

## Розробка органопластиків на основі ароматичного поліаміду, дослідження їх експлуатаційних характеристик та можливості застосування

А.-М. В. Томіна, К. А. Єрьоміна, В. І. Теренін

Великими можливостями для підвищення довговічності вузлів тертя машин і механізмів характеризуються полімерні композиційні матеріали зміцнені органічними волокнами. Дані композити з успіхом конкурують з кольоровими металами та їх сплавами, а в деяких випадках й перевершують полімерні та металеві аналоги за своїми властивостями. У зв'язку з цим досліджено вплив органічного волокна лола на експлуатаційні показники ароматичного поліаміду фенілон марки С-1 та можливість застосування розроблених полімерних композиційних матеріалів.

Експериментальними дослідженнями підтверджено, що армування фенілону органічним волокном лола в кількості 5–15 мас. % призводить до покращення його експлуатаційних характеристик. Це обумовлено впорядкуванням надмолекулярної структури базового полімеру внаслідок введення органічного волокна. Так, на межі поділу «фенілон-наповнювач» чітко спостерігається трансформація глобулярної структури в'язучого у фібрилярну. Це призводить до позитивного ефекту: збільшуються енергія руйнування (у 1,5 рази) та хімічна стійкість (у 1,1–1,36 при витримці у 5 % HCl та 1,27–1,6 у 10 % HCl). При цьому слід зазначити, що розроблені органопластики стійкі при температурі 673 К, в той час як вихідний полімер починає інтенсивно руйнуватися вже при 400 К. Зокрема встановлено, що при подальшому збільшенні масової частки наповнювача дані показники погіршуються, що обумовлено недостатньою адгезією між наповнювачем та в'язучим.

Використання органічного волокна лола (в кількості 5–15 мас. %) дає змогу отримати композити з покращеними експлуатаційними характеристиками: підвищеними термічними та хімічними показниками, високою стійкістю до дії ударних навантажень. Таким чином, є підстави стверджувати про перспективність застосування волокна лола як наповнювача для композитів. Органопластик із оптимальним вмістом волокна (15 мас. %) рекомендовано для виготовлення деталей трибовузлів сучасного обладнання натомість кольоровим металам та їх сплавам завдяки достатньо високим експлуатаційним властивостям.

Ключові слова: фенілон, поліамід, органічне волокно, лола, органопластики, термостійкість, хімічна стійкість, структурування, трибовузли

### 1. Вступ

Трибовузли сучасного обладнання ткацької, сільськогосподарської та автомобільної техніки, що працюють у жорстких умовах, розраховані на тривалий і надійний термін експлуатації [1]. Враховуючи зазначене, до сучасних полімерних композиційних матеріалів (ПКМ) триботехнічного призначення

пред'являють особливі вимоги. Серед них – підвищені зносо-, термо- та хімічна стійкість, високі механічні та теплофізичні характеристики, здатність до утворення стійких поверхонь (плівок перенесення), стійкість до дії агресивних середовищ [2]. Дані критерії можуть бути реалізовані шляхом підбору полімерної матриці та наповнювача для створення ПКМ трибоз'єднань [3].

Звертаючи увагу на той факт, що полімерна матриця – важлива складова, яка гарантує більшість необхідних експлуатаційних характеристик композиту [4], її слід ретельно обирати. З літератури відомо [5], що використання термопластичних в'язучих (поліаміду, політетрафторетилену, поліефіркетону тощо) є найбільш перспективним оскільки надає змогу отримати ПКМ працездатні в екстремальних умовах. Для отримання вузлів тертя здатних працювати у важких умовах і агресивних середовищах з урахуванням собівартості матеріалів доцільно використовувати поліаміди. Вони завдяки високим термічним, трибологічним і механічним властивостям та відносно низькій собівартості викликають до себе великий інтерес серед інших термопластичних в'язучих для створення ПКМ триботехнічного призначення.

Враховуючи зазначене, актуальними є дослідження, спрямовані на розробку та впровадження нових ПКМ на основі поліаміду, здатних працювати під дією високих ударних навантажень, температур та агресивних середовищ (кислот, лугів тощо).

## **2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми**

Відомим методом отримання ПКМ триботехнічного призначення є введення до полімерної матриці антифрикційних шаруватих змащувачів (графіт, дисульфід молібдену, шунгіт тощо). Проте, авторами роботи [6] показано, що використання антифрикційних наповнювачів призводить до значного зменшення міцності й утворення пор в об'ємі полімеру, через що знижуються експлуатаційні характеристики даних ПКМ. Хоча введення графіту і дозволяє значно знизити коефіцієнт тертя, як це показано в роботі [7], ПКМ, наповнені шаруватими змащувачами, непрацездатні у важких умовах та агресивних середовищах.

Автори роботи [8] наголошують, що армування поліамідів довгими вуглецевими волокнами дозволяє отримати надійні конструкційні пластики триботехнічного призначення. Проте, вони розташовують вуглецеві волокна в одному напрямі, що веде до анізотропії властивостей матеріалів, а також не можуть досягти гарної адгезії між компонентами. Все це унеможливорює застосування даних ПКМ у важко навантажених вузлах тертя.

У роботі [9] показано, що орієнтація коротких вуглецевих волокон значним чином впливає на механічні та трибологічні властивості ПКМ на основі поліамідів. При цьому, в залежності від орієнтації волокон, отримують вуглепластики різного цільового призначення. Проте через високу собівартість вуглецевих волокон виготовлення вузлів тертя з вуглепластиків не є рентабельним з економічної точки зору. Такі композити використовують у війсьній та космічній техніці.

Для розробки композитів антифрикційного призначення сьогодні активно застосовують й інші волокнисті наповнювачі, серед яких важливе місце займа-

ють органічні волокна (ОВ) [10, 11]. Доцільність використання різноманітних ОВ, для зміцнення поліамідів підтверджується покращенням триботехнічних та теплофізичних характеристик [12, 13].

Вузли тертя машин та механізмів укомплектовані деталями з органопластиків (ОП) характеризуються високою екологічністю завдяки можливості вторинної переробки та самозмашувальної здатності. Їм властиві надійність (завдяки підвищеним зносостійкості, втомній міцності та демпфуючій здатності) й економічність (не потребують механічної обробки навіть при виготовленні деталей нестандартної форми) [14, 15]. Такі ПКМ цілком здатні конкурувати з відомими серійними матеріалами (бронза, бабіт, чавун тощо). Проте, незважаючи на все різноманіття ОП, їх застосування стримується через недостатню адгезію між полімерною матрицею і наповнювачем та агломерацію ОВ [16], яка веде до анізотропії властивостей та утворення пор.

Усе це дозволяє стверджувати, що дослідження, спрямовані на розробку ОП триботехнічного призначення для важко навантажених вузлів тертя, працездатних у агресивних середовищах, є перспективними. При цьому, недостатня визначеність впливу поліариленового волокна сходової будови лола на експлуатаційні характеристики ароматичного поліаміду обумовлює необхідність проведення подальших досліджень у даному напрямку.

### **3. Мета і завдання дослідження**

Метою роботи є дослідження впливу органічного волокна лола на експлуатаційні показники ароматичного поліаміду фенілон.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

- розглянути вплив наповнювача на термічну та хімічну стійкість ароматичного поліаміду фенілон;
- дослідити вплив органічного волокна лола на структуру та міжкомпонентну взаємодію органопластиків.

### **4. Матеріали та методи дослідження впливу органічного волокна лола на термічну та хімічну стійкість ароматичного поліаміду**

#### **4.1. Досліджувані матеріали, що використовувались в експерименті**

Як полімерну матрицю використовували ароматичний поліамід фенілон марки С-1 (ТУ 6-05-221-101-71) – дисперсний порошок рожевого кольору, що характеризується високою втомною міцністю та здатністю витримувати значні статистичні та динамічні навантаження. Зокрема, стійкий до впливу підвищених температур (працездатний до 523 К), радіації та агресивних середовищ (кислот, розбавлених та концентрованих лугів). Призначається для виготовлення пластмасових виробів методом прямого пресування [17, 18].

Як наповнювач обрали волокно із гетероциклічного поліарилену сходової будови – лола (табл. 1), що характеризується винятковими вогне-, термо- та стійкістю до дії концентрованих кислот і органічних розчинників. Волокно створено у Всеросійському науково-дослідному інституті полімерних волокон (ВНДПВ) (м. Митищі, Росія) на основі мономерів: ангідриду та аміну [19].

Таблиця 1  
Властивості волокна лола

Показники	Величина
Густина, г/см <sup>3</sup>	1,4–1,5
Модуль пружності, ГПа	30–45
Міцність, сН/текс	35–45
Розривне подовження, %	3–6
Збереження міцності – при 573 К; – після нагрівання при 573 К (протягом 100 год)	70–85 80–9
Вологість (н. у.), %	2–3

Приготування ОП на основі фенілону, що містять 5–20 мас. % ОВ (довжиною 3 мм), здійснювали методом сухого змішування в апараті з обертальним електромагнітним полем (0,12 Тл) за допомогою феромагнітних часток. В подальшому, частки вилучали з приготовлених композицій методом магнітної сепарації. Отримані таким чином суміші формували у готові вироби методом компресійного пресування. Перед формуванням поліамід фенілон С-1 та композиції необхідно ретельно висушити. Переробка у вироби невисушених матеріалів погіршує їх показники міцності, що призводить до утворення поверхневих дефектів (раковин, пухирів і ін.). Сушіння заготовок проводили в термошафі SPT-200 протягом 2–3 годин при 473–523 К. Препрег з термошафи відразу ж завантажували до пресформи, нагрітої до 523 К. Після матеріал нагрівали до 598 К і витримували без навантаження 10 хвилин, після чого давали витримку в 10 хвилин при навантаженні 30 МПа і тій же температурі. Далі виріб охолоджували при постійному навантаженні до температури 543 К і проводили розпресування [20].

#### 4. 2. Методика визначення показників властивостей зразків

Диференціальний термічний аналіз (ДТА) фенілону С-1 та ОП на його основі проводили методом термогравіметричного аналізу (ТГА) з використанням дериватографу Q-1500D системи Паулік-Паулік-Ердей фірми МОМ (Угорщина). Температурний інтервал досліджень становив 273–800 К, швидкість підйому температури – 5 К/хв, маса досліджуваного зразка – 200 мг.

Хімічну стійкість (ГОСТ 12020-72) оцінювали за величиною набухання зразків (Ø50, висота 3 мм) в кислоті НСІ при різних температурах. З ГОСТу слідує: зразки «до» та «після» дослідження зважувались в скляному посуді, з закритою кришкою, з точністю до 0,0002 г та визначалися їх лінійні розміри (не менше ніж у 5 точках). Після завершення дослідження зразки промивали водою, витирали неворсистим матеріалом, зважували та заміряли лінійні розміри. Температури підтримували за допомогою системи обігріву, обладнаної спеціальними приладами, які дозволяють встановити необхідну температуру і підтримувати її з точністю до  $\pm 2$  К. Для проведення досліджень використали посуд із щільно зачиненою криш-

кою, тому випарів кислоти не було, але для уникнення небезпечної ситуації використовували спецодяг (протигаз, халат, рукавички) та штучну вентиляцію.

Для аналізу морфології зміни структури полімерної матриці при введенні органічного волокна застосовано растровий універсальний електронний мікроскоп УЕМВ-100К. Аналізували крихкий злам зразків, отриманий під впливом рідкого азоту, попередньо напилів графітову плівку на досліджувану поверхню.

Мікротвердість на межі поділу «в'язуче-волокно» визначали за допомогою мікротвердоміру ПМТ-3М (ГОСТ 9450-76).

Густину зразків визначали адитивним і гідростатичним методом згідно з ГОСТ 15139-69.

Процес руйнування фенілону та розроблених ОП при ударних навантаженнях досліджували за допомогою маятникового копра фірми «ЧЕАСТ» (ГОСТ 4647-80). Копер має систему «Фрактоскоп», яка за допомогою електричних перетворювачів, розташованих на ударному маятнику, дозволяє безпосередньо в процесі удару виміряти зусилля, яке діє на дослідний зразок ( $50 \times 1 \times 5$  мм<sup>3</sup>). Отриманий сигнал реєструється у вигляді діаграми «навантаження-час» на графічному реєстраторі.

## **5. Результати досліджень впливу органічного волокна лола на експлуатаційні показники ароматичного поліаміду фенілон**

### **5.1. Результати досліджень термічної та хімічної стійкості фенілону і органопластиків на його основі**

На рис. 1 приведені залежності втрати маси ( $M$ , %) від температури ( $T$ , К) фенілону С-1 та органопластиків на його основі отримані методом термогравіметричного аналізу. Результати термогравіметричного аналізу (рис. 1, табл. 2) свідчать про високу термостійкість як вихідного фенілону С-1, так і органопластиків на його основі. Контури всіх кривих «втрата маси – температура» аналогічні, тобто розкладання наповненого волокном поліаміду протікає подібно фенілону. В області робочих температур якісних змін у термічній поведінці наповнених систем практично не спостерігається, однак зі зростом температури наповнювачі мають значний вплив.

Аналіз отриманих результатів свідчить, що термостійкість ОП збільшується, проходячи через максимум при вмісті наповнювача 15 мас. %, після чого спостерігається зниження. Цікаво зазначити, що фенілон армований 15 мас. % волокна лола термічно стійкий до температури 673 К. В той же час вихідний полімер при тій самій температурі інтенсивно розкладається.

Таблиця 2

Залежність термостійкості фенілону від вмісту волокна лола

Вміст волокна, мас. %	$T_0$ , К	$T_{10}$ , К	$T_{20}$ , К
0	303	688	743
5	373	691	752
10	412	700	759
15	462	704	762
20	431	695	755

Примітка:  $T_0$ ,  $T_{10}$ ,  $T_{20}$  – температури втрати 0, 10, 20 % маси, відповідно, К

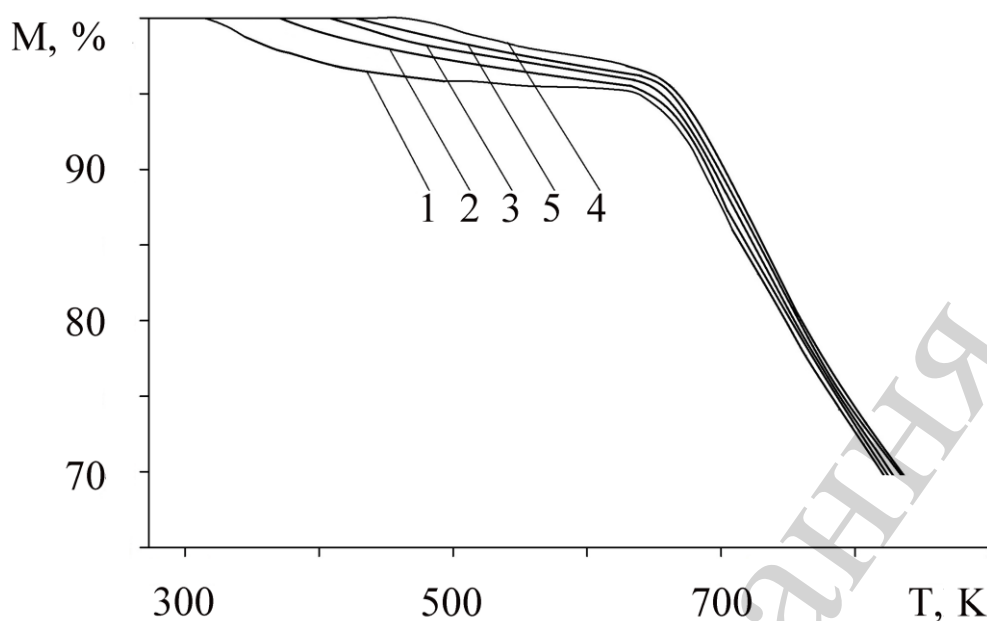


Рис. 1. Залежність втрати маси ( $M$ , %) від температури ( $T$ , К) фенілону С-1 (1) та органопластиків на його основі, що містять: 5(2); 10(3), 15(4), 20(5) мас. % волокна лола

Залежність набухання фенілону в соляній кислоті протягом 10 діб від концентрації кислоти та вмісту волокна лола приведена в табл. 3. З таблиці видно, що зі збільшенням концентрації соляної кислоти величина набухання органоластиків зменшується у 1,1–1,36 (для 5 % HCl) та 1,27–1,6 (для 10 % HCl) разів відповідно у порівнянні з вихідним полімером.

Таблиця 3

Залежність набухання фенілону в соляній кислоті протягом 10 діб від концентрації кислоти та вмісту волокна лола

Соляна кислота, 293 К	Набухання (%) при вмісті волокна, (мас. %)				
	0	5	10	15	20
5 %	0,79	0,73	0,68	0,58	0,59
10 %	0,55	0,43	0,38	0,34	0,41

На рис. 2 приведені результати дослідження температурної залежності набухання фенілону (1) та органопластику на його основі (2) з вмістом волокна 15 мас. % при витримці протягом 48 год.

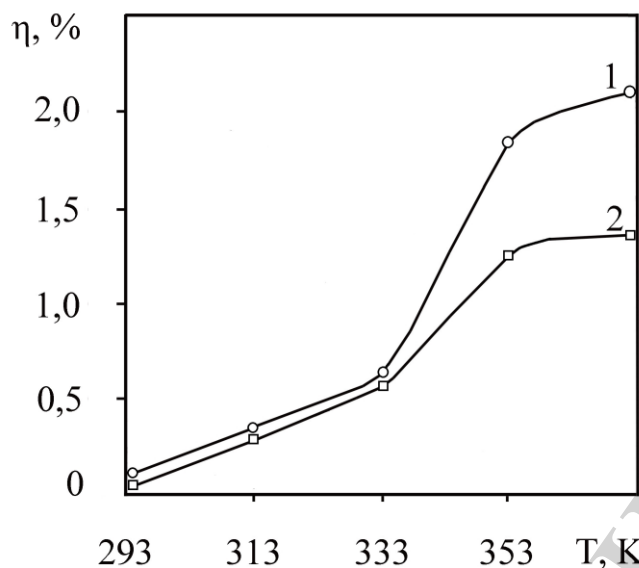


Рис. 3. Температурна залежність набухання фенілону (1) та органопластику на його основі (2) з вмістом волокна 15 мас. % при витримці протягом 48 год

Слід зазначити, що зі збільшенням температури соляної кислоти від 293 до 373 К (рис. 2) набухання ОП із вмістом волокна 15 мас. % значно менше, ніж у в'язучого.

## 5. 2. Дослідження впливу органічного волокна лола на структуру та міжкомпонентну взаємодію органопластиків

Оскільки в попередніх дослідженнях виявлено, що введення ОВ лола в кількості 5–15 мас. % призводить до збільшення щільності структури фенілону, наступним завданням було дослідження структури розроблених органопластиків. На рис. 3, 4 приведені мікроструктури полімеру та органопластику на його основі, відповідно.

На рис. 5, 6 наведені усередненні залежності зусилля та енергії як функції часу. Отримані результати свідчать, що енергія руйнування ОП у 1,5 рази вища, ніж у фенілону.



Рис. 3. Мікроструктура ( $\times 10000$ ) базового полімеру



Рис. 4. Мікроструктура ( $\times 10000$ ) органопластику на основі фенілону з вмістом волокна 15 мас. %

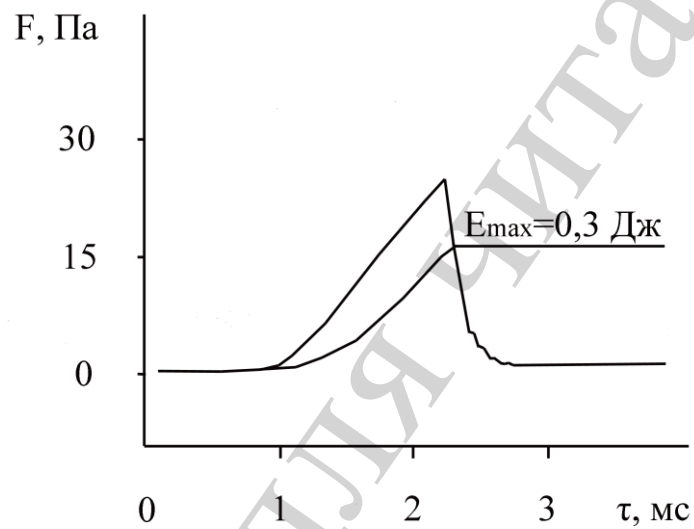


Рис. 5. Усередненні залежності прикладеного до зразка зусилля та поглинутої енергії для фенілону як функції часу

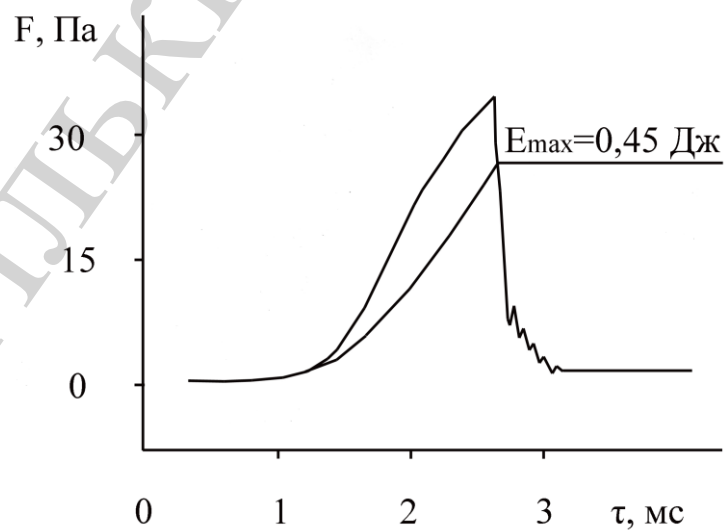


Рис. 6. Усередненні залежності прикладеного до зразка зусилля та поглинутої енергії органопластику з вмістом волокна 15 мас. % як функції часу



В обох випадках спостерігається лінійне зростання напруження, яке розвивається до максимуму і призводить до руйнування зразка. Після спостерігається різке падіння напруження та ділянка, обумовлена коливанням залишених уламків. На рис. 7, 8 наведено залежності густини та мікротвердості на межі поділу від вмісту волокна лола.

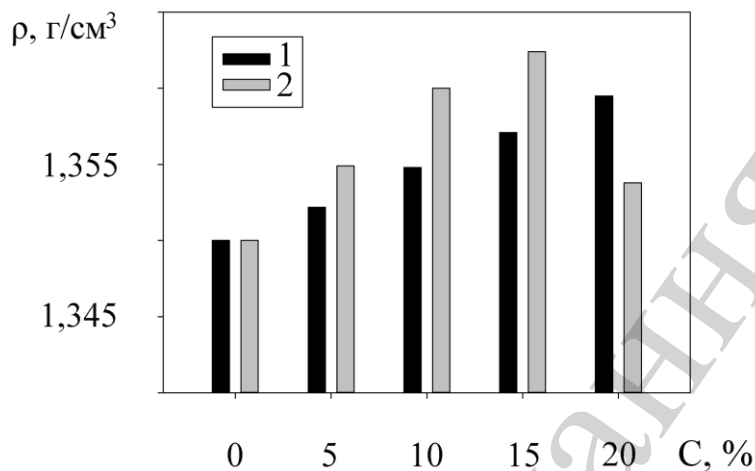


Рис. 7. Залежність розрахункової (1) та експериментальної (2) густини ( $\rho$ , г/см<sup>3</sup>) фенілону від вмісту волокна лола (C, %)

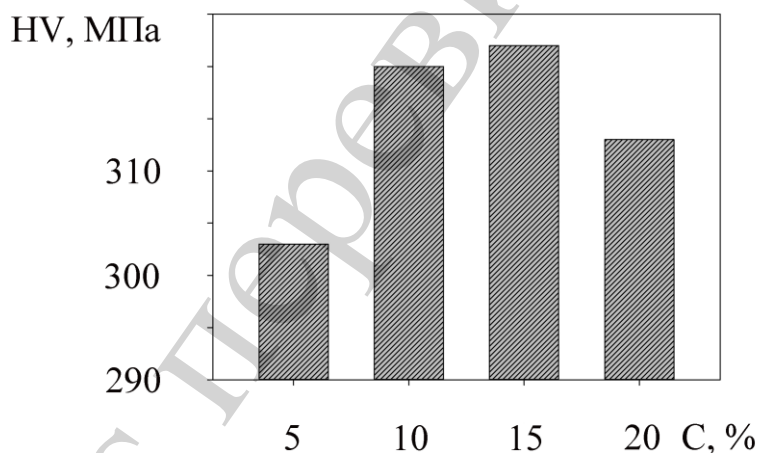


Рис.8. Залежність мікротвердості (HV, МПа) фенілону від вмісту волокна лола (C, %) на межі «в'язуче-волокно»

Отримані залежності прикладеного до зразка зусилля та поглинутої енергії добре узгоджуються з дослідженнями густини та мікротвердості на межі поділу «в'язуче-волокно».

## 6. Обговорення результатів досліджень термічної та хімічної стійкості фенілону і органопластиків на його основі

Збільшення термічної та хімічної стійкості фенілону при введенні органічного волокна лола можна пояснити наступним чином. Поява ОВ у полімерній матриці зменшує рухливість молекулярних ланцюгів полімеру внаслідок вдос-

коналення надмолекулярної структури в'язучого, що призводить до підвищення його термоокисної та хімічної стійкості [21, 22].

Дані висновки підтверджуються результатами рентгеноструктурного аналізу, проведеного у роботі [12]. Введення наповнювача сприяє зменшенню міжплощинної та найкоротшої міжатомної відстаней на 6 % і 7,5 % відповідно, при одночасному збільшенні середнього розміру кристалітів на 15–24 %. Це свідчить про міжкомпоненту взаємодію між в'язучим та наповнювачем.

Погіршення розглянутих характеристик при вмісті наповнювача 20 мас. % обумовлено зростанням дефективності матеріалу (утворенням пор). Пори утворюються внаслідок розпушення структури на межі поділу «полімер-волокно», яке починає превалювати над упорядкуванням макромолекул в'язучого [23]. Про це свідчить залежність розрахункової та експериментальної густини фенілону від вмісту волокна лота (рис. 7), що узгоджується з результатами трибологічних та теплофізичних досліджень [12, 13].

З цієї залежності видно, що при вмісті наповнювача 5–15 мас. % експериментальна густина ОП, визначена гідростатичним методом, вища за розрахункову. З цього слідує, що структура отриманих органопластиків більш щільна за передбачувану. При вмісті наповнювача 20 мас. %, отримана протилежна залежність – експериментальна густина значно менша за розрахункову, отже матеріал містить пустоти.

З іншого боку, дослідження мікротвердості на межі поділу «фенілон-волокно» (рис. 8) показало, що при збільшенні кількості волокна до 20 мас. % спостерігається зменшення контакту макромолекул в'язучого з поверхнею наповнювача [24]. Ці дослідження також підтверджують наявність дефектів (пустот, пор) на межі полімер-волокно при вмісті наповнювача 20 мас. %.

Фенілон має глобулярну структуру (рис. 3). Поверхня відколу рівномірно покрита сферичними утвореннями порядку 30 нм, що узгоджується з літературними даними [4]. Для аморфних полімерів з гнучкими ланцюгами найпростіший тип структур – глобулярний, який складається з однієї або багатьох макромолекул, згорнутих в сферичні частки. Можливість макромолекул згортатися в клубок визначається їхньою високою гнучкістю і переважанням сил внутрішньомолекулярної взаємодії над силами міжмолекулярної. Глобули можна розглядати як тривимірні утворення з макромолекул або їхніх сегментів, але з реалізацією в них ближнього порядку в розташуванні осей ланцюгових молекул.

Електронно-мікроскопічні дослідження органопластиків (рис. 4) свідчать про суттєві зміни характеру відколу фенілону в присутності органічних волокон. Найбільші зміни відбуваються в прикордонному шарі і на межі поділу «в'язуче-наповнювач»: надмолекулярна структура в'язучого впорядковується навколо ОВ утворюючи нові структурні елементи – фібрили.

З літератури [25] відомо, що утворення глобулярних структур в лінійних полімерах супроводжується погіршенням не лише механічних властивостей, а й термічної і хімічної стійкості. Введення наповнювачів дозволяє істотно поліпшити характеристики композитів, оскільки властивості полімерів багато в чому визначаються надмолекулярним структуроутворенням, яке може змінюватись в їхній присутності.

Таким чином, збільшення хімічної та термічної стійкості ОП порівняно з вихідним полімером пов'язане з упорядкуванням надмолекулярної структури в'язучого. Так на межі поділу «фенілон-волокно» чітко спостерігається трансформація глобулярної структури в'язучого (рис. 3) у фібрилярну (рис. 4). А це, як відомо [25], призводить до збільшення термічної і хімічної стійкості ПКМ.

Слід зазначити, що утворена фібрилярна структура збільшує міцність на межі поділу полімер-наповнювач, про це свідчить аналіз усереднених залежностей прикладеного до зразка зусилля та поглинутої енергії фенілону і органопластику. Так, отриманий характер кривої для ОП вказує на слабку здатність до розсіювання енергії. Це обумовлено процесами розклеювання та відділення волокна від в'язучого при руйнуванні. Враховуючи велику міцність композиту ( $F_{\max}=35,2$  МПа з рис. 6, якщо спроектувати на вісь  $x$  пік, отримаємо дану цифру), це свідчить про гарну адгезію між базовим полімером та волокном [26, 27].

Позитивні результати лабораторних досліджень дозволили перейти до виробничих випробувань. Безвідмовна експлуатація ткацьких станків нерозривно пов'язана з працездатністю вузлів тертя (у 90 % випадках), на ремонт яких, в процесі їх несправної роботи, витрачається значний економічний ресурс. Об'єктом досліджень обрано вузли тертя механізму приводу вал'яну ткацького верстату фірми Tongda TD (Китай), що встановлені на НВО «Сінергія» (м. Київ, Україна) (рис. 9).



Рис. 9. Вузол тертя механізму приводу вал'яну ткацького верстату Tongda TD укомплектований підшипником ковзання з органопластику

Об'єкт досліджень обирали виходячи з міркувань, що дані вузли працюють в умовах тертя без змащування та при підвищених вібрації і забрудненні. При цьому серійні вузли приводу вал'яну виготовлені з чавуну працездатні лише протягом 6336 год, що приблизно становить 1 рік. Подальша експлуатація даних вузлів неможлива через катастрофічне зношування.

Експериментальні деталі з органопластику (вміст волокна 15 мас. %), які встановлено на заміну серійним підшипникам кочення, працювали протягом 8640 годин. В ході виробничих випробувань відхилень від норми роботи експериментальних вузлів не виявлено, тому розроблені деталі залишені для подальшої роботи.

## **7. Висновки**

1. З отриманих результатів видно, що введення органічного волокна збільшує хімічну стійкість (у 1,1–1,36 при витримці у 5 % HCl та 1,27–1,6 у 10 % HCl) фенілону. При цьому слід зазначити, що розроблені органопластики стійкі при температурі 673 K, в той час як вихідний полімер починає інтенсивно деформуватися вже при 400 K.

2. Досліджено вплив органічного волокна лопата на структуру та міжкомпонентну взаємодію органопластиків. Встановлено, що зростання хімічної та термічної стійкості пов'язане з упорядкуванням надмолекулярної структури в'язучого та збільшенням міжмолекулярної взаємодії. Експериментальні деталі з органопластику (вміст волокна 15 мас. %), встановлені у вузол тертя механізму приводу вал'яну ткацького верстату Tongda TD, виявилися більш працездатними за серійні. В той час як серійні деталі виходять з ладу через катастрофічне зношування за один рік, розроблені деталі не виявили відхилень від норми, пропрацювавши більше року.

## **Подяка**

Велика вдячність у написанні даної статті виражається науковому керівнику, видатному українському вченому, Заслуженому винахіднику України, Академіку Української технологічної академії Олександрові Івановичу Бурі.

## **Література**

1. Соломенцева, А. В., Фадеева, В. М., Железина, Г. Ф. (2016). Антифрикционные органопластики для тяжело нагруженных узлов трения скольжения авиационных конструкций. Авиационные материалы и технологии, 2, 30–34. doi: <https://doi.org/10.18577/2071-9140-2016-0-2-30-34>
2. Burya, A. I., Yeriomina, Y. A. (2016). The effect of various metallic filling materials on the wear resistance of aromatic-polyamide-based composite materials. Journal of Friction and Wear, 37 (2), 151–154. doi: <https://doi.org/10.3103/s1068366616020033>
3. Кулагина, Г. С., Железина, Г. Ф., Левакова, Н. М. (2019). Антифрикционные органопластики для высоконагруженных узлов трения. Труды ВИАМ, 2, 89–96. doi: <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2019-0-2-89-96>
4. Буря, О. І., Єрьоміна, К. А., Лисенко, О. Б., Кончиць, А. А., Морозов, О. Ф. (2019). Полімерні композити на основі термопластичних в'язучих. Дніпро: Середняк Т.К., 239.
5. Baurova, N. I., Makarov, K. A. (2017). Machining of Machine Elements Made of Polymer Composite Materials. Russian Metallurgy (Metally), 2017 (13), 1141–1144. doi: <https://doi.org/10.1134/s0036029517130043>

6. Scaffaro, R., Maio, A. (2019). Influence of Oxidation Level of Graphene Oxide on the Mechanical Performance and Photo-Oxidation Resistance of a Polyamide 6. *Polymers*, 11 (5), 857. doi: <https://doi.org/10.3390/polym11050857>
7. Matyas, A. (2018). Influence of Graphite Additives on Mechanical, Tribological, Fire Resistance and Electrical Properties in Polyamide 6. *Tehnički Vjesnik*, 25 (4), 1014–1019. doi: <https://doi.org/10.17559/tv-20160702212234>
8. Silva, M. R., Pereira, A. M., Alves, N., Mateus, G., Mateus, A., Malça, C. (2019). Development of an Additive Manufacturing System for the Deposition of Thermoplastics Impregnated with Carbon Fibers. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 3 (2), 35. doi: <https://doi.org/10.3390/jmmp3020035>
9. Wang, Z., Ni, J., Gao, D. (2017). Combined effect of the use of carbon fiber and seawater and the molecular structure on the tribological behavior of polymer materials. *Friction*, 6 (2), 183–194. doi: <https://doi.org/10.1007/s40544-017-0164-8>
10. Gao, X., Yu, W., Zhang, X., Zhang, J., Liu, H., Zhang, X. (2019). Facile Fabrication of PA66/GO/MWNTs-COOH Nanocomposites and Their Fibers. *Fibers*, 7 (8), 69. doi: <https://doi.org/10.3390/fib7080069>
11. Volpe, V., Lanzillo, S., Affinita, G., Villacci, B., Macchiarolo, I., Pantani, R. (2019). Lightweight High-Performance Polymer Composite for Automotive Applications. *Polymers*, 11 (2), 326. doi: <https://doi.org/10.3390/polym11020326>
12. Буря, А. И., Томина, А.-М. В., Волнянко, Е. Н., Теренин, В. И. (2018). Исследование теплофизических свойств органопластиков на основе фенилона, армированного волокном лолы. *Полимерные материалы и технологии*, 4 (4), 72–77. doi: <https://doi.org/10.32864/polymmattech-2018-4-4-72-77>
13. Буря, А. И., Набережная, О. А., Теренин, В. И., Томина, А.-М. В. (2015). Трибологические характеристики органопластиков на основе фенилона. *Проблемы тертя та зношування*, 3, 51–55.
14. Шульдешова, П. М., Железина, Г. Ф. (2014). Влияние атмосферных условий и запыленности среды на свойства конструкционных органопластиков. *Авиационные материалы и технологии*, 1, 64–68.
15. Колесников, И. В., Белый, А. В., Мясникова, Н. А., Мясников, Ф. В., Кравченко, Ю. В., Новиков, Е. С. (2012). Многослойное антифрикционное наноструктурированное покрытие для лубрикации в тяжелонагруженных узлах трения. *Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества*, 2, 34–41.
16. Boccardi, S., Boffa, N. D., Carlomagno, G. M., Del Core, G., Meola, C., Monaco, E. et. al. (2019). Lock-In Thermography and Ultrasonic Testing of Impacted Basalt Fibers Reinforced Thermoplastic Matrix Composites. *Applied Sciences*, 9 (15), 3025. doi: <https://doi.org/10.3390/app9153025>
17. Раскатов, В. М. (1980). *Машиностроительные материалы*. Москва, 512.
18. Катаева, В. М., Попова, В. А., Сажина, Б. И. (Ред.) (1975). *Справочник по пластическим массам*. Т. 2. М.: Химия, 568.
19. Черкасова, Н. Г., Буря, А. И. (2011). *Реактопласты, хаотически армированные химическими волокнами*. Днепропетровск, 234.

20. Буря, О. І., Набережна, О. О., Томіна, А.-М. В., Теренін, В. І. (2015). Пат. № 105957 UA. Термостійка композиція. МПК F16C 19/00. № u201510084; заявл. 15.10.2015; опубл. 11.04.2016, Бюл. № 7.
21. Липатов, Ю. С. (1980). Межфазные явления в полимерах. К.: Наукова Думка, 260.
22. Каргин, В. А. Слонимский, Г. Л., Соголова, Т. И. (1966). Связь надмолекулярной структуры с механическими свойствами полимеров. 22nd Annual Technical Conference: Technical papers SPE. Montreal, 12, 43.
23. Карпинос, Д. М., Олейник, В. И. (1981). Полимеры и композиционные материалы на их основе в технике. К.: Наук. Думка, 180.
24. Шитова, И. Ю., Самошина, Е. Н., Кислицына, С. Н., Болтышев, С. А. (2015). Современные композиционные строительные материалы. Пенза: ПГУАС, 136.
25. Зуев, Ю. С. (1972). Разрушение полимеров под действием агрессивных сред. М.: Химия, 229.
26. Баженов, С. Л. (2014). Механика и технология композиционных материалов. Долгопрудный: Интеллект, 328.
27. Данилова, С. Н., Охлопкова, А. А., Гаврильева, А. А., Охлопкова, Т. А., Борисова, Р. В., Дьяконов, А. А. (2016). Износостойкие полимерные композиционные материалы с улучшенным межфазовым взаимодействием в системе «полимер – волокно». ВЕСТНИК СВФУ, 55 (5), 80–92.