

УДК 621.893:678.073

DOI: 10.15587/1729-4061.2021.243100

Визначення впливу наповнювача на властивості конструкційних термостійких полімерних композиційних матеріалів на основі фенілону С1

О. С. Кабат, Д. О. Макаренко, О. Д. Деркач, Є. С. Муранов

Проведені лабораторні дослідження фізико-механічних та теплофізичних властивостей розроблених композитних матеріалів на основі фенілону С1 наповненого силікагелем. Конструкційні пластики завдяки високій хімічній та зносостійкості, достатньому рівню фізико-механічних та теплофізичних властивостей здатні значно покращити технічні характеристики машин і механізмів. Проте, деякі конструкційні пластики, зокрема й фенілон С1, мають вагомий недолік – вузький інтервал температур їх переробки, що призводить до ускладнення технологічного обладнання та підвищення собівартості одержаної продукції. Встановлено, що вдосконалення технологічного процесу переробки вихідного композитного матеріалу в готові вироби можна досягти шляхом введення наповнювачів.

Встановлено закономірності впливу вмісту силікагелю на рівень теплофізичних та фізико-механічних властивостей полімерно-композитних матеріалів на основі фенілону С1. Виявлено, що введення силікагелю у фенілон С1 призводить до підвищення напруження при межі текучості та модуля пружності при стисканні, у порівнянні з вихідним матеріалом, на 6,3 % і 13,3 % відповідно. Встановлено, що теплостійкість наповненого композиту збільшується на 11,6 % при зменшенні теплового лінійного розширення на 10–20 %, в залежності від вмісту наповнювача.

Виявлено, що із збільшенням концентрації силікагелю у полімерній матриці температура початку активної деструкції зміщується у сторону більших температур. При наповненні 30 мас. % ця температура досягає 375 °С, що збільшує інтервал температур переробки розробленого матеріалу на 25 °С.

Одержані результати дозволяють оптимізувати систему допусків та посадок деталей, виготовлених з полімерно-композитних матеріалів, спростити технологію їх виготовлення, і як результат, зменшити їх собівартість.

Ключові слова: фенілон С1, силікагель, теплостійкість композиту, температура переробки, фізико-механічні властивості, температура деструкції.

1. Вступ

Сучасна промисловість відчуває гостру нестачу у конструкційних матеріалів спеціального призначення, які є більш дешевими та мають вищий рівень властивостей ніж вже існуючі. Впровадження цих матеріалів у вузли машин та механізмів підвищать їх надійність та довговічність, продуктивність, безпеку для навколишнього середовища та ін. У відповідності до принципів, розроблених Європейською комісією по ключовим технологіям (European Commision

Key Enabling Technologies (KETs)) створення таких матеріалів є однією із найбільш пріоритетних та актуальних задач [1].

При використанні у вузлах тертя полімерних виробів останні зазнають дії механічного впливу. Великі значення навантажень унеможливають використання більшості полімерних матеріалів у вузлах тертя внаслідок їх невисокої міцності, податливості. Також є деякі обмеження при використанні пластмас: фізико-механічні властивості пластмас залежать від фізичного і фазового стану в процесі експлуатації. Працездатність полімерних матеріалів залежить від характеру дії зовнішніх сил (наприклад статичне чи динамічне навантаження). Всі ці фактори надають перевагу до використання у багатьох вузлах тертя металів та їх сплавів, фізико-механічні характеристики яких кращі ніж у полімерів [2].

Перспективними конструкційними матеріалами спеціального призначення є полімери та композити на їх основі [3–6]. Завдяки невисокому рівню густини, високій хімічній та зносостійкості, достатньому рівню фізико-механічних та теплофізичних властивостей деталі з них здатні покращити технічні характеристики машин і механізмів та зменшити собівартість продукції. Окрім переваг полімерно-композитні матеріали (ПКМ) мають і деякі недоліки. Серед основних недоліків можна назвати обмежені (вузькі) режими переробки вихідного матеріалу в готові вироби (деталі). Це потребує використання високоточного технологічного обладнання, що не завжди дозволяє отримати низьку собівартість продукції. Саме тому, розробка нових або удосконалення існуючих технологій одержання ПКМ при незначних затратах є актуальним завданням матеріалознавства і машинобудування. Підґрунтям для зменшення собівартості продукції з ПКМ є дослідження властивостей нових матеріалів, що дозволяють оптимізувати режими їх переробки в готові вироби.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Одними із полімерів конструкційного призначення є поліаміди – це синтетичні матеріали, які мають у своєму складі амідну групу (-CONH-) з якою зв'язані вуглецеві ланцюги різної структури та довжини [7]. За устроєм ланцюга макромолекули полімеру поліаміди бувають аліфатичні та ароматичні. Вони відрізняються один від одного, як структурою, так і рівнем властивостей [7].

Аліфатичні поліаміди, у порівнянні з ароматичними, мають гірший рівень фізико-механічних та теплофізичних властивостей. Тому, для їх покращення використовують наповнювачі різної природи та морфології, які вводять у полімерну матрицю [8].

В роботі [9] наведено результати всебічних досліджень фізичних, механічних та термічних властивостей, а також вивченню мембран, поліамідів при введенні в їх структуру різноманітних органічних та неорганічних наповнювачів. Вказано, що при розробці технологій виготовлення ПКМ необхідно особливу увагу приділяти міжфазній взаємодії та силовим полям, що виникають в композиті. При цьому, для реалізації цього необхідно спеціальне вартісне устаткування, що підвищує собівартість одержаного ПКМ. Відомі полімерні композиційні матеріали на основі аліфатичних поліамідів, які наповнені органічними і неорганічними волокнами (вуглецевим, базальтовим, арамідним та ін.), диспер-

сними матеріалами (графіт, технічний вуглець, кремнійвмісні матеріали та ін.). В роботі [10] наведено результати трибологічних досліджень поліаміду наповненого скловолокном. Доведено, що розроблений матеріал рекомендовано для виготовлення шестерень, так як має більшу довговічність при терті без мащення, у порівнянні з металами та сплавами. При цьому вказано, що полімерні шестеренчасті приводи мають низьку вантажопідйомність та обмежені робочі температури. Варіантом подолання вказаних недоліків може бути введення до структури аліфатичних поліамідів наповнювачів – наноматеріалів. Саме такий підхід використано у роботі [11], в якій запропоновано введення наповнювачів у вигляді монтморилоніта обробленого наночастинками полівінілпіролідону. Введення дисперсних наповнювачів дозволяє отримати бажаний ефект, але вартість таких матеріалів, зазвичай, перевищує економічний ефект від їх впровадження. Разом із покращенням рівня властивостей аліфатичних поліамідів, у більшості випадків, збільшується собівартість виготовлення виробів з них. Наприклад, ціна вихідного поліаміду 6 – 4–6 \$ США за 1 кг, а полімеру, наповненого вуглецевим волокном сягає – 20–25 \$ США. При цьому деталі, виготовлені з аліфатичних поліамідів, можуть працювати за незначних температур (до 120–140 °С) та фактору pv – до 5 МПа·м/с, що обмежує сферу їх застосування. Варіантом подолання вказаного недоліку є використання ароматичних поліамідів, що мають високий рівень експлуатаційних властивостей, у порівнянні з аліфатичними. Ароматичний поліамід фенілон С1 по своїх фізико-механічних властивостях близький до металів. Так його межа пружності при стисканні 240 МПа. Але порівняно з металами він має дуже суттєву перевагу. Його питома вага у 6–8 раз менша ніж у металевих матеріалів, тобто деталі з фенілону мають значно меншу вагу ніж з металів. Однак, поряд із високим рівнем властивостей, такі матеріали мають досить високу собівартість до 100 \$ США за 1 кг. Для зменшення собівартості виробів, з ароматичних поліамідів, у їх склад вводять більш дешеві наповнювачі, ніж вихідна полімерна матриця, які здатні покращити рівень фізико-механічних та теплофізичних властивостей розроблених ПКМ. Одним із таких наповнювачів є технічний вуглець, в роботі [12] наведено дослідження властивостей ПКМ на основі фенілону та вказаного наповнювача. Показано, що введення технічного вуглецю в матрицю дозволяє підвищити характеристики ПКМ, у порівнянні з базовим матеріалом. Проте в роботі виконанні дослідження за незначних режимів експлуатації – тиск до 1,5 МПа, швидкість ковзання до 1,25 м/с, що обмежує сферу застосування таких матеріалів. Варіантом подолання відповідних труднощів може бути використання тонко дисперсних наповнювачів. Саме такий підхід використаний у роботі [13], в якій запропоновано використовувати, як наповнювач маловмісні вуглецеві волокна. Показано, що металовмісні вуглецеві волокна, до складу яких входять дисперсні метали, є перспективними наповнювачами для фенілону С1. При цьому, використання частинок металів малих розмірів створює додаткові перепони, щодо рівномірності їх розподілення. Крім того, вартість дисперсних наповнювачів досить висока, що призводить до підвищення собівартості одержаного ПКМ.

Вирішити вказану проблему можливо за рахунок використання недорогих наповнювачів з реакційноспроможною поверхнею, здатної до фізичної та хімічної взаємодії з молекулами полімеру. Саме такий підхід використано у роботі [14], в якій запропоновано використовувати, як наповнювачі, діоксиди кремнію, що мають широке розповсюдження (до 32 % хімічних з'єднань на Землі – кремнійвмісні) та невисоку вартість. Фізична адсорбція можлива за рахунок того, що діоксиди кремнію мають досить розвинену поверхню (до 400 м²/г). При переробці у виробі, коли на полімерну композицію діють високі тиски та температури з поверхні наповнювача видаляються легколетючі компоненти. При цьому, утворюють розрядження в безпосередній близькості до поверхні наповнювача, за рахунок якого молекули ароматичного поліаміду притягуються до неї частково чи повністю заповнюючи нерівності профілю поверхні.

В роботі [15] наведені результати квантово-хімічних розрахункових досліджень ПКМ на основі ароматичного поліаміду фенілон С1, наповненого силікагелем. Встановлено, що хімічна взаємодія молекул вихідного матеріалу з наповнювачем здійснюється переважно за рахунок утворення міцних водневих зв'язків. Вказані зв'язки виникають між атомами кисню карбонільних груп в молекулах полімеру і активними гідроксильними групами на поверхні частинок силікагелю. Хімічна взаємодія можлива за рахунок створення водневих зв'язків між активними силанольними групами на поверхні діоксиду кремнію з молекулами поліаміду.

У роботі [16] підтверджено, що ймовірне створення водневого зв'язку між воднем діоксиду кремнію та киснем амідної групи поліаміду в наслідок того, що таке з'єднання має вищу енергію взаємодії за рахунок меншої відстані між атомами кисню та водню. В роботі [16] обґрунтовано доцільність введення діоксиду кремнію в фенілон С1. Проте, залишилось невирішеним завдання щодо оптимізації вмісту наповнювача в полімерній матриці.

На основі проведеного аналізу є підстави вважати, що дослідження, присвячені розробці ПКМ на основі ароматичного поліаміду, який має високий рівень фізико-механічних та теплофізичних властивостей з невисоким рівнем собівартості готових виробів, є перспективними.

3. Мета та завдання дослідження

Метою дослідження є визначення впливу наповнювача на характеристики та властивості полімерних композитних матеріалів, отриманих застосуванням простої технології їх переробки. Це дасть можливість обґрунтувати доцільність застосування деталей, з розроблених ПКМ, у механізмах та машинах за різних умов експлуатації.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

– дослідити фізико-механічні та теплофізичні властивості експериментальних зразків розроблених ПКМ, на основі ароматичного поліаміду фенілон С1 та силікагелю;

– проаналізувати вплив кремнеземів на стійкість до дії температури фенілону С1 та ПКМ на його основі.

4. Матеріали та методи дослідження

В якості полімерної основи було обрано ароматичний поліамід марки фенілон С1. Цей полімер отримується за реакцією поліконденсації при взаємодії діамінів (75 % μ -фенілендіаміну і 25 % n -фенілендіаміну) з дихлорангідридо-мізофталевої кислоти [17]. Загальна структурна формула полімеру зображена на рис. 1.

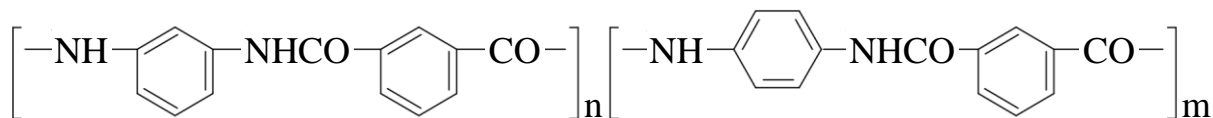


Рис. 1. Структурна формула ароматичного поліаміду марки фенілон С1

Фенілон С1 у вихідному вигляді являє собою прес-матеріал рожево-білого кольору з насипною щільністю 0,2–0,4 г/см³, основним розміром частинок 20–40 мкм, який відповідає вимогам ТУ 6-05-221-101-71.

Рівень фізико-механічних та теплофізичних властивостей виробів з фенілону С1 приведені у табл. 1.

Таблиця 1

Властивості ароматичного поліаміду марки фенілон С1 [18]

Показник властивостей	Значення
Густина ρ , кг/м ³	1330
Міцність, МПа:	
– при розтяганні%	110
– при згині	150
Напруження при межі текучості при стисканні σ_y , МПа	240
Ударна в'язкість a_n , кДж/м ²	40
Твердість НВ, МПа	280
Температура розм'якшення за Вика T_{VC} , °С	275
Температура початку активної деструкції T_d , °С	350

В якості наповнювача було обрано аморфний діоксид кремнію марки силікагель з високим ступенем хімічної чистоти, отриманий у лабораторії полімерних матеріалів та нанокompозитів кафедри інноваційної інженерії ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет». Структурну формулу силікагелю представлено на рис. 2.



Рис. 2. Структурна формула силікагелю

Вибір продуктів та режимів синтезу силікагелю проведено відповідно до попередніх досліджень [17] з метою отримання наповнювача з максимально розвиненою питомою поверхнею (рис. 3)

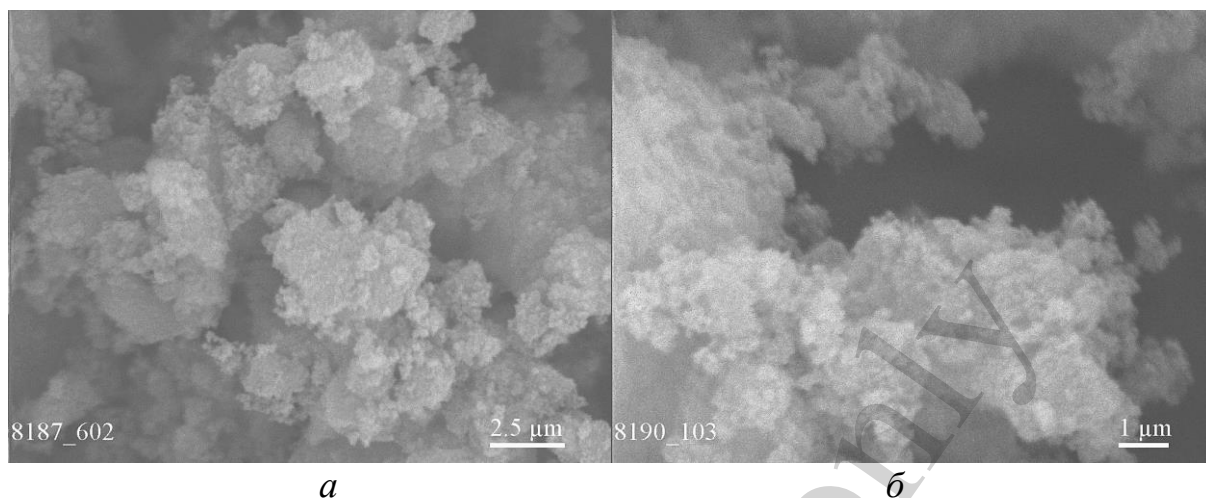


Рис. 3. Мікрометричні знімки частинок наповнювача силікагелю при збільшенні: *a* – $\times 320$; *б* – $\times 550$

Мікрометричні знімки частинок наповнювача отримано за допомогою електронного мікроскопу (Superprobe-733 (Jeol)).

Густина полімерів та ПКМ на їх основі визначено за ISO 1183 за допомогою методу гідростатичного зважування на аналітичних вагах ВЛР-200, з модулем для гідростатичного зважування.

Напруження при межі текучості (σ_y) та модуль пружності (E) при стисканні вихідних полімерів та ПКМ на їх основі визначено за ISO 604 та ГОСТ 9550-81 на універсальній розривній машині 2167 Р-50 згідно з ISO 604.

Температуру розм'якшення за Віка T_{VC} визначено на приладі FWV-633/10 відповідно до ISO 1183-1.

Вимірювання лінійного теплового розширення α матеріалів виконано згідно з ГОСТ 15173-70 на приладі ДКВ-4.

Стійкість до дії температури об'єктів дослідження виміряно за допомогою методу термогравіметричного аналізу, відповідно до ISO-11358, методами сканування за температурою і часом на дериватографі TGA Q50.

5. Результати досліджень властивостей полімерно-композитних матеріалів

5.1. Результати досліджень фізико-механічних та теплофізичних властивостей розроблених композитних матеріалів

З метою встановлення оптимального складу композиції вивчено концентраційні залежності межі пружності при стисненні (σ_y) та модуля (E) пружності (рис. 4).

Відповідно до отриманих результатів встановлено, що введення силікагелю у фенілон С1 призводить до покращення рівня фізико-механічних властивостей в

області концентрацій наповнювача від 0 до 30 мас. %. При подальшому збільшенні концентрації наповнювача від 30 до 40 мас. % спостерігається незначне зменшення характеристик ПКМ. Перевищення вмісту наповнювача більше 40 мас. % призводить до різкого погіршення фізико-механічних властивостей ПКМ.

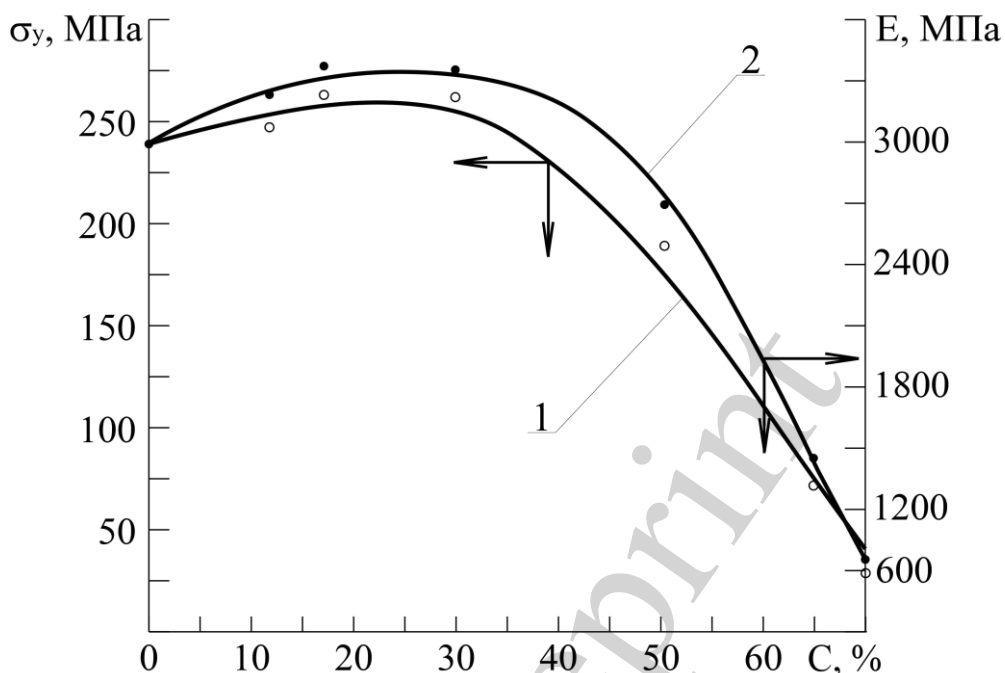


Рис. 4. Залежності фізико-механічних властивостей полімерно-композитного матеріалу на основі фенолону С1 від вмісту мас. % силікагелю: 1 – напруження при межі текучості; 2 – модуль пружності при стисканні

Відповідно до одержаних результатів теплофізичних досліджень (рис. 5) встановлено, що введення силікагелю у фенолон С1 призводить до покращення рівня теплофізичних властивостей в області досліджених концентрацій наповнювача.

Значення теплостійкості розроблених ПКМ сягають 307 °С при 70 мас. % вмісті наповнювача у полімерній матриці. Це дозволяє розширити інтервал температур експлуатації деталей із розроблених ПКМ на 10–12 %, у бік більших значень.

Термічне розширення розроблених ПКМ із підвищенням вмісту наповнювача у полімерній матриці зменшується на 10–20 % в залежності від вмісту наповнювача. Це дозволяє використовувати деталі з розроблених ПКМ у рухомих з'єднаннях у парах із металевими з мінімальною вірогідністю їх заклинювання.

Апроксимуючі криві (рис. 4, 5) отримані у програмному забезпеченні MathCAD (США) за допомогою функції regress. Похибка експериментів не перевищувала 7 %. Величина достовірності апроксимації для напруження при межі текучості, модуля пружності при стисканні, температури розм'якшення за методом Віка та коефіцієнту термічного лінійного розширення становить відповідно: 0,970, 0,979, 0,981, 0,971.

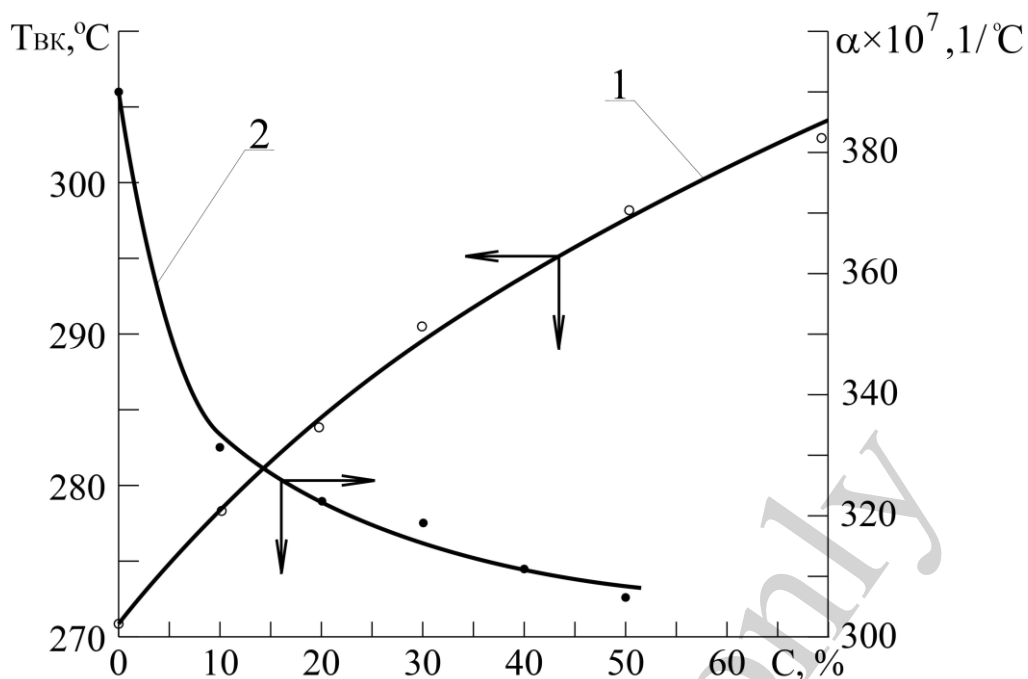


Рис. 5. Залежності теплофізичних властивостей полімерно-композитного матеріалу на основі фенілону С1 від вмісту мас. % силікагелю: 1 – температури розм'якшення за методом Віка; 2 – коефіцієнту термічного лінійного розширення

5. 2. Результати досліджень впливу кремнеземів на стійкість фенілону С1 та композиту на його основі до дії температури

Для підвищення рівня технологічних властивостей вивчено вплив кремнеземів на стійкість до дії температури фенілону С1 та ПКМ на його основі відповідно до результатів термогравіметричних досліджень (табл. 2).

Таблиця 2

Стійкість до дії температури фенілону С1 та ПКМ на його основі

Матеріал	Стійкість до дії температури фенілону С1 та ПКМ на його основі, визначена за втратою їх ваги (%) при нагріванні (°C)				
	0 %	5 %	10 %	20 %	30 %
100 % ФС1	до 350	410	420	429	436
90 % ФС1+10 % SiO ₂	до 362	415	425	434	442
80 % ФС1+20 % SiO ₂	до 370	421	445	463	475
70 % ФС1+30 % SiO ₂	до 375	425	450	467	479

Відповідно до проведених досліджень встановлено, що із збільшенням концентрації силікагелю у полімерній матриці температура початку активної деструкції зміщується у сторону більших температур і при 30 % наповненні ця температура досягає 375 °C. Це призводить до розширення інтервалу температур переробки розроблених ПКМ на 25 °C у порівнянні із ненаповненим фенілоном С1. Збільшення температурного інтервалу переробки ПКМ значно спро-

щує технологію виготовлення деталей із матеріалів на основі фенілону С1 і призводить до зменшення їх собівартості.

6. Обговорення результатів досліджень властивостей полімерно-композитних матеріалів

Незначне зниження характеристик ПКМ (рис. 4) при концентрації наповнювача від 30 до 40 мас. % пов'язано з початком утворенням локальних скупчень наповнювача. Подальше погіршення досліджених характеристик при вмісті силікагелю від 40 до 70 мас. % обумовлено складністю рівномірного розподілення його в полімерній матриці. Слід відмітити, що залежності напруження при межі текучості та модуля пружності при стисканні від вмісту силікагелю у фенілоні С1 (рис. 4) носять екстремальний характер. При цьому максимальний рівень властивостей досягається при 20–30 мас. % вмісті силікагелю у розроблених ПКМ. Збільшення концентрації наповнювача вище 30 мас. % призводить до погіршення його розподілу в матриці, і як результат, до зниження вказаних показників.

Ароматичний поліамід фенілон С1, відноситься до полімерів, які здатні працювати при високому рівні температур (до 300 °С) і при цьому виробити з нього, порівняно із іншими полімерами, не мають великого температурного розширення. Межеві температури експлуатації ароматичного поліаміду фенілону визначаються його теплостійкістю, внаслідок того, що фенілон не розкладається до температури розм'якшення (до 290 °С) [19]. Розширення інтервалу температури переробки розробленого ПКМ (рис. 5, табл. 2) на 11,6 % є наслідком взаємодії наповнювача із полімером. Ця взаємодія призводить до обмеження температурного руху макромолекул фенілону С1 при його взаємодії з поверхнею силікагелю. Внаслідок вказаного обмеження руху макромолекул також відбувається зменшення температурного лінійного розширення, в залежності від вмісту наповнювача, на 10–12 %.

Обмежуючим фактором запропонованого методу одержання ПКМ на основі фенілону С1 та силікагелю є неможливість одержання монолітної структури ПКМ, через нерівномірне розподілення при концентрації наповнювача більше 40 мас. %. Серед недоліків виконаного дослідження можна назвати відсутність проміжних значень вмісту силікагелю (крок становить 10 мас. %). В подальшому необхідно виконати дослідження щодо зміни властивостей ПКМ на основі фенілону С1 та силікагелю з меншим кроком (3...5 мас. %) в діапазоні концентрації останнього до 30–35 мас. %.

Таким чином, можливо рекомендувати ПКМ, на основі фенілону С1 з концентрацією наповнювача – силікагелю до 30 мас. %, для рухомих з'єднань машин і механізмів, що працюють за температури до 300 °С. У перспективі досліджень, в даному напрямку, необхідно звернути увагу на вплив тривалості та способів змішування компонентів ПКМ на якість їх розподілення.

7. Висновки

1. Встановлено, що введення силікагелю 30 мас. % у фенілон С1 призводить до підвищення напруження при межі текучості та модуля пружності при стисканні на 6,3 % і 13,3 % відповідно. Подальше збільшення концентрації на-

повнювача призводить до погіршення вказаних параметрів, що пояснюється його локальними скупченнями у матриці. Збільшення теплостійкості до 307 °С і зменшення теплового лінійного розширення на 10–20 % в залежності від вмісту наповнювача, обумовлено фізичною та хімічною взаємодією молекул фенолу С1 з активною поверхнею силікагелю.

2. Встановлено, що введення кремнеземів в фенолон С1 сприяє підвищенню стійкості отриманого ПКМ. Так, температура початку активної деструкції при 30 % наповненні вихідної матриці досягає 375 °С, що на 25 °С перевищує показники відповідного матеріалу. Розширення температурного інтервалу переробки розробленого ПКМ спрощує технологію виготовлення деталей, і як результат, їх собівартість.

Література

1. Key enabling technologies. URL: https://ec.europa.eu/info/research-and-innovation/research-area/industrial-technologies/industrial-research-strategy-key-enabling-technologies_en
2. Косторнов, А. Г. (2002). *Материаловедение дисперсных и пористых металлов и сплавов*. Киев: Наукова книга, 540.
3. Kholkhoev, B. C., Bardakova, K. N., Minaev, N. V., Kupriyanova, O. S., Gorenskaia, E. N., Zharikova, T. M. et. al. (2019). Robust thermostable polymer composition based on poly[N,N'-(1,3-phenylene)isophthalamide] and 3,3-bis(4-acrylamidophenyl)phthalide for laser 3D printing. *Mendeleev Communications*, 29 (2), 223–225. doi: <https://doi.org/10.1016/j.mencom.2019.03.037>
4. González-Díaz, M. O., Cetina-Mancilla, E., Sulub-Sulub, R., Montes-Luna, A., Olvera, L. I., Zolotukhin, M. G. et. al. (2020). Novel fluorinated aromatic polymers with ether-bond-free aryl backbones for pure and mixed gas separation. *Journal of Membrane Science*, 606, 118114. doi: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2020.118114>
5. Dong, F., Hou, G., Cao, F., Yan, F., Liu, L., Wang, J. (2016). The lubricity and reinforcement of carbon fibers in polyimide at high temperatures. *Tribology International*, 101, 291–300. doi: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2016.04.035>
6. Kobets, A. S., Derkach, O. D., Kabat, O. S., Volovyk, I. A., Kovalenko, V. L., Kotok, V. A., Verbitskiy, V. V. (2020). Investigation friction and wear of constructional plastics based on aromatic polyamide. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 15 (10), 1189–1195.
7. Нелсон, У. Е.; Малкина, А. Я. (Ред.) (1979). *Технология пластмасс на основе полиамидов*. М.: Химия, 256.
8. Курта, С. А. (2012). *Наповнювачі – синтез, властивості та використання*. Івано-Франківськ: Вид-во Прикарпат. нац. ун-ту ім. В. Стефаника, 296.
9. Sanjay, K., Sreedhar, I., Chetan, M. (2021). Molecular dynamics simulation of polyamide-based materials – A review. *Computational Materials Science*, 200, 110853. doi: <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2021.110853>
10. Dhaduti, S. C., Sarganachari, S. G., Patil, A. Y., Khan, A. (2021). Tribological Behaviour of Glass Fiber Reinforced Polyamide Gears. *Vegetable Fiber Composites and Their Technological Applications*, 339–350. doi: https://doi.org/10.1007/978-981-16-1854-3_15

11. Krasinskyi, V., Suberlyak, O., Sikora, J., Zemke, V. (2021). Nanocomposites based on polyamide-6 and montmorillonite intercalated with polyvinylpyrrolidone. *Polymer-Plastics Technology and Materials*, 1–15. doi: <https://doi.org/10.1080/25740881.2021.1924201>
12. Kabat, O., Sytar, V., Sukhyu, K. (2018). Antifrictional Polymer Composites Based on Aromatic Polyamide and Carbon Black. *Chemistry & Chemical Technology*, 12 (3), 326–330. doi: <https://doi.org/10.23939/chcht12.03.326>
13. Burya, A. I., Safonova, A. M., Rula, I. V. (2012). Influence of metal-containing carbon fibers on the properties of carbon-filled plastics based on aromatic polyamide. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 85 (4), 943–949. doi: <https://doi.org/10.1007/s10891-012-0734-6>
14. Айлер, Р. (1982). *Химия кремнезема*. М.: Мир, 1127.
15. Токар, А. В., Кабат, О. С. (2020). Квантово-хімічне дослідження міжмолекулярних взаємодій у комплексних системах «Поліамід-силікагель». *Journal of chemistry and technologies*, 28 (2), 194–201. doi: <https://doi.org/10.15421/082021>
16. Tokar, A., Kabat, O., Chigvintseva, O., Belošević, S. (2021). Intermolecular Interactions in Complex Systems “Polyamide-Silica Gel”: The Quantum-Chemical Interpretation. *Lecture Notes in Networks and Systems*, 875–882. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-75275-0_96
17. Kabat, O. S., Heti, K. V., Kovalenko, I. L., Dudka, A. M. (2019). Fillers on the silica base for polymer composites of constructional purpose. *Journal of chemistry and technologies*, 27 (2), 247–254. doi: <https://doi.org/10.15421/081925>
18. Михайлин, Ю. А. (2006). *Термоустойчивые полимеры и полимерные материалы*. СПб.: Профессия, 624.
19. Shabanian, M., Hajibeygi, M., Roohani, M. (2015). Synthesis of a novel CNT/polyamide composite containing phosphine oxide groups and its flame retardancy and thermal properties. *New Carbon Materials*, 30 (5), 397–403. doi: [https://doi.org/10.1016/s1872-5805\(15\)60199-8](https://doi.org/10.1016/s1872-5805(15)60199-8)