

**Криштопа Л.І.,
Богатчук І.М.**

Івано-Франківський національний
технічний університет нафти і газу,
м. Івано-Франківськ, Україна
E-mail: L.I.Kryshstopa@mail.ru

**ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЗМУ
ПОСТУПЛЕННЯ ГАЗОВОГО СЕРЕДОВИЩА
З ЗОВНІ У МІЖКОНТАКТНИЙ ПРОСТІР
ПОВЕРХОНЬ ТЕРТЯ. ЧАСТИНА 1**

УДК 621.891

Для моделювання математичної моделі механізму міграції оточуючого середовища на фрикційний контакт розглянуто: адсорбційний, перекачувальний, щілинний 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, щілинний ефект, фенолформальдегідні матеріали.

Вступ

Теоретичне обґрунтування механізму поступлення оточуючого середовища на фрикційний контакт намагались розглянути в роботі [1]. Припускається, що існує два механізми проникнення газового середовища на фрикційні поверхні: перший, через контактний зазор (так званий щілинний ефект) та другий, шляхом адсорбування на відкритих для газу ділянках контакту тертя (адсорбційний ефект) – у випадку неповного перекриття пар тертя ($K_{\text{еж}} < 1$). Кількість повітря, що поступає на контакт, до складу якого входить кисень, визначає інтенсивність термоокисних, деструктивних та інших хемосорбційних процесів. У роботі [2] вказується на наявність ефекту перекачування середовища в радіально-кільцевих парах від центра до периферії.

Постановка проблеми

Провести лабораторні дослідження механізму поступлення газового середовища із зовні до міжконтактного простору поверхонь тертя та створити математичну модель механізму міграції оточуючого середовища на фрикційний контакт.

Кількість газового середовища, що походить за одиницю часу на одиницю номінальної поверхні тертя за рахунок адсорбційного ефекту визначається [1]:

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

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 асбфрикційної пластмаси, що складає вузол тертя.

Адсорбування газових молекул на адсорбенті відбувається практично в мономолекулярний шар при порівняно невисокій швидкості їхнього випаровування за час $10^{-5} - 10^{-10}$ с. Умови утворення такого шару визначаються з виразу:

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

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.

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

- контактний зазор вважатимемо щілиною постійної висоти:

$$h_{\text{еф}} = h_{\text{еф1}} + h_{\text{еф2}}, \quad (3)$$

де $h_{\text{еф1}}$, $h_{\text{еф2}}$ – 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 $K_{\epsilon z} < 1$ не враховується потрапляння газового середовища на контактний зазор по сторонам асбодфрикційного елемента, що направлено вздовж радіуса;

- на середньому діаметрі тертя $d_{sep} = (D + d)/2$, за термоокислювальної 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:

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

де $Q_{щ}$ – спільний розхід газу при щілинному ефекті, $1 \cdot 10^{-6}$ м³/с;

μ – динамічний коефіцієнт в'язкості при відповідній температурі;

ΔP_{ef} – перепад тиску на кінцях щілини.

Секундний розхід газового середовища в контактній щілині на одиниці площі тертя:

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

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

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

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

$$Q = Q_a + Q_{щ}. \quad (8)$$

Оскільки газове середовище перекачується від центра до периферії в радіально-кільцевих парах тертя (рис. 1), то для визначення поточного тиску рідин (газів), що стискаються по ширині доріжки тертя, запропоновано залежність:

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

де P_x – вхідний тиск зі сторони внутрішньої щілини;

k – коефіцієнт Козені-Кармана;

G – ваговий розхід рідини;

H_{ϵ} – 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.

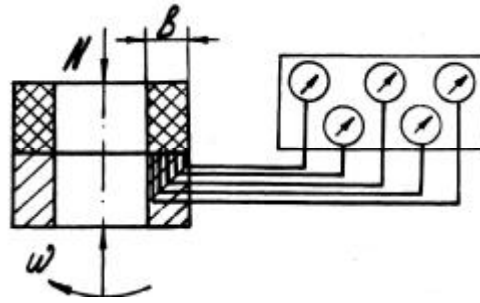


Рис. 1 – Схема вузла тертя для визначення перекачувального ефекту

Протікання газу у подібній системі можна описати рівнянням [3]:

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

де Q – об'ємний розхід газу;

b, L – ширина і довжина зони контакту;

η_a – відносна фактична площа контакту;

Ki – коефіцієнт звивистості;

\bar{h} – середня висота між контактним зазором.

За наведеними залежностями до конкретного вузла тертя можна оцінити розхід 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 не-прореагованих вихідних мономерів та розщеплення молекул смоли [4]. З підвищенням температури збільшується глибина розкладу та відсоток виходу газоподібних речовин, а рідких продуктів навпаки 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 утворюються на поверхнях тертя, можуть утворювати умови 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 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.

Результати дослідження

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 $P = 0,5$ МПа, зміна швидкості обертання відбувалась ступінчато зі швидкостями $V = 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5$ м · 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 представляється 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;

T – температура;

c – концентрація окислювача;

m – показник степеня що визначає порядок реакції.

Це 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:

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

що лінералізується наступним чином:

$$\begin{cases} z = \ln y; \\ a_0 = \ln k_0; \\ x_1 = \ln x; \\ a_1 = k_1; \\ a_2 = k_2; \\ x_2 = x. \end{cases} \quad (13)$$

Після лінералізації одержується двофакторна залежність:

$$z = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2. \quad (14)$$

Методом найменших квадратів знаходимо значення a_0, a_1, a_2 параметрів лінійної регресії, розв'язуючи систему рівнянь:

$$\begin{cases} a_0 n + a_1 \sum_{i=1}^n x_{1i} + a_2 \sum_{i=1}^n x_{2i} = \sum_{i=1}^n y_i; \\ a_0 \sum_{i=1}^n x_{1i} + a_1 \sum_{i=1}^n x_{1i}^2 + a_2 \sum_{i=1}^n x_{1i} x_{2i} = \sum_{i=1}^n y_i x_{1i}; \\ a_0 \sum_{i=1}^n x_{2i} + a_1 \sum_{i=1}^n x_{1i} x_{2i} + a_2 \sum_{i=1}^n x_{2i}^2 = \sum_{i=1}^n y_i x_{2i}. \end{cases} \quad (15)$$

При цьому розрахунок дав наступні залежності:

$$T = 183V^{0,74} e^{-0,14V} + 273, \quad (16)$$

$$\Delta P = 91V^{1,53} e^{-0,54V}. \quad (17)$$

При повторному випробуванні тих самих взірців:

$$T = 264V^{0,86} e^{-0,23V} + 273, \quad (18)$$

$$\Delta P = 43V^{-1,06} e^{0,12V}. \quad (19)$$

Адекватність одержаних залежностей перевіряємо за F – критерієм Фішера [5],

$$F = \frac{S_{ad}^2}{S_{відмв.}^2}, \quad (20)$$

де S_{ad}^2 – дисперсія адекватності;

$S_{відмв.}^2$ – дисперсія відтворення.

Дисперсія відтворення визначається як сума квадратів відтворюваності:

$$S_{відмв.}^2 = \frac{SS_{відмв.}}{f_{відмв.}}, \quad (21)$$

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

$$f_{відмв.} = \sum_{i=1}^n (m_i - 1), \quad (22)$$

де m_i – число дослідів при однакових значеннях x_i ;

n – число різних значень.

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

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

$$\bar{y}_i = \frac{1}{m_i} \sum_{in=1}^n y_{in} \quad (24)$$

Залишкова сума квадратів:

$$SS_{\text{зал.}} = \sum_{i=1}^n \sum_{u=1}^{m_i} (y_{iu} - \hat{y}_i)^2, \quad (25)$$

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

Число ступенів вільності дисперсії залишкової суми квадратів:

$$f_{\text{зал.}} = \sum_{i=1}^n m_i - l, \quad (26)$$

де l – число коефіцієнтів у рівнянні.

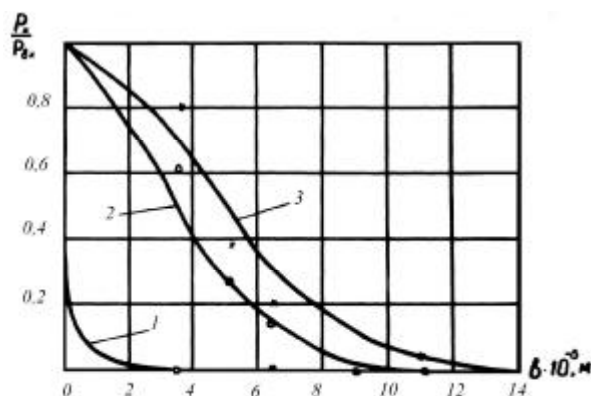


Рис. 2 – Розподіл відносного тиску повітря по доріжці тертя у залежності від шорховатості кільцевих взірців:
1 – 0,5 мкм; 2 – 3,2 мкм; 3 – 6,3 мкм

Сума квадратів адекватності дорівнює:

$$SS_{\text{ад.}} = SS_{\text{зал.}} - SS_{\text{відтв.}} \quad (27)$$

Число ступенів вільності дисперсії адекватності:

$$f_{\text{ад.}} = f_{\text{зал.}} - f_{\text{відтв.}} \quad (28)$$

Висновки

Таким чином, рівнянь регресії перевірка адекватності проводиться за схемою дисперсійного аналізу. Порівняння одержаних критеріїв адекватності з 97,5 % критичною точкою $F_{2,30} = 1,18$ свідчить, що середні квадрати неадекватності незначно відрізняються від середнього квадрата помилки (відтворюваності), а отже, одержані рівняння адекватно описують експериментальні дані.

На рис. 2 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, та насамперед, ФАПМ, як найуразливішого до температурного впливу, що буде предметом подальших досліджень при створенні механіко-фізико-хімічної моделі механізму поступлення газового середовища з зовні у міжконтактний простір поверхонь тертя.

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. 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.
4. Георгиевский Г.А. Влияние различных ингредиентов на фрикционные свойства пластмасс / Г.А. Георгиевский // Сб. «Трение и износ в машинах» Издат-во АН СССР – 1962. – Вып. 16. – С. 121 - 150.
5. Ахназарова С.Л. Методы оптимизации эксперимента в химической технологии / С.Л. Ахназарова, В.В. Каферов // М.: Высшая школа, 1985. – 327 с.

Надійшла в редакцію 15.10.2014

Kryshchopa L.I., Bogatchuk I.M. Research of mechanism of receipt of gas environment with outwardly in intercontact space of surfaces of friction. Part 1.

The article is devoted to the problem of laboratory researches of mechanism of receipt of gas environment with outwardly to intercontact space of friction surfaces and create the physical, chemical and mathematical model of mechanism of migration of environment to the friction contact. For the design of model of migration of environment mechanism which considered to the friction contact adsorption, pumping and crack effects take place.

A gas dynamic at intercontact space has a difficult character depending on the modes of friction and mechanical, physical and chemical properties of friction surface can get the positive or negative value. Surplus pressure hinders to migration in between contact space of environment and creates terms for formation areas of pellicle starvation. Subsequent researches will be devoted to research of gas dynamic at intercontact space for destructions of phenol formaldehyde surface materials.

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

References

1. Zinovev E.V. *Physiko-khimicheskaya mekhanika treniya i otsenka asbofriktsionich materialov*. E.V. Zinovev, A.V. Chichinadze. M.: Nauka, 1978. 203 p.
2. Sokolov V.I. *Raspredelenie davleniya szhimayemoy i neszhimayemoy zhidkosti v ploskom stike po napravleniyu eyey rashoda*. V.I. Sokolov. *Megvuz. Cbornik Kalinin gos. un-t.* - 1979. pp. 133 - 141.
3. Pokusaev V.V. *Issledovaniye rashoda vozduha cherez kontakt tochechnikh poverkhnostey*. V.V. Pokusaev. *Sb. «Kontaktnoye vzaimodeystviye tverdikh tel»*, Kalinin. gos. un-t. 1982. pp. 22 - 27.
4. Georgievskiy G.A. *Vliyaniye razlichnikh ingradientov na friktsionnie svoystva plastmas*. G.A. Georgievskiy. *Sb. «treniye i iznos v machinah» of Izdat-vo AN USSR* - 1962. VIP. 16. pp. 121 - 150.
5. Ahnazarova S.L. *Metodi optimizatsii experimenta v chemicheskoy technologii*. S.L. Ahnazarova, V.V. Kaferov. M.: Vichsha shkola, 1985. 327 p.