

УДК 531.44(045)

DOI: 10.18372/0370-2197.1(86).14492

*О. І. БОГДАНОВИЧ, В. В. ТОКАРУК, Ю. Я. СТАТНИКОВ**Національний авіаційний університет, Україна*

ВИЗНАЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ АКТИВАЦІЇ МЕХАНО-ХІМІЧНОГО МОДИФІКУВАННЯ СТАЛІ ШХ15 В СЕРЕДОВИЩІ АВІАЦІЙНОГО ПАЛИВА ТС-1 ДОВГОТРИВАЛОГО ЗБЕРІГАННЯ

Наведено методику оцінки енергії активації другої стадії трибологічної реакції – механо-хімічного модифікування E^M та результати застосування цієї методики на прикладі раніше проведених трибокінетичних випробувань сталі ШХ15 у вуглеводневому середовищі - авіаційному наливі ТС-1 довготривалого зберігання.

Ключові слова: *паливо ТС-1 довготривалого зберігання, знос, зношення, кінетична модель, конструкційні матеріали, критерій зносостійкості, машина тертя, поверхневе руйнування, трибокінетичний експеримент, трибоспряження, енергія активації*

Вступ. Серед різноманіття вуглеводневих рідин, які застосовуються на сучасній техніці, можна виділити ту частину, що має молекулярну масу менше 300 і в'язкість при 20° С менше 50 сСт. Умовно цю групу вуглеводневих рідин, яку застосовують у якості палива (бензинів, гасів, дизельних палив) і робочих тіл (рідин для гідросистем, спеціальних рідин і т.п.), відносять до низькомолекулярних [1].

Про масштаби застосування низькомолекулярних вуглеводневих рідин на техніці говорить той факт, що більш половини всієї нафти, що добувається, переробляється і використовується у якості різних палив.

Численні і складні агрегати паливних і гідравлічних систем сучасної техніки (насоси, клапани, регулятори, розподільники і т.п.) працюють у середовищі низькомолекулярних вуглеводневих рідин, які одночасно є мастильним середовищем. Слід зазначити, що тертя металів, наприклад в авіаційних насосах-регуляторах, відбувається в умовах великих питомих навантажень (до 2000 МПа), швидкостей ковзання (до 2 м/с) і робочих температур (до 120 °С) [2].

Після розробки спеціальних методів і технічних засобів дослідження протиносних властивостей низькомолекулярних вуглеводневих рідин, наприклад з в'язкістю від 1 до 5 сСт при 20 °С, було встановлено, що вони володіють практично помітною здатністю захищати метали від зношування, та мають при однаковій або близькій в'язкості помітне розходження в здатності захищати метали які зазнають тертя [3].

В даній роботі використовувалась кінетична модель нормального механо-хімічного зношування при граничному терті [4]. На підставі цієї моделі була розроблена розрахунково-експериментальна методика оцінки кінетичних і енергетико-активаційних характеристик зносостійкості матеріалів трибоспряжень, яка дозволила експериментально вивчати закономірність зміни енергії активації поверхневого руйнування у діапазоні нормального зношування і поглибити уявлення про енергетичну природу структурного пристосування матеріалів під час тертя.

Мета досліджень. Визначити енергію активації другої стадії трибологічної реакції (ТР) – механо-хімічного модифікування на підставі раніше проведених трибокінетичних випробувань сталі ШХ15 в середовищі авіаційного палива ТС-1 довготривалого зберігання.

Постановка задачі. Кінетична модель дозволила розробити розрахунково-експериментальну методику оцінки кінетичних і енергетико-активаційних характеристик зносостійкості і сумісності матеріалів трибоспряжень [4, 5], відмінною рисою якої є проведення звичайних трибологічних випробувань при двох чи більше термостатованих режимах, побудові графіків залежності логарифма кількісного критерію оцінки зносу (перший порядок) чи зворотної залежності (другий порядок) від тривалості випробувань. Лінійні залежності підтверджують передбачуваний порядок N досліджуваної стадії, графічно встановлюють константи швидкостей K цих стадій, що дорівнюють тангенсам кутів нахилу прямих до осі абсцис, а також дозволяють розрахувати зазначені кінетичні характеристики аналітично, тобто за формулами.

Експериментальна частина. Трибокінетичні дослідження проводили на машині тертя УПС-1, без збиткового тиску в камері, при навантаженні $P = 98,1$ Н, температурі $T_1 = 303$ К та $T_2 = 333$ К та швидкості ковзання $V_{\text{шк}} = 1,25$ м/с. Конструкційний матеріал пари тертя — єдиний матеріал, який використовують у стандартних трибологічних дослідженнях за ГОСТ 9490-75 і ДСТУ 23.221-84 легвана сталь ШХ15. У даній роботі у якості мастильного матеріалу для трибокінетических дослідів використовували вуглеводневу рідину — реактивне паливо марки ТС-1 довготривалого зберігання (ДСТУ 320.001249943.011-99) Кременчуцького НПЗ. Після кожного дослідження заданої тривалості t визначали: 1) зовнішній вигляд твердофазних елементів трибоспряження включаючи спостереження за допомогою інструментального мікроскопа МИМ-7 і скануючого електронного мікроаналізатора Samscan 4DV (сліди пошкоджуваності); 2) геометричну форму плям зносу (коло або еліпс); 3) значення величин зносу. При цьому, діапазон нормального механо-хімічного зносу відповідає діапазону стаціонарного стану системи тертя або діапазону структурної пристосованості (СП) матеріалів при терті.

Кінетичні характеристики II стадії ТР механо-хімічного модифікування оцінювали за відносною площиною вторинних структур (ВС):

$$\delta = \frac{S_{\text{BC}}}{S_{\text{K}}} \times 100\% \quad (1)$$

де $S_{\text{K}} = S_1 + S_2 + S_3$ — повна площа контакту рівна сумі площ плям зносу трьох куль; S_{BC} — частина площі контакту, зайнята ВС, яку розраховували за формулою:

$$S_{\text{BC}} = S_{\text{K}} - \frac{\Delta V_{\text{CP}}}{\Delta t \cdot K^P \cdot h_{\text{BC}}}, \quad (2)$$

де $\Delta V_{\text{CP}} = V_{\text{CP}t_i} - V_{\text{CP}t_{i-1}}$ — інтервал середніх значень сумарних об'ємів зносу трьох куль відповідних двом значенням інтервалу Δt , $V_{\text{CP}t_i}$ і $V_{\text{CP}t_{i-1}}$ відповідно; h_{BC} — товщина ВС чи товщина механо-хімічного модифікування, величина перемінна: із збільшенням тривалості випробувань h_{BC} збільшується.

В даний час оцінити h_{BC} якимось способом з досить задовільною, для розрахунку кінетичних і енергетикоактиваційних характеристик, точністю, не є можливим. Тому h_{BC} необхідні для розрахунку S_{BC} , а потім і відносної площі ВС. δ , вибирали таким чином, щоб дотримувалася вище вказана умова зменшення h_{BC} із збільшенням t перший порядок II стадії ТР механо-хімічного модифікування, оскільки трибохімічні (трибокінетичні) реакції мінеральних та жирових змашувальних матеріалів, як правило, мають перший порядок [2, 4]; при цьому, до початку тертя твердофазні елементи трибоспряжень покриті окисними плівками, що з відомим ступенем умовності можна вважати окисні плівки в початковий момент часу $t = 0$ вторинними структурами. Звідси впливає рівність $S_{\text{BC}} = S_{\text{K}}$,

тому, що в початковий момент часу окисними плівками покрита вся площа твердофазних елементів, а з рівняння (1) випливає $\delta = 100\%$, тобто початкова точка кінетичних графіків при $t = 0$ завжди відома.

Результати розрахунку. Таким чином, за результатами трибокінетичних випробувань, проведених при вищевказаних умовах, розраховували S_{BC} і δ (табл. 1), а потім будували графік залежності $\lg\delta = f(t)$ (рис. 1).

Таблиця 1

Кінетичні характеристики та енергія активації механо-хімічного модифікування E^M

Вісьового навантаження, Н	Температури, Т, К	Значення			Константи швидкості модифікування $K^M \times 10^{-4}, c^{-1}$	Інтервали часу Δt , для яких розраховували $\Delta t \times 10^{-3}, c^{-1}$	Значення K^M встановлені графічно	Середні значення $K^M, K^M \times 10^{-4}, c^{-1}$	Значення енергії активації зносу, E^p , кДж/моль
		Площі вторинних структур S_{BC}, mm^2	Відносної площі вторинних структур, $\delta, \%$						
98,1	333	0,6254	85,53	0,5689	3,6-3	$\text{tg}155^\circ = -0,4663$	0,4683	1,98	
		0,7617	81,96	0,3318	4,2-3,6				
0,8154		74,36	0,5043	4,8-4,2					
98,1	303	0,990	93,41	1,0931	2,4-1,8	$\text{tg}136^\circ = -0,9656$	0,9510		
		1,0865	90,60	0,6028	3-2,4				
		1,1062	82,05	1,1575	3,6-3				

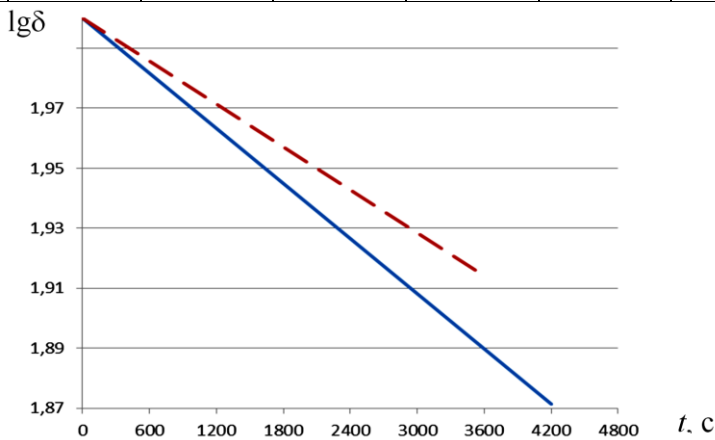


Рис. 1. Залежність логарифма відносної площі S_{BC} від тривалості випробувань t в авіаційному паливі ТС-1 довготривалого зберігання
 -- $T_1 = 303$ К; — $T_2 = 333$ К;

Лінійні залежності $\lg\delta$ від t підтвердили перший порядок модифікування, графічно встановили константи швидкості цієї стадії K^M , а також дозволили розрахувати зазначені кінетичні характеристики (N^M, K^M) і енергію активації механо-хімічного модифікування E^M (табл. 1) аналітично за рівнянням Арреніуса:

$$E^M = \frac{RT_1 T_2 \ln \frac{K_2}{K_1}}{T_2 - T_1} = \frac{1,9144 T_1 T_2 \lg \frac{K_2}{K_1}}{T_2 - T_1} \times 10^{-2} \text{ кДж/моль} \quad (3)$$

де K_1 і K_2 — константи швидкості досліджуваної стадії, встановлені при температурах T_1 і T_2 відповідно;

1,9144 — добуток газової постійної R на модуль переводу натуральних логарифмів у десяткові.

Висновки. Розраховані значення кінетичних характеристик і енергії активації II стадії ТР - механо-хімічного модифікування (N^M , K^M , E^M) підтвердили конструктивність і адекватність розробленої раніше кінетичної моделі нормального механо-хімічного зношування [4]. Ці ж значення (N^M , K^M , E^M) підтвердили адекватність запропонованої в даній роботі формули розрахунку площі ВС S_{BC} і розрахунково-експериментальної методики оцінки кінетичних характеристик другої стадії ТР. Установлена мінімальність значень енергії активації механо-хімічного модифікування E^M у діапазоні нормального механо-хімічного зношування, що відповідає діапазону СП матеріалів трибоспряжень, характеризує енергетико-активаційну природу СП. Розраховані значення E^M для вуглеводневої рідини - авіаційного палива ТС-1 довготривалого зберігання доповнили енергетико-активаційний матричний критерій оцінки сумісності матеріалів трибоспряжень [4; 5].

Список літератури

1. Аксенов А.Ф. Трение и изнашивание металлов в углеводородных жидкостях. - М.: Машиностроение, 1977.- 147 с.
2. Летин А.С. Ресурс жидких смазочных материалов / Летин А.С. // Триботехника – машиностроению: Тез. докл. II Всесоюз. науч.- техн. конф., Пушино-на-Оке, нояб. 1983 г. – М., 1983. – 33 с.
3. Костецкий Б.И., Носовский И.Г., Караулов А.К. и др. Поверхностная прочность материалов при трении.- К.: Техника, 1976. - 296 с.
4. Богданович А.И. Кинетические и энергетико-активационные характеристики износостойкости и совместимости материалов трибоспряжений: Автореф. дис. к-та техн. наук, - К., 1987. - 20 с.
5. Богданович О.І. Визначення енергії активації механо-хімічного модифікування сталі ШХ 15 в середовищі авіаційного палива РТ та гідрорідини АМГ-10 / О.І. Богданович, С.О. Пузік // Вісник Національного авіаційного університету. - 2005. - №4 (26). - С. 76-80.
6. Некипелов Ю.Г. Результаты межведомственных испытаний прибора УПС-01 для оценки противоизносных свойств реактивных топлив. / Некипелов Ю.Г., Терехин В.И., Хмыз Ю.М. // в кн.: Вопросы авиационной химмотологии. – К.: 1980, с. 42-47.
7. Пат. № 2063625 Российская Федерация, МПК 6 G 01 N 3/56. - № 5028230/28; Заявл. 02.12.1991; Опубл. 10.07.1996, Бюл. № 19-5 с.

Стаття надійшла до редакції 05.03.2020.

Богданович Олександр Іванович – доцент кафедри підтримання льотної придатності повітряних суден, Національний авіаційний університет, пр. Космонавта Комарова, 1, м. Київ, Україна, 03058, тел.: +38 044 406 76 27.

Токарук Віталій Володимирович – старший викладач кафедри підтримання льотної придатності повітряних суден, Національний авіаційний університет, пр. Космонавта Комарова, 1, м. Київ, Україна, 03058, тел.: +38 044 406 76 58. E-mail: vetalion1980@gmail.com.

Статніков Юрій Яковлевич – асистент кафедри підтримання льотної придатності повітряних суден, Національний авіаційний університет, пр. Космонавта Комарова, 1, м. Київ, Україна, 03058, тел.: +38 044 406 76 27.

A. I. BOGDANOVYCH, V. V. TOKARUK, Y. I. STATNIKOV

DETERMINATION OF THE ENERGY ACTIVATION OF MECHANICAL-CHEMICAL MODIFICATION OF “IIIX15” STEEL IN AVIATION FUEL “TC-1” LONG-TERM STORAGE

Complex aggregates of fuel and hydraulic systems of modern technology (pumps, valves, regulators, distributors, etc.) operate in a medium of low molecular weight hydrocarbon liquids, which are simultaneously a lubricating medium. On the basis of the kinetic model of normal mechanochemical wear at the boundary friction, a computational-experimental method for the estimation of kinetic and energy-activation characteristics of the wear resistance of tribological materials was developed, which allowed to experimentally study the regularities of changing the activation energy of the surface runoff and breaking adaptation of materials during friction. Namely, to determine the activation energy of the second stage of tribological reaction - mechanical and chemical modification on the basis of previously conducted tribokinetic tests of steel “IIIX15” in aviation fuel “TC-1” long-term storage and to supplement the calculated values of the energy-activation matrix criterion for assessing compatibility of materials.

Keywords: TC-1 fuel long-term storage, wear, wearing, kinetic model, structural materials, wear resistance criterion, friction machine, surface fracture, tribokinetic experiment, tribonation, activation energy.

References

1. Aksenov A.F. *Trenie i iznashivanie metallov v uglevodorodnykh zhidkostyakh.* - M.: Mashinostroenie, 1977. - 147 s.
2. Letin A.S. *Resurs zhidkikh smazochnykh materialov / Letin A.S. // Tribotekhnika – mashinostroeniye: Tez. dokl. II Vsesoyuz. nauch.- tekhn. konf., Pushhino-na-Oke, noyab. 1983 g. – M., 1983. – 33 s.*
3. Kosteczkiy B.I., Nosovskiy I.G., Karaulov A.K. i dr. *Poverkhnostnaya prochnost materialov pri trenii.* - K.: Tekhnika, 1976. - 296 s.
4. Bogdanovich A.I. *Kineticheskie i e`nergetiko-aktivacziorny`e kharakteristiki iznosostojkosti i sovместimosti materialov tribospryazhenij: Avtoref. dis. k-ta tekhn. nauk, - K., 1987. - 20 s.*
5. Bohdanovych O.I. *Vyznachennia enerhii aktyvatsii mekhano-khimichnoho modyfikuvannia stali ShKh 15 v seredovyshchi aviatsiinoho palyva RT ta hidroridyny AMH-10 / O.I. Bohdanovych, S.O. Puzik // Visnyk Natsionalnoho aviatsiinoho universytetu. - 2005. - №4 (26). - S. 76-80.*
6. Nekipelov Yu.G. *Rezultaty mezhvedomstvennykh ispytaniy pribora UPS-01 dlya ocenki protivoznosnykh svoystv reaktivnykh topliv. / Nekipelov Yu.G., Terekhin V.I., Khmyz Yu.M. // v kn.: Voprosy aviacziornoj khimotologii. – K.: 1980, s. 42-47.*
7. Pat. # 2063625 Rossijskaya Federacziya, MPK 6 G 01 N 3/56. - # 5028230/28; Zayavl. 02.12.1991; Opubl. 10.07.1996, Byul. # 19-5 s.