

УДК: 539.216., 543.32/34., 543.38., 669.056.9., 621.894., 539.893

ISSN 1729-4428

О.В. Комашко, М.Б. Складанюк, Г.О. Сіренко

## Особливості хемо-механо-активаційної технології одержання полімерних композитних матеріалів

Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника м. Івано-Франківськ, Україна,  
[oks.pavlykivska@gmail.com](mailto:oks.pavlykivska@gmail.com)

Проведено огляд робіт по дослідженню процесів одержання полімерних композитів за хемо-механо-активаційною технологією (ХМА-технологією). Зроблено аналіз та узагальнення методів дослідження і випробування композиційних матеріалів на основі політетрафторетилену (ПТФЕ) і вуглецевих волокон. Встановлено вплив ХМА- технології на структуру і властивості ПТФЕ-композиту.

**Ключові слова:** полімерний композит, політетрафторетилен, вуглецеві волокна, хемо-механо-активаційна технологія.

Подано до редакції 1.02.2023; прийнято до друку 2.06.2023.

### Вступ

У наш час є потреба у виробництві нових полімерних композиційних матеріалів з підвищеними експлуатаційними властивостями [1]. Одними з найбільш затребуваних у різних галузях промисловості є фторовмісні матеріали [2].

Об'єктом дослідження даної роботи є технологія одержання композитів на основі політетрафторетилену та вуглецевих волокон. Використання ПТФЕ в якості матриці впливає на антифрикційні властивості отриманих композитних матеріалів.

ПТФЕ композити досить широко застосовуються через унікальність характеристик, якими володіє політетрафторетилен. Серед його переваг: висока термічна стабільність, високий коефіцієнт тертя, найбільша хімічна стійкість серед термопластів, можливість застосування при низьких температурах та довговічність [3].

Серед усіх наповнювачів, найбільш ефективними є вуглецеві волокна через унікальні механічні властивості, якими вони володіють та їх легку вагу [4]. Використання вуглецевих волокон значно покращує зносостійкість та підвищує термостійкість композиційного матеріалу.

Переважно для отримання композитів, за уже відомими технологіями, механічно змішують порошок політетрафторетилену з наповнювачами з наступним пресуванням та спіканням. Проте даний метод має низку недоліків через високу в'язкість розтопу ПТФЕ. Тому доцільною була розробка технології почергової інтенсивної хемо-механічної активації зразків ПТФЕ та вуглецевих волокон перед їх змішуванням [5].

Технологічні досягнення показують, що застосування хемо-механо-активаційної технології є перспективною для покращення антифрикційних властивостей [6,7] полімерних композитних матеріалів, оскільки сприяє підвищенню їх міцності, жорсткості, теплопровідності і термостійкості, а це збільшує надійність та довговічність виробів з таких матеріалів.

За ХМА-технологією вуглецеве волокно попередньо обробляли 20 % водним розчином антипіренів, відпалювали при високих температурах (723-2673 К), видаляли поверхневі проміжні сполуки, пресували, витримували при спеціальній температурі, кондиціонували, подрібнювали і змішували з політетрафторетиленом при надвисоких швидкостях (5000-25000 об./хв.) в дробарках, млинках, дисембраторі або дезінтеграторі [8]. На останніх

стадіях заготовки ПТФЕ-композиту пресували і спікали.

Для механічної активації вуглецевих матеріалів використовували дробарку КДУ-2,0 «Українка» (з числом обертів ножа  $n = 1440$  об./хв.), дробарку МРП-1 (з числом обертів ножа  $n = 7000$  об./хв.) та МРП-1М (з числом обертів ножа  $n = 7350$  об./хв.). МРП-1 та МРП-1М застосовували для надтонкого подрібнення складників і змішування суміші композиції [9].

## I. Технологічні параметри підготовки та модифікації матриці

Для досліджень використовували політетрафторетилен (фторопласт-4) з волокнатою, сферичною та лускоподібною формою частинок.

Спочатку заготовки ПТФЕ, отримані пресуванням, формують на холоді, а потім спікають в електропечі за  $365-385$  °С. Це сприяє загартовуванню полімеру і підвищує його міцність в умовах тертя.

Зразки ПТФЕ, отримані пресуванням і прес-литтям, мають такі фізико-механічні властивості за кімнатних температур [10]: густина  $2150-2220$  кг/м<sup>3</sup>, міцність під час розтягу  $14-35$  МПа, міцність під час згину  $14-18$  МПа, міцність під час стиску  $10-12$  МПа, подовження під час розриву  $250-500$  %, модуль пружності під час стиску  $700-800$  МПа, модуль пружності під час згину  $470-850$  МПа, питома ударна в'язкість без надрізу  $> 100$  кД/м<sup>2</sup>, твердість НВ  $30-40$  МПа, теплостійкість за Віка  $373-383$  К, температура крихкості  $< 4$  К, температура склування  $153$  К, температура топлення  $590$  К, температура розкладу  $> 688$  К.

Також політетрафторетилен піддають структурній модифікації [11]. Полімер проходить механічну активацію, ударно-хвильову та електромагнітну обробку, радіаційне опромінення.

Для механічного подрібнення сухого порошку ПТФЕ використовували дробарку МРП-1М з наступними параметрами: завантаженість проби:  $120 \pm 20$  г, виробність –  $0,6$  кг/год, об'єм камери –  $0,4$  м<sup>3</sup>, діаметр ножа –  $0,345$  м, максимальна лінійна швидкість ножа  $V_{max} = 130$  м/с. Число обертів ножа (робочого органа) становили:  $n = 5000$  хв<sup>-1</sup>,  $n = 7000$  хв<sup>-1</sup>,  $n = 9000$  хв<sup>-1</sup>, час дроблення:  $3$  хв.,  $5$  хв.,

$8$  хв. Визначено, що оптимальна частота обертів  $n = 9000$  хв<sup>-1</sup>, а інтервал часу  $\tau = 5$  хв. (табл. 1), при яких є максимальними показники фізико-механічних та триботехнічних властивостей полімеру.

У результаті механічної активації підвищується міцність при розриві в  $2,6$  рази та відносне подовження при розриві в  $4,3$  рази, інтенсивність зношування знижується в  $1,85$  рази порівняно з неактивованим ПТФЕ [12].

## II. Хімічна, термічна та механічна активація наповнювача

Відомо, що введення вуглецевих волокон, як наповнювачів впливає на триботехнічні властивості політетрафторетилену, що досліджено в [13]. Встановлено, що зносостійкість є вищою, ніж у чистого ПТФЕ.

Досліджували карбонізовані вуглецеві волокна, що були отримані з органічної гідратцелюлозної тканини (ГЦ). Дисперсії вуглецевих волокон попередньо обробляли сумішню антипіренів  $Na_2B_4O_7 \cdot 10 H_2O$  та  $(NH_4)_2HPO_4$ , взятих в однакових кількостях. Далі вуглецеве волокно термообробляли в середовищі природного газу  $CH_4$  шляхом протягування через руркову піч «Таммана» та сухого азоту  $N_2$ , поступово підвищуючи температуру від  $723$  К до  $2673$  К і отримували види волокон, які наведені в (табл. 2), де ГЦ – гідратцелюлоза,  $T_k$  – кінцева температура карбонізації чи графітизації, LM – низькомодульне вуглецеве волокно. Класифікація волокон дана за [14].

Таким чином з вихідної гідратцелюлозної тканини за температури  $723$  К в метані ( $CH_4$ ) була отримана частинно карбонізована УТ-4 тканина з такими характеристиками (табл.3). Подальшим відпалюванням тканини УТ-4 за  $1123$  К в атмосфері  $CH_4$  отримували карбонізовану УТМ-8 тканину з такими характеристиками (табл.3). Тканину УТМ-8 термообробляли за  $2673$  К в атмосфері  $N_2$  та отримували графітовану тканину ТГН-2м. Отримана тканина мала такі характеристики (табл.3). Після термообробки карбонова тканина ТГН-2м містила найбільше Карбону ( $99,2$  %), порівняно з УТ-4 та УТМ-8.

Таблиця 1.

Вплив механічної активації на властивості ПТФЕ

Режими механічної активації	Міцність при розриві, $\sigma_{pp}$ , МПа	Відносне подовження при розриві $\delta$ , %	Інтенсивність зношування $I \cdot 10^{-6}$ , мм <sup>3</sup> /Н·м
Неактивований	9,5	96	1133
$\tau = 3$ хв., $n = 5000$ об./хв.	10,2	240	1080
$\tau = 5$ хв., $n = 5000$ об./хв.	21,6	416	930
$\tau = 8$ хв., $n = 5000$ об./хв.	17,3	280	800
$\tau = 3$ хв., $n = 7000$ об./хв.	10,7	270	970
$\tau = 5$ хв., $n = 7000$ об./хв.	23,5	423	820
$\tau = 8$ хв., $n = 7000$ об./хв.	18,2	358	717
$\tau = 3$ хв., $n = 9000$ об./хв.	19,6	290	890
$\tau = 5$ хв., $n = 9000$ об./хв.	24,8	415	610
$\tau = 8$ хв., $n = 9000$ об./хв.	18,0	340	720

Таблиця 2.

Вуглецеві волокна			
Марка	Вихідне органічне волокно	Тип вуглецевого волокна	Тк, К
УТ-4	ГЦ	LM	723
УТМ-8	ГЦ	LM	1123
ТГН-2м	ГЦ	LM	2673
ТМП-3 (Пк: 12% піровуглецю)	ГЦ	LM	2673
ТКК-1(Пк: 0,2-3,0 % SiC)	ГЦ	LM	2673
ТКЦ-1 (Пк: 0,8-4,0 % ZrC)	ГЦ	LM	2673
ТГН-Т850	ГЦ	LM	1123
ТГН-Т1200	ГЦ	LM	1473
ТГН-Т1350	ГЦ	LM	1623
ТГН-Т1600	ГЦ	LM	1873
ТГН-Т2000	ГЦ	LM	2273
ТГН-Т2300	ГЦ	LM	2573
ТГН-Т2400	ГЦ	LM	2673

Таблиця 3.

Характеристики вуглецевих волокон на стадії їх отримання [6]			
Характеристики волокна	УТ-4	УТМ-8	ТГН-2м
Розривне навантаження тканини (за основою), Н/см	100-160	70-240	150-160
Розривне навантаження тканини (за підтканням), Н/см	15-30	20-100	25-35
Вміст Карбону, %	60-70	66-72	99,1-99,3
Вміст Гідрогену, %	-	-	0,2-0,4
Вміст сполук Бору, %	0,2	3,0-3,6	0,4
Вміст сполук Фосфору, %	0,5	3,0-3,6	0,002
Вміст золи, %	1,5	21-26	0,45-0,55
Міцність волокна під час розриву, ГПа	0,2-0,3	0,5-0,6	0,45-0,50
Модуль пружності під час розтягу, ГПа	3-4	30-50	30-50
Відносне подовження під час розриву, %	4,5-6,5	4,5	1,2-1,3
Діаметр волокна, мкм	11-14	10-12	8-9
Коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К)	0,08-0,09	0,08-0,12	0,14-0,16

Після подрібнення в МРП-1 дисперсії вуглецевих волокон УТМ-8 обробляли розчином  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O} + (\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$  в співвідношенні 1:1 і термообробляли послідовно за температур: 1123 К, 1473 К, 1623 К, 1873 К, 2273 К, 2573 К, 2673 К у середовищі сухого азоту і отримували відповідно карбонові волокна ТГН-Т850, ТГН-Т1200, ТГН-Т1350, ТГН-Т1600, ТГН-Т2000, ТГН-Т2300, ТГН-Т2400. Графітовані волокна ТМП-3 отримували з ТГН-2м нанесенням піровуглецевого покриття в середовищі  $\text{N}_2$  при 2673 К [15]. Проте наповнення таким волокном призводить до зниження антифрикційних властивостей композитів.

Для наповнення композиту у матеріал матриці при певному температурному режимі ( $T_k = 723-3073$  К) вводили вуглецево-волокнистий матеріал (ВВМ) у вигляді тканини та волокна [16].

**Механічна активація.** Попередньо ВВМ у вигляді тканини або ленти дробили в дробарці КДУ-2,0 «Українка» (кількість дробових молотків – 90, кількість ножів – 3, число обертів робочих органів  $n=1440$  об./хв., виробність – 200 кг/год.). Отримані фракції волокон становили 3,0-15,0 або 0,5-8,0 мм. [17].

За ХМА-технологією вуглецеві волокна в основному подрібнювали в МРП-1 (діаметр ножа – 0,205 м, максимальна лінійна швидкість ножа

$V_{\max}=78$  м/с, частота обертання ножа  $f = 120 \text{ c}^{-1}$  ( $117 \text{ c}^{-1}$ ), число обертів ножа  $n = 7000$  об./хв.).

Також механічне подрібнення волокна було здійснено в дробарці МРП-1М (завантаженість проби:  $120 \pm 20$  г, виробність – 0,6 кг/год, число обертів ножа  $n = 7350$  об./хв., об'єм камери – 0,4 м<sup>3</sup>, діаметр ножа – 0,345 м, максимальна лінійна швидкість ножа  $V_{\max} = 130$  м/с.). Також МРП-1М було використано як змішувач композиції.

Основою ХМА-технології є високі оберти ножів, котрі дроблять і волокно і композицію, випробування проводили від 2000 до 12000 об./хв.

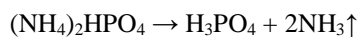
Попередньо подрібнені в МРП-1 або в МРП-1М вуглецеві волокна (до насипної маси 40-160 кг/м<sup>3</sup>) піддавали тонкому подрібненню в кульовому млинку. Для подрібнення дисперсію вуглецевого волокна завантажували у камеру кульового млинка, робоча частина якої мала об'єм 92,66 см<sup>3</sup> зі сталі, діаметр 65,5 мм, висота 27,5 мм. У камеру млинка поміщали 35 кульок із сталі ШХ-15 діаметром 12,7 мм (заповнення робочої частини млинка 48 об.%). Число обертів млинка становило від 20-30 до 125-175 за хвилину. Випробування проводили протягом 5-2050 год. в середовищі вологого повітря.

Також вуглецеві волокна були піддані інтенсивному механічному подрібненню в дисембраторі Д-160 Z фірми «Alpine» (виробність –

20-40 кг/год, діаметр ротора 0,160 м, число штифтів (пальців) на диску ротора – 316). Діапазон числа обертів: 3000 об./хв., 5000 об./хв., 7000 об./хв., 9000 об./хв., 11000 об./хв., 14000 об./хв., 17000 об./хв., 19000 об./хв., 22500 об./хв. Довжина вуглецевого волокна  $l_0 \leq 5$  мм,  $l_t = 40-150$  мкм. [18]. Проте, встановлено, що подрібнення вуглецевого волокна в дисембраторі не є ефективним.

Технологія та кінцева температура термообробки мають вплив на рН. Так, для частково карбонізованих волокон рН знаходиться в межах 4,8-6,4, для карбонізованих 6,4-7,8, для графітованих 7,3-8,3. Також на рН впливає час дроблення волокон. Зі збільшенням часу дроблення рН зменшується.

В процесі термообробки волокон антипірени, що були нанесені на волокна, розкладаються (вище 373 К) за схемою:



При поступовому збільшенні температури  $\text{H}_3\text{PO}_4$  втрачає воду і утворюються полімери складу  $(\text{HPO}_3)_n$ .

Наповнення композитів низькомодульними вуглецевими волокнами збільшує ізотропну шорсткість поверхонь металу контакту на  $\sqrt{m_0}=0,043-0,143$  мкм. [19].

Активация вуглецевих волокон діоксидом цирконію  $\text{ZrO}_2 + 3\% \text{Y}_2\text{O}_3$  при  $700^\circ\text{C}$  суттєво впливає на інтенсивність об'ємного зношування фторопластових карбопластиків [20].

### III. Змішування компонентів і технологія отримання композитних матеріалів

Для процесу змішування порошоків полімерів і волокон застосовували дробарку з швидкообертливими подовими робочими ножами МРП-1 з  $n = 7000$  об./хв. Для цього в одному випадку в полімерну композицію вводили довгі волокна довжиною 0,6-6 мм, що були подрібнені в дробарці КДУ-2,0 «Українка». А в другому випадку волокна після подрібнення в КДУ-2,0 «Українка» додатку 3-30 хв. перед змішуванням полімерних композитів подрібнювали в МРП-1 до довжин 20-500 мкм, а потім змішували з порошком ПТФЕ і дисульфідом молібдену в МРП-1 впродовж 5 хв.

В результаті такої технології змішування відбувається не тільки механічне перемішування. Завдяки додатковому подрібненню компонентів полімерної композиції відбувається трибоактивация частинок суміші [21].

Отриману суспензію піддавали холодному пресуванню під тиском  $P_{пр} = 50,0-70,0$  МПа для отримання заготовок. Наступним процесом було спікання заготовок на повітрі при 638 К. Швидкість нагріву-охолодження становила 40 К/год.

Отриманий матеріал (ГОСТ 12015-66, ГОСТ 12019-66) для випробувань залишали при кімнатній температурі на 15 діб. Після витримки матеріал кондиціонували протягом 24 год.

### IV. Дослідження фізико-механічних властивостей та методи випробування

На фізико-механічні властивості композитного матеріалу на основі політетрафторетилену впливають параметри розподілу вуглецевих волокон [22], технологічні параметри [23], вміст компонентів композиційного матеріалу [24, 25].

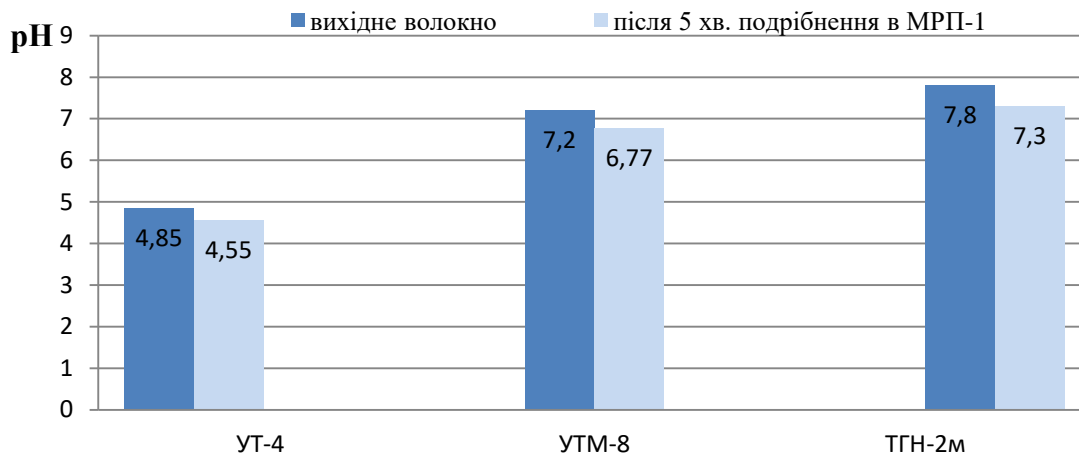
Дослідження впливу технологічних параметрів на показники фізико-механічних властивостей зразків композиту приведено в [26]. Методами математичного планування експерименту виявлено, що на інтенсивність зношування найбільше впливає час змішування композиції. Вміст низькомодульного вуглецевого волокна, час його попереднього подрібнення та час змішування також впливають на коефіцієнт тертя, на міцність при розриві, на ударну в'язкість та на механічні властивості. Вміст твердого мастила суттєво впливає тільки на міцність при розриві.

Виявлено, що тип [27] і форма вуглецевого волокна [28], склад композиції та ступінь попередньої деформації [29] впливає на зносостійкість і коефіцієнт теплопровідності та, відповідно на теплофізичні властивості ПТФЕ-композитів. Орієнтація волокон також має вплив на теплофізичні властивості [30,31].

Концентрація наповнювачів у композиті має значний вплив на інтенсивність зношування. Зі збільшенням вмісту вуглецевого волокна в матриці полімеру спостерігається підвищення зносостійкості, проте досягнувши певної оптимальної концентрації, починає зменшуватися, внаслідок поступового руйнування компонентів [32]. Коли концентрація вуглецевого волокна знаходиться в межах 3-4% відбуваються процеси аморфізації, при вмісті 15% досягається максимальна зносостійкість [33].

Дослідження фізико-механічних властивостей методом УФ-спектроскопії [12] показало підвищену концентрацію груп  $\text{CF}_2$  у складі ПТФЕ після механічної активації. Випробування проводили на спектрофотометрі Specord 75 IR. Збільшення частоти обертів у процесі активації ПТФЕ сприяє збільшенню кінцевих груп  $\text{CF}_2$  у його складі.

рН-метричний аналіз водних витяжок вуглецевих волокон УТ-4 ( $T_k=723$  К), УТМ-8 ( $T_k=1123$  К) і ТГН-2м ( $T_k=2673$  К) приведений в роботі [8]. Проведені дослідження показали, що найбільше на зміну рН впливає час дроблення та тип волокон. рН водних витяжок вихідних вуглецевих волокон мають такі значення (рис.1). Після додаткового подрібнення протягом 5 хв. до насипної густини  $80 \text{ кг/м}^3$  в МРП-1 рН водних витяжок вуглецевих волокон зменшується відносно вихідних волокон на 0,3; 0,43; 0,50 відповідно для УТ-4, УТМ-8, ТГН-2м. Таким чином будь-яка термомеханічна активация вуглецевого волокна приводить до зниження рН водних витяжок волокон.



**Рис.1.** рН водяних витяжок із вихідних карбонових волокон (експозиція 15 хв. за 293 К, модуль ванни 33) та після 5 хв. подрібнення в МРП-1

У роботі [34] знайдено лінійний зв'язок між зносостійкістю та коефіцієнтом тертя карбопластиків на основі ПТФЕ, наповнених короткими, випадково розташованими вуглецевими волокнами, з механічними і теплофізичними властивостями суміжних поверхонь. Дослідження інтенсивності зношування проводилися на установці ХТІ-72 [18]. Аналіз результатів випробувань показує, що зносостійкість не залежить від твердості суміжних поверхонь тертя, проте зазнає значного впливу на енергію пластичного деформування суміжної поверхні контртіла і на енергію деформування при

розтягуванні.

**Термографічний аналіз.** Досліджувались вуглецеві волокна з температурою кінцевої термообробки 1123, 1473, 1623, 1873, 2273, 2573 К, що були попередньо подрібнені у дробарці до насипної густини 0,04 г/см<sup>3</sup>. Відпалювали дані волокна в інтервалі температур 293-953 К. Додатково волокна подрібнювали 200 год. в кульовому млинку і також відпалювали за 293- 953 К. Результати термографічного аналізу наведені в табл.4 і табл.5.

Після відпалювання вихідного волокна температури початку екзоэффекту  $T_{0max}$  (табл.4) і піку

**Таблиця 4.**  
Температура початку екзоэффекту ( $T_{0max}$ ) досліджуваних карбонових волокон ТГН-Т

Кінцева температура термообробки вуглецевого волокна, К	$T_{0max}$			
	Без відпалювання		Після відпалювання	
	Вихідне	Після 200 год. подрібнення	Вихідне	Після 200 год. подрібнення
1123	406	386	520	510
1473	543	390	640	540
1623	582	396	662	545
1873	610	400	680	550
2273	645	405	700	600
2573	675	410	729	610

**Таблиця 5.**  
Температура піку екзоэффекту ( $T_{max}$ ) досліджуваних вуглецевих волокон ТГН-Т

Кінцева температура термообробки вуглецевого волокна, К	$T_{max}$			
	Без відпалювання		Після відпалювання	
	Вихідне	Після 200 год. подрібнення	Вихідне	Після 200 год. подрібнення
1123	620	542	757	713
1473	798	584	795	728
1623	825	605	825	735
1873	870	615	860	742
2273	876	635	878	760
2573	880	650	903	770

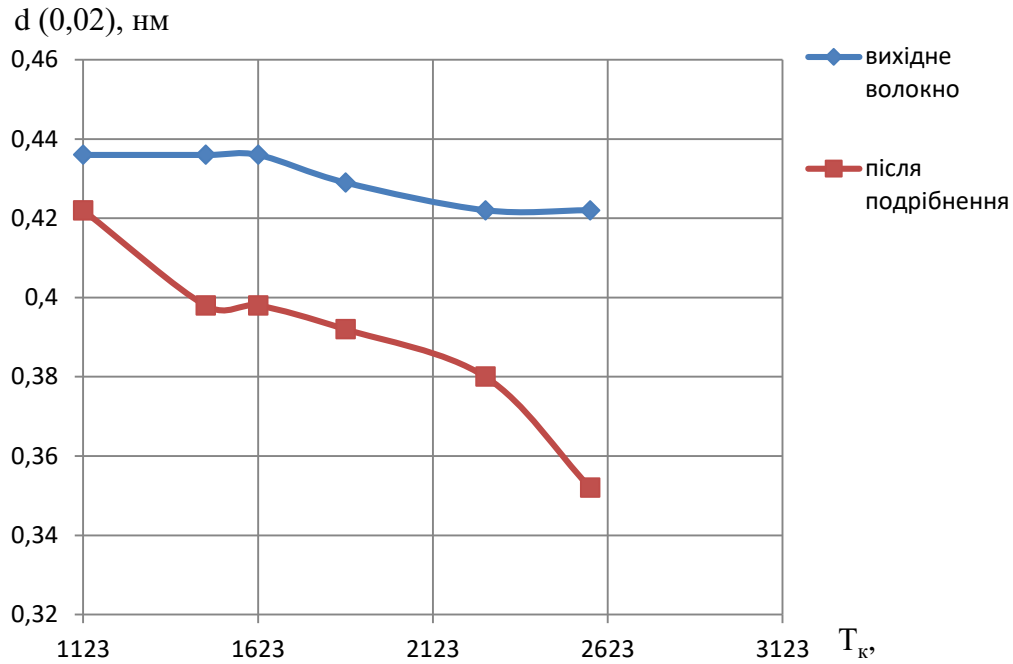


Рис. 2. Залежність міжшарової відстані від кінцевої температури термообробки вихідного волокна ТГН-Т та волокна після 200 год. подрібнення в кульовому млині.

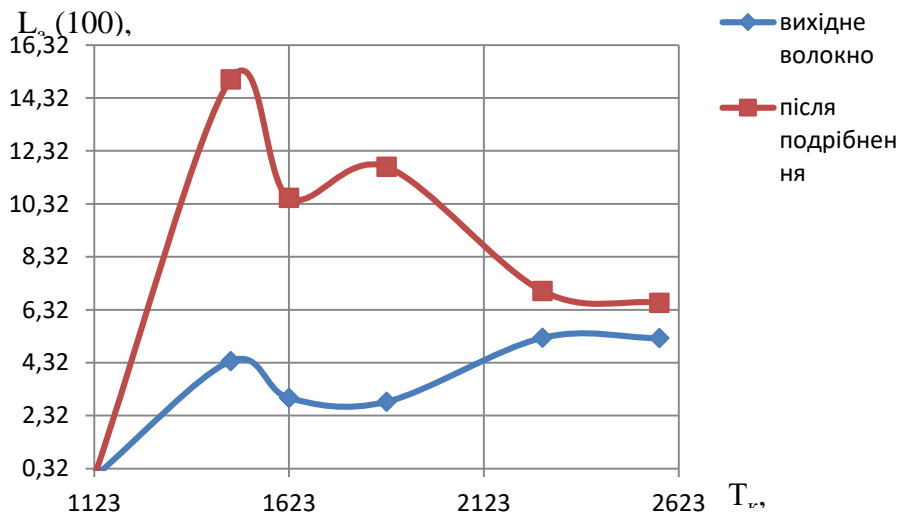


Рис.3. Залежність товщини пакету шарів гексагонів від кінцевої температури термообробки вуглецевих волокон ТГН-Т.

$T_{max}$  (табл.5) зміщуються у високотемпературну ділянку. Після додаткового 200 год. диспергування вихідного вуглецевого волокна ці показники зміщуються у низькотемпературну ділянку, проте після відпалювання подрібнених волокон відбувається зсув цих показників у високотемпературну ділянку. Ймовірно, комплекси, що утворюються на поверхні вуглецевих волокон, в результаті теплового впливу перетворюються у газ.

Механічне подрібнення та кінцева температура термообробки ( $T_k$ ) вуглецевих волокон приводять до удосконалення турбостратної структури. З рис.2. видно, що зі збільшенням температури кінцевої

термообробки вуглецевих волокон ТГН-Т від 1123 до 2673 К міжшарова відстань  $d(002)$  зменшується для вихідного волокна та значно зменшується після 200 год. механічної активації у кульовому млині. Протяжність пакету шарів гексагонів  $L_a(100)$  (рис.3) значно зростає після 200 год. механічного диспергування але зменшується зі збільшенням  $T_k$ . Отже, термомеханічна активація сприяє формуванню впорядкованої двовимірної структури вуглецевих волокон і зумовлює підвищення зносостійкості полімерного композиту.

## Висновки

У роботі узагальнено та проаналізовано результати дослідження впливу ХМА-технології на властивості композитних матеріалів, одержані авторами та багатьма фахівцями у цій галузі.

Комплексне застосування хімічної обробки, механічного подрібнення та активації наповнювачів і матриці позитивно впливають на механічні і триботехнічні властивості полімерного композиту.

Композитні матеріали, отримані за ХМА-технологією мають більш високі показники міцності та зносостійкості, порівняно з матеріалами, отриманими за традиційною технологією.

Виявлено, що хемо-механічна активація підвищує термостійкість композитів на основі політетрафторетилену, а також впливає на його надмолекулярну структуру, змінюючи з невпорядкованої у більш впорядковану.

Встановлено, що механічна активація вуглецевих волокон та полімерної матриці ПТФЕ підвищує на 10-25 % фізико-механічні властивості композиції в цілому, що має подальший вплив на тертя і зношування.

Проведено порівняльний аналіз триботехнічних параметрів, міцнісних характеристик до та після хемо-механічної активації.

Знайдені оптимальні температурні режими експлуатації.

Отже, ХМА-технологія є ефективною і може бути використана для промислового втілення.

**Комашко О.В.** – аспірант кафедри хімії;

**Складанюк М.Б.** – кандидат фізико-математичних наук;

**Сіренко Г.О.** – заслужений діяч науки і техніки України, академік Академії технологічних наук України, професор, доктор технічних наук, професор кафедри хімії.

- [1] Handbook of engineering polymeric materials edited by Nicholas P. Cheremisinoff (Marcel Dekker inc., New York, 1997); <https://doi.org/10.1201/9781482292183>.
- [2] Sina Ebnesajjad, Fluoroplastics. Volume 2: Melt Processible Fluoropolymers - the Definitive User's Guide and Data Book (Elsevier Inc, 2016); <https://doi.org/10.1016/C2012-0-05998-4>
- [3] Sina Ebnesajjad, Introduction to Fluoropolymers. Materials, Technology, and Applications (Elsevier, 2021); <https://doi.org/10.1016/C2018-0-04702-7>
- [4] X. Huang, *Fabrication and Properties of Carbon Fibers*, Materials, 2(4), 2369 (2009); <https://doi.org/10.3390/ma2042369>
- [5] K.O. Dyadyura, P. P. Savchuk, P.V. Rudenko, V. P. Kashyckiy, K.V. Berladir, The method of obtaining a polymer composition based on polytetrafluoroethylene, Patent 110989 Ukraine, MPK C08J 5/00, C08L 27/00, opubl. 25.10.2016, Bul. № 20 (2016).
- [6] H.O. Sirenko, Antifriction carboplastics (Technika, Kiev, 1985).
- [7] E. Dhanumalayan, G.M. Joshi, Performance properties and applications of polytetrafluoroethylene (PTFE)—a review, *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 1, 247(2018); <https://doi.org/10.1007/s42114-018-0023-8>.
- [8] H.O. Sirenko, L.M. Soltys, L.Y. Midak, I.V Kravets, Physico-chemistry of the surface of carbonized and graffitized fibers obtained by chemo-mechanical activation technology: 1. theoretical part and test methods, *Herald of Vasyl Stefanyk Precarpathian National University. Series Chemistry*, (XIV), 149 (2012).
- [9] A.F. Budnyk, H.V. Berladir, P.V. Rudenko, V.A. Sviders'kij, Patent 101976 U Ukraine, MPK C08J5/04, opubl. 12.10.2015, Bul. № 19 (2015).
- [10] L.V. Baziuk, H.O. Sirenko, A.F. Budnyk, S.P. Shapovalov, Seventh International Scientific and Practical Conference "Development of Scientific Research" (InterGraphics, Poltava, 2011) 48.
- [11] O.A Budnyk., K.V. Berladir, A.F. Budnyk, P.V. Rudenko, *Structural changes in the matrix of PTFE-composites*, *Herald of Belarusian State Technical University named after V. H. Shukhov*, (4), 104 (2015).
- [12] H.V. Berladir, T.P. Hovorun, S.G. Rudenko, O.A. Bilous, S.V. Varenik, V.V. Kravets, D.V. Shvetsov, *Mechanically activated polytetrafluoroethylene: morphology and supramolecular structure*, *Journal of Nano- and Electronic Physics*, 14 (1), 01030 (2022); <https://essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/87465>.
- [13] Y. Sujuan, Z. Xingrong. Tribological properties of PTFE and PTFE composites at different temperatures, *Tribology Transactions*, 57(3), 382 (2014).
- [14] H.O. Sirenko, L.M. Soltys, M.B. Skladanyuk, *Properties of carbon fibers (review)*, *Herald of Vasyl Stefanyk Precarpathian National University. Series Chemistry*, (XIX), 63 (2015); [http://lib.pnu.edu.ua/files/Visniki/chemical/chemikal\\_2015\\_19.pdf](http://lib.pnu.edu.ua/files/Visniki/chemical/chemikal_2015_19.pdf)
- [15] A.F. Budnyk, *Method of Producing Carbon Fiber Filler of PTFE-Matrix Composite*, Patent 40960; Ukraine, MPK S08L27/00, 27 April 2009.
- [16] H.O. Sirenko, H.M. Sorokyn, A.F. Budnyk, O.M. Sirenko, Antifriction material: A.s. 1467893 (USSR), MKI B32B3/12; D04C5/00; F16C33/12/, №4261265, Published in 1989. - Bulletin № 11.
- [17] A.F. Budnyk, O. A. Budnyk, , *Technological processes filler preparation and composition in production composite materials based on polytetrafluoroethylene*, *East-European Journal of Advanced Technologies*, ¾ (27), 9 (2007).
- [18] Application of synthetic materials: conference materials, Editor-in-chief R.I. Silin. Kishinev: Cartea Moldoveiasca, P. 199 (1975).

- [19] H.O. Sirenko, L.M. Soltys, V.P. Svidersky, B.O. Talankin, Regularities of Change the Microroughness of Conjugated Surfaces the Polymer Composite – Metal in Mechano-physical-chemical Processes of Friction and Wear, Herald of Vasyl Stefanyk Precarpathian National University. Series Chemistry, (XV), 150 (2012).
- [20] V.P. Sviderskyi, L.M. Kyrychenko, A.I. Mishchysyn, *Increasing the wear resistance and mechanical characteristics of antifriction fluoroplastic carboplastics modified with zirconium oxide nanopowders*, Increase of Machine and Equipment Reliability, 32 (2019); <http://elar.khmnu.edu.ua/jspui/handle/123456789/8629>.
- [21] A.F. Budnyk, H.V. Berladir, O.A. Svidersky, P.V. Budnyk, A.A. Rudenko, *Physicochemical aspects of mechanical activation of polytetrafluoroethylene composition during production and recycling*, Eastern European Journal of Advanced Technologies, 2/11 (68), 9 (2014); <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/23381/21034>
- [22] K.V. Berladir, T.P. Hovorun, V.A. Sviderskiy, P.V. Rudenko, M.E. Vyshehorodtseva, Nanostructural Modification of Polytetrafluoroethylene and its Composition by Energy Influence, Journal of Nano- and Electronic Physics, 8 (1), 01033(5) (2016); [https://doi.org/10.21272/jnep.8\(1\).01033](https://doi.org/10.21272/jnep.8(1).01033)
- [23] O. A. Bilous, T. P. Hovorun, K. V. Berladir, S. I. Vorobiov, V. V. Simkulet, Mathematical modeling of the mechanical characteristic of the activated PTFE-matrix using the method of planning the experiment, Journal of Engineering Sciences, 5(1), C1 (2018), [https://doi.org/10.21272/jes.2018.5\(1\).c1](https://doi.org/10.21272/jes.2018.5(1).c1)
- [24] K. Berladir, D. Zhyhylii, O. Gaponova, J. Krmela, V. Krmelová, A. Artyukhov, Modeling of Polymer Composite Materials Chaotically Reinforced with Spherical and Cylindrical Inclusions, Polymers, 14(10), 2087 (2022); <https://doi.org/10.3390/polym1410208>
- [25] M. A. Markova, P. N. Petrova, Influence of Carbon Fibers and Composite Technologies on the Properties of PCM Based on Polytetrafluoroethylene, Inorganic Materials: Applied Research, 12, 551 (2021); <https://doi.org/10.1134/S2075113321020362>
- [26] O. A. Bilous, T. P. Hovorun, K. V. Berladir., S. I. Vorobiov., V. V. Simkulet, Mathematical Modeling of the Mechanical Characteristic of the Activated PTFE-Matrix Using the Method of Planning the Experiment, Journal of Engineering Sciences, 5 (1), 1 (2018); [https://doi.org/10.21272/jes.2018.5\(1\).c1](https://doi.org/10.21272/jes.2018.5(1).c1)
- [27] P.N. Grakovich, V.A. Shelestova, V.J. Shumskaja, et al. *Influence of the Type of Carbon Fiber Filler on the Physical–Mechanical and Tribological Properties of PTFE Composites*, J. Frict. Wear 40, 11 (2019); <https://doi.org/10.3103/S1068366619010069>
- [28] L.V. Bazyuk, V.P. Svidersky, *Influence of Type and Form of the Fillers on Thermophysical Properties for composite Materials on the base of the Polytetrafluoroethylene and Aromatic Polyamide*, Herald of Vasyl Stefanyk Precarpathian National University. Ser. Chemistry, (V), 47 (2008); <http://elar.khmnu.edu.ua/jspui/handle/123456789/4475>
- [29] H.A.Sirenko, V.P.Sviderskiy, L.Ya.Midak, L.V.Karavanovich, Influence of temperature to a creep of composite materials because of polytetrafluoroethylene for want of by constant to a load, Polymer Journal 27 (3), 167 (2005).
- [30] O.A.Budnik, A.F.Budnik, K.V.Berladir, P.V.Rudenko, V.A.Sviderskiy, Influence of mechanical activation of polytetrafluoroethylene matrix of tribotechnical composites on its structural and phase transformations and properties, Funct. Mater., 22 (4), 499 (2015); <http://dx.doi.org/10.15407/fm22.04.499>
- [31] O.A.Budnik, A.F.Budnik, K.V.Berladir, P.V.Rudenko, V.A.Sviderskiy, Influence of mechanical activation of polytetrafluoroethylene matrix of tribotechnical composites on its structural and phase transformations and properties, Funct. Mater., 22 (4), 499 (2015); <http://dx.doi.org/10.15407/fm22.04.499>
- [32] A.F. Budnyk, V.A. Sviderskyi, A.O. Thomas, P.V. Rudenko, H.V. Berladir, *Design of polymer composite modeled by spheres and ellipsoids by the criterion of coordination of properties*, East-European Journal of Advanced Technologies, 2/5 (62), 20 (2013); <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/12397/10286>
- [33] H.V. Berladir, V.A. Sviderskyi, Physical Modification fluoroplast-4 in order to improve tribotechnical properties of composites based on it, VI International scientific and technical conference of students, graduate students that young scientists "Chemistry and modern technologies", Dnepropetrovsk, 150 (2013).
- [34] H.O. Sirenko, L.M. Soltys, M.F. Semenyuk, *The Specific Square of Gaussian Anisotropic and Isotropic Rough Surfaces*, Herald of Vasyl Stefanyk Precarpathian National University. Ser. Chemistry, (XII), 134 (2011).

O.V. Komashko, H.O. Sirenko, M.B. Skladaniuk

## The features of chemo-mechanical activation technology of polymer composite materials production

Vasyl Stefanyk Precarpathian National University, Ivano-Frankivsk, Ukraine, [oks.pavlykivska@gmail.com](mailto:oks.pavlykivska@gmail.com)

A review of works on the study of the processes of obtaining polymer composites by chemo-mechanical activation technology (CMA-technology) is conducted. The methods of research and testing of composite materials based on polytetrafluoroethylene (PTFE) and carbon fibers are analyzed and generalized. The influence of CMA technology on the structure and properties of PTFE composite was determined.

**Keywords:** polymer composite, polytetrafluoroethylene, carbon fibers, chemo-mechanical activation technology.