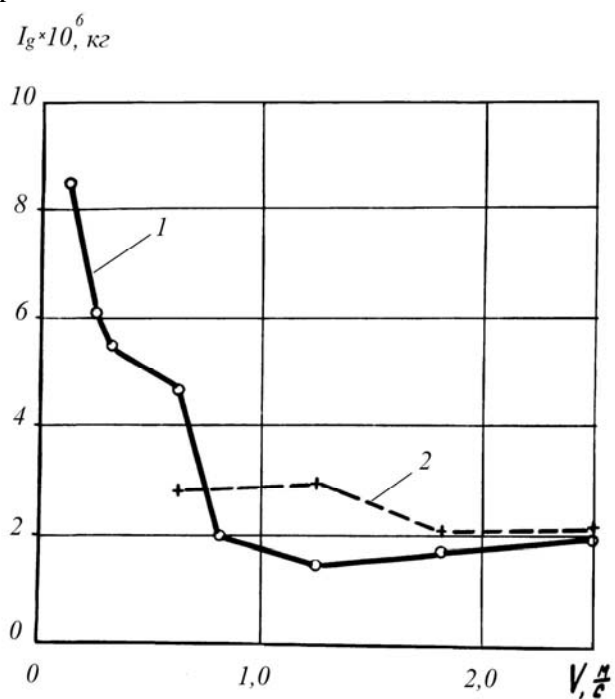


Рис. 7. Залежність масового зношування ФАПМ від швидкості ковзання: 1 – випробування вихідного матеріалу; 2 – повторні випробування

Результати газодинаміки при повторних дослідженнях тих самих пар тертя відрізняються від значень, одержаних при випробуванні нових зрізів в бік зниження надлишкового тиску ΔP . Аналізуючи суть цих змін, було проведено серію експериментів по визначенню зміни густини фенолформальдегідних полімерних матеріалів по товщині досліджуваного зрізця в залежності від об'ємної температури та тривалості нагріву.

Необхідна температура поверхні ФАПМ у процесі дослідження досягалась шляхом зміни швидкості ковзання та навантаження на пару тертя. Визначення густини відбувалось шляхом зважування зрізців до та після пошарового зняття на плоскошліфувальному верстаті контролюваного шару ФАПМ.

На рис. 8 представлені залежності зміни густини поверхневих шарів ФАПМ від температури. Зменшення густини ретинаксу ФК-24А дає підставу стверджувати, що в'язуча речовина вигорає майже повністю, на поверхні тертя утворюється композиція з азбесту, бариту та коксоподібної речовини, що утворюється в процесі термодеструкції фенол формальдегідної смоли.

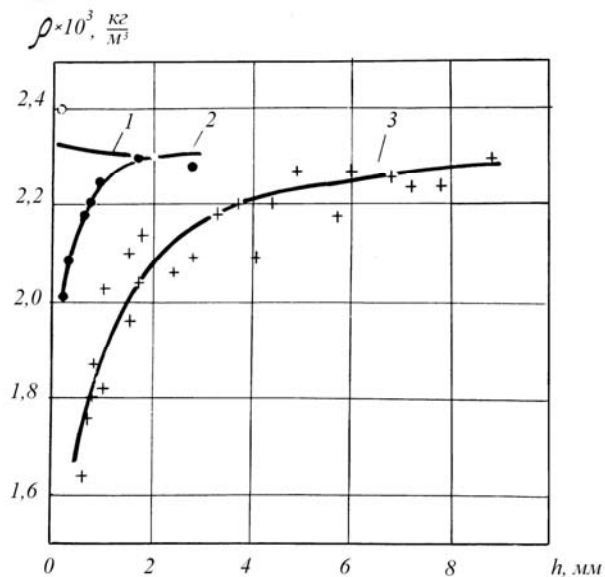


Рис. 8. Зміна густини ретинаксу ФК-24А по глибині за різних температур поверхні тертя: 1 – 423 К; 2 – 573 К; 3 – 873 К

Отже, газодинаміка у міжконтактному просторі має складний характер, який, в залежності від режимів тертя та механіко-фізико-хімічних властивостей поверхні ФАПМ, може набувати додатного або від'ємного значення. Надлишковий тиск перешкоджає міграції в між контактний простір оточуючого середовища та створює умови для утворення зон плівкового голодування [8]. Подальші дослідження будуть присвячені дослідженню газодинаміки у міжконтактному просторі за деструкції ФАПМ.

Література

1. Зиновьев Е.В. Физико-химическая механика трения и оценка асбофрикционных материалов / Е.В. Зиновьев, А.В. Чичинадзе. – М.: Наука, 1978. – 203 с.
2. 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.
3. Бакли Д. Поверхностные явления при адгезии и фрикционном взаимодействии / Д. Бакли. – М.: Машиностроение, 1986. – 360 с.
4. Крагельский И.В. Основы расчетов на трение и износ / И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Комбалов. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.
5. 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.
6. Георгиевский Г.А. Влияние различных инградиентов на фрикционные свойства пластмасс / Г.А. Георгиевский // Сб. «трение и износ в машинах». – Изд-во АН СССР, 1962. – Вып. 16. – С. 121-150.
7. Ахназарова С.Л. Методы оптимизации эксперимента в химической технологии / С.Л. Ахназарова, В.В. Каферов. – М.: Высшая школа, 1985. – 327 с.
8. 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 редакційної колегії 10.09.2014 р.
Рекомендовано до друку д.т.н., професором **Конєєм Б.В.**,
к.т.н., доцентом **Левчук К.Г.** (м. Київ)*

**RESEARCH OF GAS DYNAMICS IN INTERCONTACT SPACE
OF FRICTION SURFACES****L. I. Kryshchtopa**

*Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas;
76019, Ivano-Frankivsk, Carpathians str., 15;
ph. +380 (342) 72-71-31; e-mail: L.I.Kryshchtopa@mail.ru*

For the design of physical and chemical and mathematical model of mechanism of migration of environment it is considered on the friction contact: adsorption, pumping over, crack effects and process of curriculum of phenol formaldehyde material under action of air and without its access.

Key words: *intercontact space, friction contact, surfaces of friction, adsorption, adsorbat, adsorbent, pumping effect over, crack effect, phenol formaldehyde surface materials.*