

**Х. В. Берладір, А. Ф. Будник, К. О. Дядюра**

*Сумський державний університет*

**АНТИФРИКЦІЙНИЙ КОМПОЗИТ НА ОСНОВІ АКТИВОВАНОГО МАТРИЧНОГО  
ПОЛІТЕТРАФТОРЕТИЛЕНУ**

*Досліджено вплив механічної активації матричного політетрафторетилену на зміну структури, фізико-механічних та експлуатаційних властивостей полімерного композиту на його основі.*

*Ключові слова: політетрафторетилен, механічна активація, структура, властивості, зносостійкість.*

**К.В. Берладир, А.Ф. Будник, К.А. Дядюра**

**АНТИФРИКЦИОННЫЙ КОМПОЗИТ НА ОСНОВЕ АКТИВИРОВАННОГО  
МАТРИЧНОГО ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА**

*Исследовано влияние механической активации матричного политетрафторэтилена на изменение структуры, физико-механических и эксплуатационных свойств полимерного композита на его основе.*

*Ключевые слова: политетрафторэтилен, механическая активация, структура, свойства, износостойкость.*

**K.V. Berladir, A.F. Budnik, K.O. Dyadyura**

**ANTIFRICTION COMPOSITE BASED ON THE ACTIVATED MATRIX  
POLYTETRAFLUOROETHYLENE**

*Shown the influence of mechanical activation matrix polytetrafluoroethylene on the structure, physico-mechanical and operating properties of polymer composite based on it.*

*Key words: polytetrafluoroethylene, mechanical activation, structure, properties, wear resistance.*

**Вступ.** Використання композиційних матеріалів на полімерній основі - важливий фактор підвищення ефективності та успішного розвитку провідних галузей техніки. Однак сучасна техніка висуває нові і більш високі вимоги до фізико-механічних властивостей полімерних композиційних матеріалів (ПКМ), у зв'язку з чим актуальним є дослідження впливу різних факторів на структуру і триботехнічні властивості створюваних композитів. Поставлена задача може бути вирішена методами структурної модифікації полімерної матриці ПКМ.

Серед методів модифікування найбільш доступним і простим є метод модифікування за рахунок механохімічних і термомеханічних процесів при підготовці матриці композиту [1].

Загалом, питанню дослідження механізмів впливу механічної активації на структуру і властивості політетрафторетилену (ПТФЕ) та композитів на його основі, присвячено невивраджено мало робіт [1-5].

Тому, дослідження в даному напрямку представляються актуальними і своєчасними.

**Об'єкти і методи досліджень.** Об'єктом досліджень є ПТФЕ торгової марки Ф-4-ПН (ГОСТ 10007) та композити на його основі.

Вивчення надмолекулярної структури активованого порошку ПТФЕ та структури композитів до і після тертя проводили за допомогою скануючого електронного мікроскопа високого дозволу TESCAN MIRA 3 LMU.

Методика дослідження властивостей композиту включала визначення щільності  $\rho$  (кг/м<sup>3</sup>), міцності при розриві  $\sigma_r$  (МПа), відносного подовження  $\delta$  (%) і інтенсивності зношування  $I \cdot 10^{-6}$  (мм<sup>3</sup>/Н·м).

**Зміст та обговорення результатів досліджень.** Попередню механічну активацію ПТФЕ матриці проводили на експериментальному змішувачі, виготовленому на базі млина МРП-2 з частотою обертання робочих органів, яка варіювалася в межах від 5000 до 14000 хв<sup>-1</sup>. Загальний час активації становив 3, 5 і 8 хв. (з позмінним режимом роботи млина через 1 хвилину).

Визначено, що оптимальним за результатом, що досягається, є режим механічної активації матриці ПТФЕ з числом обертів робочих органів подрібнювача  $n = 9000$  хв<sup>-1</sup> протягом 5 хвилин. Структура ПТФЕ залежно від режиму активації представлена на рис. 1.

З аналізу представлених мікрофотографій випливає, що надмолекулярна структура ПТФЕ при механічній активації зазнає істотних змін - з ламелярної неупорядкованої в структуру з вищою впорядкованістю аж до сферолітної. Полімер з такою структурою має більш високу зносостійкість, що підтверджено експериментально (табл. 1).

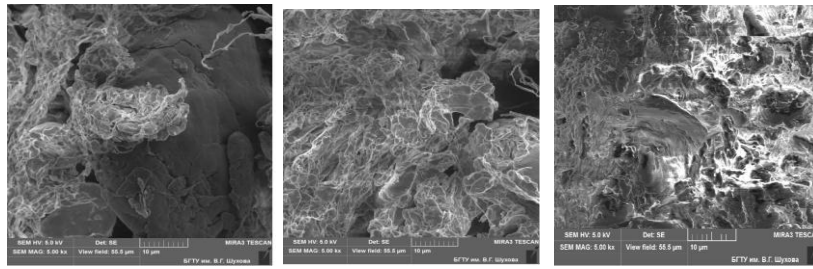


Рис. 1 – Мікроструктура ПТФЕ в залежності від режиму активації:  
а)  $n=5000 \text{ хв}^{-1}$ ; б)  $n=7000 \text{ хв}^{-1}$ ; в)  $n=9000 \text{ хв}^{-1}$ ,  $\tau=5 \text{ хв}$

В ході процесу активації енергія, яка передається змішувальним органом матеріалу при ударній дії, витрачається не тільки на перерозподіл часток в об'ємі полімеру, але і на збільшення питомої поверхні (диспергування матеріалу), а, більшою мірою, на збільшення внутрішньої енергії полімеру-матриці.

Таблиця 1

Вплив технології отримання на механічні та триботехнічні властивості ПТФЕ

№ з/п	Технологія отримання	Щільність $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	Міцність при розриві $\sigma_p$ , МПа	Відносне подовження $\delta$ , %	Інтенсивність зношування I, 10 <sup>-6</sup> мм <sup>3</sup> /Н·м
1	неактивований	2,269	9,5	96	1133
2	$\tau=3 \text{ хв.}, n=5000 \text{ хв}^{-1}$	2,208	10,2	240	1080
3	$\tau=3 \text{ хв.}, n=7000 \text{ хв}^{-1}$	2,199	10,7	270	970
4	$\tau=3 \text{ хв.}, n=9000 \text{ хв}^{-1}$	2,203	19,6	290	890
5	$\tau=3 \text{ хв.}, n=14000 \text{ хв}^{-1}$	2,209	17,0	305	1100
6	$\tau=5 \text{ хв.}, n=5000 \text{ хв}^{-1}$	2,211	21,6	416	930
7	$\tau=5 \text{ хв.}, n=7000 \text{ хв}^{-1}$	2,205	23,5	423	820
8	$\tau=5 \text{ хв.}, n=9000 \text{ хв}^{-1}$	2,214	24,8	415	610
9	$\tau=5 \text{ хв.}, n=14000 \text{ хв}^{-1}$	2,160	16,3	198	690
10	$\tau=8 \text{ хв.}, n=5000 \text{ хв}^{-1}$	2,175	17,3	280	800
11	$\tau=8 \text{ хв.}, n=7000 \text{ хв}^{-1}$	2,211	18,2	358	717
12	$\tau=8 \text{ хв.}, n=9000 \text{ хв}^{-1}$	2,213	18,0	340	720
13	$\tau=8 \text{ хв.}, n=14000 \text{ хв}^{-1}$	2,119	17,9	320	780

При попередній активації проходить механохімічне руйнування макромолекул політетрафторетилену з утворенням радикальних осколків. Наявність, з одного боку, активної поверхні частинки наповнювача, а з іншого - вільного радикала макромолекули ПТФЕ, може ініціювати реакцію щеплення полімеру до наповнювача. Хоча такі реакції з утворенням хімічних зв'язків між полімером і поверхнею наповнювача протікають тільки по активних центрах і носять імовірнісний характер, проте їх внесок у зміцнення композиційного матеріалу дуже суттєвий.

Вплив зовнішніх сил на ненаповнений ПТФЕ призводить до підвищення параметрів його деформаційно-міцнісних характеристик (міцності при розриві в 2,6 рази, відносного подовження при розриві в 4,3 рази) при збереженні високих триботехнічних показників. Це, очевидно,

пов'язано з утворенням нових реакційних центрів і збільшенням поверхневої енергії окремих фрагментів макромолекул в результаті дії пружних і пластичних деформацій.

Найкращі показники має активований ПТФЕ при  $n = 9000 \text{ хв}^{-1}$  протягом 5 хвилин: міцність при розриві  $\sigma_p = 24,8 \text{ МПа}$ , відносне подовження  $\delta = 415\%$ , інтенсивність зношування  $I = 610 \cdot 10^{-6} \text{ мм}^3/\text{Н}\cdot\text{м}$ . У неактивованого ПТФЕ  $\sigma_p = 9,5 \text{ МПа}$ ,  $\delta = 96\%$ ,  $I = 1133 \cdot 10^{-6} \text{ мм}^3/\text{Н}\cdot\text{м}$ .

Підвищення зносостійкості ПТФЕ в ході механоактивації пов'язано із зменшенням ступеня кристалічності і збільшенням середньої міжшарової відстані в процесі фрикційної взаємодії та структурної пристосованості модифікованого ПТФЕ в умовах тертя і прояви синергетичних ефектів самоорганізації трибоструктур, що володіють підвищеною зносостійкістю.

Композити, створені на основі такої активованої матриці та вуглецевих волокон (ВВ) мають значно вищі триботехнічні показники (табл. 2), ніж з неактивованою матрицею.

Таблиця 2

Властивості ПТФЕ композитів в залежності від механічної активації матриці

Композит	Властивості							
	Щільність $\rho$ , г/см <sup>3</sup>		Міцність при розриві $\sigma_b$ , МПа		Відносне подовження $\delta$ , %		Інтенсивність зношування $I$ , $10^{-6} \text{ мм}^3/\text{Н}\cdot\text{м}$	
	неакт.*	акт.**	неакт.	акт.	неакт.	акт.	неакт.	акт.
Ф4ВВ10	2,01	2,02	17,5	17,9	90	98	25-60	21-51
Ф4ВВ15	1,98	1,99	18,3	19,1	105	115	20-50	17-42
Ф4ВВ20	1,96	1,98	20,4	22,1	120	145	19-45	16-38
Ф4ВВ25	1,95	1,96	16,9	18,4	115	125	18-40	15-34

\* неактивованій ПТФЕ;

\*\* активований ПТФЕ.

Мікрофотографії поверхні тертя композитів (рис. 2) підтверджують, що внаслідок зростання адгезійного зв'язку «активована матриця ПТФЕ – наповнювач» процес зношування менш активний, ніж у композита з неактивованою матрицею.

На мікрофотографіях ясно видно, що в разі зношування композиту з неактивним ПТФЕ (рис. 2, а) сліди зношування більш глибокі, спостерігаються борозни знеміцненого матеріалу і т.д., а при зношуванні композиту з активним ПТФЕ цього не спостерігається (рис. 2, б).

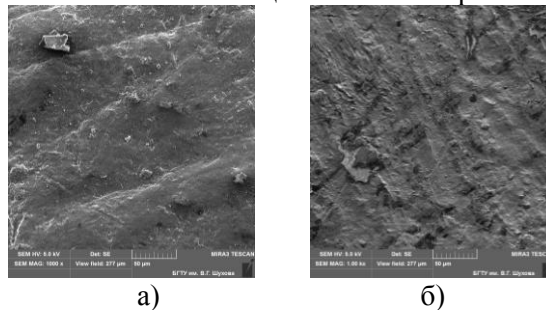


Рис. 2 – Мікрофотографії поверхні тертя ПТФЕ композитів:  
а) – з неактивованою матрицею; б) – з активованою матрицею

Використання такого композиту в якості вузлів тертя компресора 4ГМ 2,5 У-2/3-250 (сальникових ущільнень та поршневих кілець) дало змогу підвищити його працездатність в 2,3 рази.

1. Влияние механической активации политетрафторэтиленовой матрицы на ее физико-химические и эксплуатационные свойства / О.А. Будник, В.А. Сви́дский, К.В. Берладир, А.Ф. Будник, П.В. Руденко // Научно-теоретический журнал «Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова». - 2014. - № 4. - С. 10-17.
2. Будник О.А. Вуглепластики триботехнічного призначення на основі фторопласту-4 та модифікованого вуглецевоволокнистого наповнювача : дис. канд. техн. наук. / О.А. Будник. - Д., 2011. - 160 с.
3. Сіренко Г.О. Створення антифрикційних композитних матеріалів на основі порошків термостійких полімерів та вуглецевих волокон: дис. докт. техн. наук. / Г.О. Сіренко. - Київ, 1997. - 431 с.
4. Машков Ю.К. Структура и износостойкость модифицированного политетрафторэтилена / Ю.К. Машков, Л.Ф. Калистратова, З. Н. Овчар. - Омск: Изд-во ОмГТУ, 1998. - 144 с.
5. Полимерные композиционные материалы триботехнического назначения на основе политетрафторэтилена / А.А. Охлопкова, П.Н. Петрова, С.Н. Попов, С.А. Слепцова // Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва Д.И. Менделеева). - 2008. - № 3. - С. 147-152.

Стаття надійшла до редакції 28.04.2015.