

Дудка А. М.,*
Кузяєв І.М.,*
Начовний І.І.,*

Буря О.І.,**

Ткаченко Е.В.,***

Толстенко Ю.В.***

*Український державний хіміко-технологічний університет,
м. Дніпро, Україна

**Дніпровський державний технічний університет,

м. Кам'янське, Україна,

***Севастопольський державний університет

E-mail: An.Dudka@i.ua.

ЗАСТОСУВАННЯ КОМП'ЮТЕРНИХ ПРОГРАМ ДЛЯ ОТРИМАННЯ РІВНЯНЬ АПРОКСИМАЦІЇ ДОСЛІДЖЕНЬ ТРИБОТЕХНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ КОМПОЗИТІВ

УДК 678.743.41/45:678.06

Розроблено композиційні матеріали на основі фторопласту-4 з волокнистими (вуглецеві волокна з тканини Урал 22) та дисперсними (бентоніт, графіт ГК-1 і диоксид титану) наповнювачами, визначено основні властивості, та залежність їх триботехнічних характеристик від умов експлуатації. Проведено порівняльну оцінку зносостійкості розроблених композитів в умовах тертя без змащування при швидкості ковзання $V = 0,3$ м/с і питомому навантаженні $P_n = 1$ МПа і отримано склади триботехнічних матеріалів для енергонапружених вузлів тертя та ущільнень хімічного обладнання. Експериментальні дані оброблено за допомогою пакету прикладних програм MathCAD 11 з метою отримання аналітичного рівняння, що описує залежність величини коефіцієнта тертя композиційного матеріалу від швидкості ковзання та питомого навантаження.

Ключові слова: композиційні матеріали; фторпласт-4; наповнювачі; триботехнічні характеристики; апроксимуючі рівняння.

Постановка проблеми

Сучасний стрімкий розвиток передових технологій, та і суспільства в цілому, неможливо уявити без розробки та освоєння виробництва нових перспективних матеріалів, які здатні забезпечувати працездатність технологічного обладнання в більш жорстких умовах експлуатації. Одним з характерних напрямів розвитку хімічного машино- та апаратобудування є збільшення робочих параметрів обладнання (тиск робочого середовища, температура процесу, швидкість робочих органів і навантаження в них, агресивна дія робочого середовища тощо). За таких умов постійно зростає енергонапруженість вузлів триботехнічного призначення (пар тертя та ущільнень), яка негативно впливає на показники надійності та довговічності машин та апаратів.

Мета і постановка задачі

Одним з напрямів вирішення зазначених проблем є створення сучасних матеріалів, які здатні забезпечувати працездатність в умовах підвищеної енергонапруженості. Широке застосування в машинобудуванні набули композиційні матеріали триботехнічного призначення з полімерною матрицею. Особливий інтерес представляє використання, в якості полімерної матриці композитів фторопласту - 4, який має – низький коефіцієнт тертя, виняткову хімічну стійкість майже у всіх хімічних середовищах та достатньо високу термостійкість. Проте, у чистому вигляді фторопласт-4 майже не застосовується в якості робочих матеріалів енергонапружених вузлів тертя та ущільнень внаслідок незадовільної стійкості до зношування та недостатньої механічної й термічної стійкості. Композиційні матеріали на основі фторопласту з різноманітними наповнювачами мають суттєво поліпшені фізико-механічні та триботехнічні характеристики [1 - 4].

Цікавим з наукової та практичної точки зору є дослідження одночасного впливу волокнистих та дисперсних наповнювачів, із застосуванням комп'ютерних програм для отримання апроксимуючих рівнянь, на експлуатаційні характеристики композиційних матеріалів на основі фторопласту – 4.

Виклад матеріалів досліджень

В якості наповнювачів композиційних матеріалів прийняті: вуглецеві волокна тканини Урал 22, бентоніт, диоксид титану (TiO_2) та графіт ГК-1 при сумарному їх ваговому вмісті не більше 20 мас.%. Склади досліджених композиційних матеріалів наведено в табл. 1.

Склади досліджених композиційних матеріалів на основі фторопласту - 4

Номер композиту	Вміст компонентів, мас. %				
	фторопласт-4	графіт ГК-1	вуглецеве волокно	бентоніт	диоксид титану
1	94	-	-	-	6
2	84	5	5	3	3
3	80	10	4	3	3
4	100	-	-	-	-

Вуглецеві волокна відносяться до групи високоміцних та легких матеріалів і у складах композитів підвищують механічні характеристики матеріалів, а графіт традиційно застосовується для поліпшення їх триботехнічних характеристик.

Бентоніт – природний глинистий матеріал (гідроалюмосилікат), який має властивість до об'ємного розширення при гідратації. В обмеженому просторі при цьому утворюється щільний гель, що перешкоджає подальшому проникненню вологи.

У вихідному вигляді диоксид титану являє собою білий дрібнодисперсний порошок з основним розміром частинок 5 - 10мкм, що виготовляється із ільменітового концентрату сірчаноокисним методом. Диоксида титану різних модифікацій набули широкого розповсюдження в якості наповнювачів, модифікаторів, пігментів та допоміжних речовин при виробництві скла, кераміки, лаків і фарб, гуми тощо.

Технологія виготовлення дослідних зразків композиційних матеріалів складається з наступних основних етапів:

- сумісне змішування та подрібнення складових композиту при поетапному введенні дисперсних і волокнистих наповнювачів до вихідного порошку фторопласту – 4;
- пресування дослідних зразків;
- спікання розроблених зразків композиційних матеріалів.

Висока ефективність змішування та подрібнення компонентів досягалась у тому випадку, коли спочатку сумісно оброблялись два компоненти – фторопласт – 4 та вуглецеве волокно, яке попередньо нарізувалось із тканини Урал 22 довжиною $3 \div 8$ мм. Після достатнього змішування та подрібнення (довжина вуглецевих волокон складала $0,5 \div 2,5$ мм) у суміш добавляли бентоніт і диоксид титану. На заключній стадії до складу композиту вводився графіт.

Розроблені композити на кожній стадії обробляли на розмелювально-змішувальній лабораторній установці лопатевого типу протягом $2 \div 3$ хвилин до утворення однорідної суміші.

Пресування заготовок дослідних зразків композиційних матеріалів проводили при питомому навантаженні 40 МПа з витримкою під тиском не менше 1 хвилини, після чого спікали в спеціальній печі при температурі 648 ± 2 К з витримкою на режимі спікання 15 хвилин. Охолодження зразків проводили разом з піччю до температури 423 К.

Порівняльну оцінку зносостійкості розроблених композитів проводили на машині тертя МДП-1 за схемою тертя типу « диск - палець » при швидкості ковзання $V = 0,3$ м/с та питомому навантаженні $P = 1$ МПа при терті по сталі 20Х13 з шорсткістю робочої поверхні $Ra = 0,32 \div 0,16$ мкм.

В результаті одержаних експериментальних досліджень представлених на рис. 1 з яких слідує, що багатокомпонентні композиційні матеріали № 2 та № 3 на основі фторопласту – 4 мають достатньо високу зносостійкість.

У подальшому, для композиційних матеріалів № 2 та №3 проводились дослідження залежності коефіцієнта тертя від швидкості ковзання та питомого навантаження з використанням машини тертя МФТ-1. Схема контактування та розміри дослідних зразків відповідають ГОСТ 23.210. Аналіз результатів досліджень (табл. 2) показує загальну закономірність несуттєвого підвищення коефіцієнта тертя при збільшенні швидкості ковзання та зменшення його при зростанні питомого навантаження, що свідчить про високі антифрикційні характеристики матеріалів.

На основі експериментальних даних, які наведено в табл. 2, для композиційного матеріалу № 2 побудовано узагальнені залежності зміни коефіцієнта тертя f від швидкості ковзання V та питомого навантаження P .

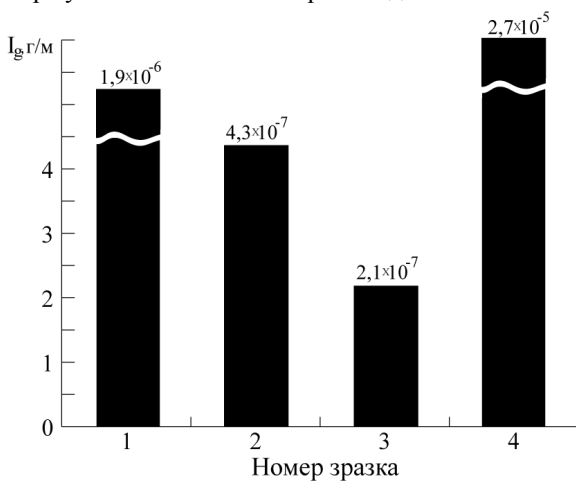


Рис. 1 – Порівняльна зносостійкість розроблених композитів

Залежність коефіцієнта тертя розроблених матеріалів від режимів роботи

Композит	Коефіцієнт тертя						
	швидкість ковзання V_e , м/с	питоме навантаження P_e , МПа					
		0,25	0,5	0,75	1,0	1,25	1,5
№ 2	0,15	0,196	0,19	0,184	0,179	0,174	0,168
	0,3	0,203	0,194	0,191	0,188	0,184	0,176
	0,45	0,212	0,204	0,198	0,192	0,187	0,181
	0,6	0,222	0,210	0,205	0,20	0,196	0,189
	0,75	0,229	0,218	0,211	0,208	0,203	0,198
№ 3	0,15	0,182	0,178	0,174	0,169	0,163	0,158
	0,3	0,189	0,185	0,181	0,177	0,175	0,166
	0,45	0,197	0,192	0,188	0,185	0,18	0,173
	0,6	0,204	0,202	0,195	0,191	0,186	0,181
	0,75	0,211	0,208	0,202	0,196	0,191	0,187

Для отримання аналітичного рівняння, що описує залежність величини коефіцієнта тертя композиційного матеріалу № 2 від швидкості ковзання та питомого навантаження експериментальні дані оброблено за допомогою пакету прикладних програм MathCAD 11 [5]. Програмний блок має наступний вигляд.

Програмний блок

$V_a := \begin{pmatrix} 0.15 \\ 0.3 \\ 0.45 \\ 0.6 \\ 0.75 \end{pmatrix}$	$f_{16} := \begin{pmatrix} 0.196 \\ 0.203 \\ 0.212 \\ 0.221 \\ 0.229 \end{pmatrix}$	$f_{46} := \begin{pmatrix} 0.179 \\ 0.188 \\ 0.192 \\ 0.20 \\ 0.208 \end{pmatrix}$	$f_{56} := \begin{pmatrix} 0.174 \\ 0.184 \\ 0.187 \\ 0.196 \\ 0.203 \end{pmatrix}$
$f_{26} := \begin{pmatrix} 0.19 \\ 0.196 \\ 0.204 \\ 0.210 \\ 0.218 \end{pmatrix}$	$f_{36} := \begin{pmatrix} 0.184 \\ 0.191 \\ 0.198 \\ 0.205 \\ 0.211 \end{pmatrix}$	$f_{66} := \begin{pmatrix} 0.168 \\ 0.176 \\ 0.181 \\ 0.189 \\ 0.199 \end{pmatrix}$	
$s := 1...5$	$f_1 := \text{augment}(f_{16}, f_{26}, f_{36}, f_{46})$	$f_a := \text{augment}(f_1, f_{56}, f_{66})$	
$f_a = \begin{pmatrix} 0.196 & 0.19 & 0.184 & 0.179 & 0.174 & 0.168 \\ 0.203 & 0.196 & 0.191 & 0.188 & 0.184 & 0.176 \\ 0.212 & 0.204 & 0.198 & 0.192 & 0.187 & 0.181 \\ 0.221 & 0.21 & 0.205 & 0.20 & 0.196 & 0.189 \\ 0.229 & 0.218 & 0.211 & 0.208 & 0.203 & 0.199 \end{pmatrix}$	$n1 = 3.4$	$a1 = 0.1$	$b1 = 0.9$
$V_a = 0.15, 0.20 \dots 0.75$		$F1(\delta) := \begin{pmatrix} e^{a1 \cdot \delta} \\ \delta^{b1} \\ 1 \\ \tan(\delta \cdot n1) \end{pmatrix}$	
$K16 := \text{linf it}(V_e, f_{16}, F1)$	$K16 = \begin{pmatrix} 0.177 \\ 0.056 \\ 3.481 \times 10^{-3} \end{pmatrix}$	$d16(V_a) := F1(V_a) \cdot K16$	
$K26 := \text{linf it}(V_e, f_{26}, F1)$	$K26 = \begin{pmatrix} 0.18 \\ 0.031 \\ 6.085 \times 10^{-4} \end{pmatrix}$	$d26(V_a) := F1(V_a) \cdot K26$	

$K36 := \text{linf it}(V_e, f36, F1)$	$K36 = \begin{pmatrix} 0.138 \\ 0.034 \\ 0.038 \end{pmatrix}$	$d36(V_a) := F1(V_a) \cdot K36$
$K46 := \text{linf it}(V_e, f46, F1)$	$K46 = \begin{pmatrix} 0.254 \\ 0.015 \\ -0.081 \end{pmatrix}$	$d46(V_a) := F1(V_a) \cdot K46$
$K56 := \text{linf it}(V_e, f56, F1)$	$K56 = \begin{pmatrix} 0.185 \\ 0.026 \\ -0.018 \end{pmatrix}$	$d56(V_a) := F1(V_a) \cdot K56$
$K66 := \text{linf it}(V_e, f66, F1)$	$K66 = \begin{pmatrix} 0.409 \\ -0.01 \\ -0.246 \end{pmatrix}$	$d66(V_a) := F1(V_a) \cdot K66$
$Mk1 := \begin{pmatrix} K161 & K162 & K163 \\ K261 & K262 & K263 \\ K361 & K362 & K363 \\ K461 & K462 & K463 \\ K561 & K562 & K563 \\ K661 & K662 & K663 \end{pmatrix}$	$Mk1 = \begin{pmatrix} 0.177 & 0.056 & 3.481 \times 10^{-3} \\ 0.18 & 0.031 & 6.085 \times 10^{-4} \\ 0.174 & 0.032 & 9.007 \times 10^{-4} \\ 0.183 & 4.524 \times 10^{-3} & -4.499 \times 10^{-3} \\ 0.179 & 2.975 \times 10^{-3} & -4.876 \times 10^{-3} \\ 0.169 & 0.014 & -3.697 \times 10^{-3} \end{pmatrix}$	
$uu := 1 \dots 6$	$E1_{uu,i} := Mk1_{uu,1} \cdot e^{(a1 \cdot V_{ei})} + Mk1_{uu,2} \cdot (V_{ei})^{b1} +$ $Mk1_{uu,3} \cdot \frac{1}{\tan(V_{ei} \cdot n1)}$	$P_e := \begin{pmatrix} 0.25 \\ 0.5 \\ 0.75 \\ 1 \\ 1.25 \\ 1.5 \end{pmatrix}$

Де величини з індексом «e», а саме: коефіцієнт тертя f_e , швидкість ковзання V_e і питоме навантаження P_e відповідають експериментальним значенням величин, наведеним у табл. 2, а величини з індексом «a» відповідають апроксимуючим значенням: коефіцієнт тертя f_a швидкість ковзання V_a і питоме навантаження P_a .

На основі розробленої програми побудовано тримірну апроксимуючу поверхню, що наведено на рис. 2.

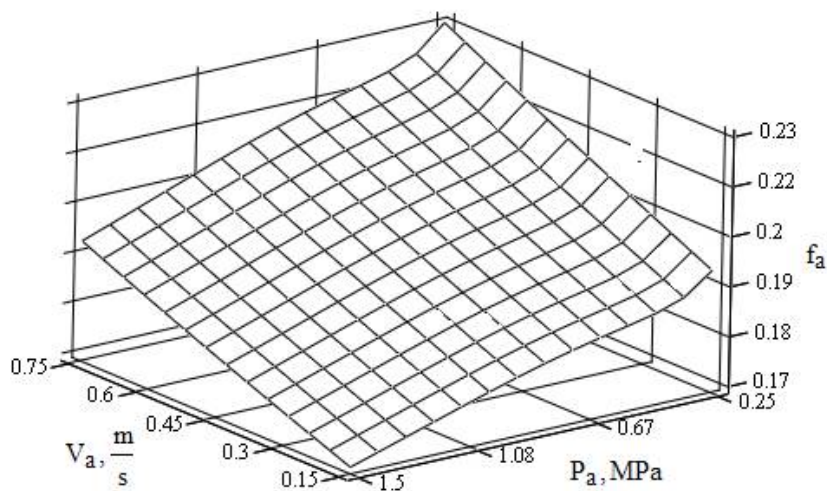


Рис. 2 – Залежність коефіцієнта тертя f_a від швидкості ковзання V_a та питомого навантаження P_a

Для практичного використання результатів проведених досліджень особливий інтерес викликає інформація щодо залежності коефіцієнта тертя матеріалів від температури у трибоспрямленні енергонавантажених вузлів машин і апаратів (табл. 3).

У результаті проведених досліджень встановлено, що при підвищенні об'ємної температури в парі тертя (нагрівання зразків здійснювалось за допомогою електронагрівача, який встановлювався у внутрішній порожнині зразків) триботехнічні характеристики матеріалів у незначній ступені погіршуються. Підвищення значень коефіцієнта тертя та інтенсивності зношування матеріалів при зростанні температури пов'язане із зростанням температури в зонах фактичного контакту та зниженням показників міцності матриці композиту.

Таблиця 3

**Залежність триботехнічних характеристик матеріалів від температури при
 $V = 0,6$ м/с і $P = 0,25$ МПа**

Композит	Температура, К	Інтенсивність зношування $I_g \cdot 10^7$, г/м	Коефіцієнт тертя		
			f_{cp}	f_{max}	f_{min}
№2	323	4,72	0,224	0,243	0,205
	373	9,24	0,227	0,245	0,209
	423	17,41	0,232	0,25	0,214
	473	24,89	0,236	0,256	0,216
№3	323	2,16	0,210	0,227	0,193
	373	5,04	0,215	0,232	0,198
	423	7,05	0,219	0,237	0,201
	473	10,72	0,223	0,241	0,205

Висновки

1. Розроблені теплостійкі багатокомпонентні композити на основі фторопласту –4 триботехнічного призначення з поліпшеними фізико-механічними властивостями та зносостійкістю.
2. Експериментально встановлено залежність триботехнічних характеристик розроблених матеріалів від режимів експлуатації вузлів тертя.
3. Проведена обробка експериментальних даних за допомогою пакету прикладних програм MathCAD 11 і отримано аналітичне рівняння, що описує залежність коефіцієнта тертя від швидкості ковзання та питомого навантаження.
4. Розроблені багатокомпонентні композиційні матеріали рекомендуються у якості антифрикційних матеріалів енергонавантажених вузлів тертя та ущільнень технологічного обладнання хімічних виробництв і суміжних галузей.

Література

1. Исследование свойств и структуры политетрафторэтилена наполненного модифицированными углеродными волокнами «Белум» / А.А. Охлопкова, Т.С. Стручкова, А.П. Васильев [и др.] // Трение и износ. – 2016. – Т. 37, №6. – С. 704 – 711.
2. Износостойкие ПТФЭ нанокомпозиты, содержащие двуокись кремния, для металлополимерных узлов трения / Ю.К. Машков, О.В. Кропотин, О.В. Чемисенко [и др.] // Трение и износ. – 2015. – Т. 36, №6. – С. 621 – 626.
3. Сиренко Г.А. Антифрикционные карбопластики / Сиренко Г.А. – К.: Техніка, 1985. – 194 с.
4. Ситар В.І. Оцінка взаємного впливу компонентів у композиціях на основі фенілону з урахуванням режимів переробки шляхом застосування пакету MathCAD / В.І. Ситар, І.М. Кузяєв, А.В. Лободенко // Вопросы химии и химической технологии. – 2013. – № 2. – С. 41 – 47.
5. Girin, O.B. Dynamic Behavior of Gas Nano-Sized Bubbles in Liquid Phase of the Metal Being Electrodeposited / O.B. Girin, I.M. Kuzyayev // [Journal of Nano- and Electronic Physics](#). – 2016. – Vol.1. – P. 1 – 6.

Поступила в редакцію 24.11.2017

Dudka A.M., Kuzyayev I.M., Nachovny I.I., Burya O.I., Tkachenko E.V., Tolstenko Yu.V. Application of computer programs for reception of approximation equations investigation of tribotechnical properties of composites.

Under considerations questions about development of polymeric compositional materials based on Teflon with fiber (carbon fiber made from Urals fabric) and disperse fillers (bentonite, graphite GK-1, dioxide of the titan). It had been investigated their tribotechnical properties and established basic dependence between it and service conditions of this materials in friction units. It had been investigate wear resistance of this material on friction machine MDP-1 by the friction without oiling with velocity $V = 0,3$ m/s and loadings $P_n = 1$ MPa. It had been established optimal composition of development polymeric compositional materials for friction of chemical equipment. Experimental data had been processed by means of the MathCAD 11 program. It had been obtained analytical equation, which describes dependence of friction coefficient by velocities and loadings in friction units. It had been investigations of the dependence of friction coefficient by temperature in friction units of machine and mechanism.

Keywords: composite materials; teflon; fillers; tribotechnical properties; analytical equation.

References

1. Issledovanie svojstv i struktury politetraforetilena napolnennogo modifitsirovannymi uglerodnymi voloknami «Belum». A.A.Oxlopkova, T.S. Struchkova, A.P. Vasilev [i dr.]. *Trenie i iznos.* 2016. T. 37, №6. P. 704 – 711.
2. Iznosostojkie ptfe nanokompozity, sodержashhie dvoukis kremniya, dlya metallopolimernyx uzlov treniya. Yu.K. Mashkov, O.V. Kropotin, O.V. Chemisenko [i dr.]. *Trenie i iznos.* 2015. T. 36, №6. P. 621 – 626.
3. Sirenko G.A. Antifrikcionnye karboplastiki. Sirenko G.A. K. *Texnika*, 1985. 194 p.
4. Sitar V.I. Ocinka vzaimnogo vplivu komponentiv u kompozitsiyax na osnovi fenilonu z uraxuvannjam rezhimiv pererobki shlyaxom zastosuvannya pakery MathCAD. V.I. Sitar, I.M. Kuzyayev, A.V. Lobodenko. *Voprosy khimii i khimicheskoy tekhnologii.* 2013. № 2. P. 41 – 47.
5. Girin, O.B. Dynamic Behavior of Gas Nano-Sized Bubbles in Liquid Phase of the Metal Being Electrodeposited. O.B. Girin, I.M. Kuzyayev. *Journal of Nano- and Electronic Physics.* 2016. Vol.1. P. 1 – 6.