

ВПЛИВ НАПОВНЕННЯ ПОЛІУРЕТАНОВОЇ МАТРИЦІ КАОЛІНОМ НА ДЕМПФЕРНУ ЕФЕКТИВНІСТЬ, МЕХАНІЧНІ ТА ТЕРМІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ

Н. В. Бабкіна, О. І. Антоненко, Л. О. Воронцова,
Л. Ф. Косянчук, Н. В. Козак, О. О. Бровко*

*Інститут хімії високомолекулярних сполук НАН України,
Харківське шосе, 48, Київ 02160, Україна*

**E-mail: nabab1906@gmail.com*

Одним зі способів зниження собівартості полімерного матеріалу є заміщення вагової частини його складу дешевим природним наповнювачем. У цій роботі об'єктами дослідження є синтезовані методом *insitu* поліуретанові композити, що містять мінеральний наповнювач каолін в кількості від 10 до 40 мас.ч. Наповнення каоліном суттєво здешевлює поліуретановий матеріал і його собівартість знижується майже на 30 відсотків за вмістом 40 мас.ч. наповнювача. Морфологічні дослідження показали, що частинки каоліну рівномірно дисперговані в поліуретановій матриці, але спостерігається тенденція до їхньої агломерації за збільшення концентрації наповнювача. Досліджено в'язкопружні, механічні та термічні властивості поліуретанових композитів і за результатами динамічного механічного аналізу (ДМА) оцінено їхню демпферну ефективність. Виявлено, що додавання наповнювача призводить до незначного зменшення температурної області ефективного демпфування поліуретанових композитів, але покращує їхню термостійкість та посилює механічні властивості. Методом термогравіметричного аналізу (ТГА) показано, що присутність каоліну помітно змінює характер термоокиснювальної деструкції композитів. Для наповнених систем зростає температурний інтервал стадії інтенсивного розкладання та зі збільшенням вмісту каоліну зростає температура максимальної швидкості падіння ваги на стадії розкладання (T_{\max}). За результатами механічних досліджень збільшення вмісту каоліну в поліуретанах призводить до зростання модуля пружності (E') та суттєвого зниження відносного подовження (ϵ). Отже, наповнення поліуретану каоліном значно здешевлює вартість полімерних композитів і водночас сприяє розширенню їхніх функціональних властивостей завдяки зростанню термостійкості та покращенню механічних характеристик.

Ключові слова: поліуретанові композити, каолін, демпферна ефективність, механічні властивості, термостійкість.

ВСТУП. Відомо, що поліуретани (ПУ) є універсальними полімерними матеріалами, які знаходять широке застосування як покриття, клеї, герметики, пластмаси, волокна, піни, каучуки, термопластичні еластомери тощо [1–3]. Основою синтезу ПУ є такі компоненти, як поліоли, діізоціанати, подовжувачі ланцюга або твердники [4]. В результаті їхньої взаємодії утворюється специфічна мікрофазова структура, яка складається з «гнучких» і «жорстких» сегментів. Зазвичай гнучку складову утворюють поліоли, а жорстку – діізоціанати. Мікрофазовий поділ цих доменів через несхожість характеристик відповідає за широкий спектр властивостей ПУ. Як наслідок, ПУ можуть бути доступні в різних формах, від гнучких еластомерів до твердих реактопластів, що значно розширює сфери їхнього практичного застосування.

Завдяки особливостям хімічної будови більшість ПУ мають високу здатність поглинати механічну енергію та перетворювати її в тепло при циклічному навантаженні і визнані ефективними демпферними матеріалами [5–8]. Демпферні матеріали використовують для гасіння шкідливих вібрацій, що є актуальним завданням у промисловості, будівництві, літакобудуванні, приладобудуванні. Покращення демпферних властивостей ПУ досягають шляхом модифікації структури [9, 10] або через створення багатошарових конструкцій [11, 12].

Однак основними вимогами до створення сучасних полімерних матеріалів є розширення функціональності та зниження собівартості. Одним із шляхів розширення функціональних можливостей полімерів є формування композиційних матеріалів, властивості яких значною мірою визначає

тип наповнювача, а здешевленню матеріалу може сприяти заміщення частини дорогих компонентів матриці застосуванням більш дешевого мінерального наповнювача. До таких наповнювачів можна віднести, наприклад, каолін, монтморилоніт, гідрослюду. Останнім часом інтерес до полімерних композитів, наповнених природними мінеральними глинами, збільшується через їхнє широке застосування.

Додавання мінеральних наповнювачів до полімерів має економічне обґрунтування і дозволяє розробляти недорогі композити з унікальними властивостями. Як функціональний наповнювач для поліпшення механічних, електричних і термічних властивостей композиту часто використовують мінерал глиняний каолін [13–15]. Цей природний наповнювач зменшує розтріскування та усадження під час затвердіння композиту, сприяє утворенню гладенької поверхні, підвищує ударну міцність та покращує стійкість до хімічних і атмосферних впливів. Каолін використовують у виробництві оздоблювальних матеріалів, клеїв, герметиків, мастик, у пластичних масах та гумах та в галузях, в яких затребувані малий розмір частинок та їхня луската форма, що надає матеріалу з таким наповнювачем еластичності, бар'єрних та зміцнювальних властивостей. Перевагою каоліну є також його висока хімічна інертність.

Покращення механічних властивостей та підвищення термостійкості виявлено при наповненні каоліном гум [16–18], епоксидних, полікарбонатних, поліпропіленових та поліетиленових матриць [19–23]. Задовільні механічні та хімічні властивості автори спостерігали також [24–26] при додаванні

каоліну в поліуретани. Завдяки своїй різноманітності та унікальності ПУ є ефективними матрицями для створення багатфункціональних композиційних матеріалів, а заміщення частини їхніх компонентів природним наповнювачем каоліном може сприяти розширенню функціональних властивостей матеріалу і зниженню його собівартості.

Метою зазначеної роботи є дослідження впливу наповнення ПУ-матриці різною кількістю каоліну на демпферну ефективність, механічні та термічні властивості.

ЕКСПЕРИМЕНТ І ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ. Об'єктами дослідження були отримані методом *insitu* ненаповнені і наповнені різною кількістю каоліну поліуретани (ПУ). Для синтезу використовували такі матеріали: поліоксипропіленгліколь молекулярної маси 1000 (ПОПГ) (Rakita, Польща), який сушили вакуумуванням за температури $T=70-80^{\circ}\text{C}$ та $P=5-6$ мм рт. ст. упродовж 5–6 годин та зберігали в атмосфері сухого азоту; 2,4-толуїлендіізоціанат (ТДІ) (81,4 %; Merck), який використовували без додаткового очищення; триметилпропан (ТМП) (99,9%; Merck), який сушили під вакуумом $P=5-6$ мм рт. ст. за температури $T=48^{\circ}\text{C}$ протягом 60 годин; каолін збагачений марки КН-77 (Турбівський каоліновий завод) – тонкодисперсний кристалічний порошок із питомою поверхнею 15 ± 1 м²/г (основним компонентом є мінерал каолініт, хімічна формула – $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Каолін попередньо сушили в сушильній шафі за температури 100°C протягом 10 годин.

Синтез вихідного ПУ проводили двостадійним способом через стадію форполімеру – макродізоціанату (МДІ), який

одержували з ПОПГ і ТДІ у мольному співвідношенні 1:2. Надалі в МДІ вводили еквімольну кількість зшивача –ТМП, перемішували, вакуумували реакційну суміш для видалення пухирців повітря. Тверднення проводили за температури 60°C упродовж 6–8 годин. Товщина одержаних зразків складала 1,5 мм.

Наповнені ПУ композиції одержували введенням порціями у вихідну поліуретанову суміш наповнювачів із подальшим перемішуванням і вакуумуванням. Плівки одержували аналогічно вихідним ПУ. Кількість наповнювача розраховували в масових частинах на 100 масових частин ПУ, сумуючи вагу його вихідних компонентів (МДІ та ТМП). Вміст каоліну в композиті становив 10, 20 та 40 мас.ч., що, відповідно, складає 9, 17 та 29 мас.%.

Розрахунок собівартості отриманих ПУ (табл. 1) за ринковими цінами складових реагентів свідчить про значне здешевлення матеріалів, що вміщують каолін. Майже на 30 відсотків знижується вартість поліуретанового композиту за вмістом 40 мас.ч. каоліну.

Таблиця 1

Вміст каоліну та собівартість ПУ-продукту

Table 1.

Kaolin content and cost of PU product.

Зразок	Вміст каоліну, мас.ч.	Вартість 1 кг продукту, грн
ПУ	0	9 200
ПУ-10К	10	8 370
ПУ-20К	20	7 640
ПУ-40К	40	6 530

Для оцінки форми і розміру частинок каоліну та для аналізу морфології отриманих ПУ- композитів застосовано метод світлової мікроскопії. Каолін досліджували на оптичному мікроскопі «МБІ-6» у відбитому світлі в світлому та темному полі за збільшення 225 \times , ПУ- композити – на оптичному мікроскопі PERAVAL interphako (Zeiss) у прохідному світлі в світлому полі за збільшення 200 \times . Мікрофотографії отримано за допомогою цифрової камери окуляра MDC-300 і програмного забезпечення ScopePhoto.

В'язкопружні властивості вихідної ПУ- матриці та наповнених каоліном ПУ- композитів досліджували методом динамічного механічного аналізу (ДМА), використовуючи прилад DMAQ800 (TAInstruments, США). Вимірювання проводили в режимі згину за частоти вимушених синусоїдальних коливань 10 Гц у діапазоні температур від -70 до 120 °С зі швидкістю нагрівання 3 град/хв.

Механічні показники, зокрема міцність при розриві (σ , МПа) та відносне подовження при розриві (ϵ , %) визначали згідно з ГОСТ 14236 за допомогою модернізованої

розривної машини 2166 Р-5 за швидкості руху активного затискача 10 мм/хв. Похибка вимірювань не перевищувала 10 %.

Термоокиснювальну деструкцію зразків досліджували методом термогравіметричного аналізу (ТГА) на приладі Q50 (TAInstruments, США) в температурному інтервалі від (20 до 700) °С за швидкості нагрівання 20 °С/хв в атмосфері повітря. Температурні інтервали стадій розкладання оцінювали з диференційних кривих втрати маси (ДТГ), враховуючи той факт, що площа піка кривої ДТГ пропорційна втраті маси на відповідній стадії на кривих падіння ваги (ТГ), а ступінь розділення стадій на кривих ДТГ істотно перевищує можливості інтегральних кривих.

За допомогою оптичної мікроскопії встановлено, що використаний в роботі кристалічний порошок каоліну являє собою частинки у вигляді агломерованих шаруватих пластинок неправильної форми розмірами від 1 до ~120 мкм (рис. 1а). Для більш чіткої візуалізації при визначенні форми і розмірів частинок каоліну було застосовано метод темного поля у відбитому світлі (рис. 1б).

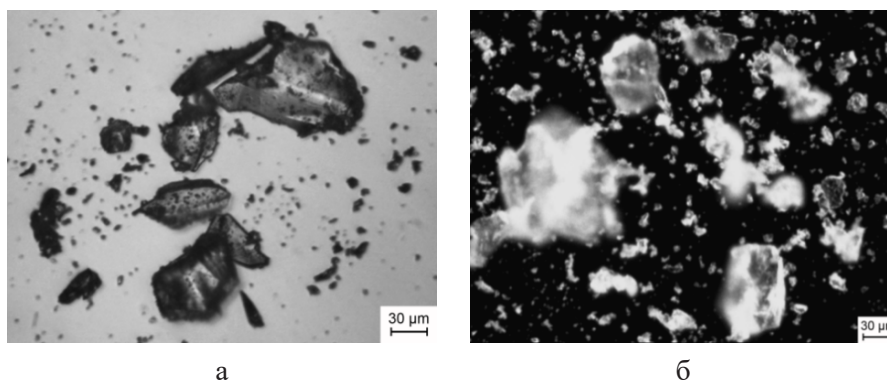


Рис. 1 – Мікрображення каоліну в світлому (а) та темному (б) полях
Fig. 1 – Images of kaolin in light (a) and dark (b) fields.

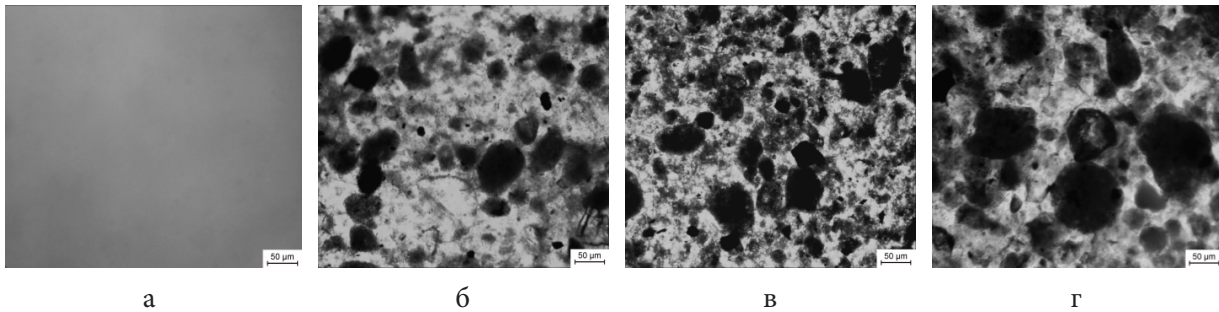


Рис. 2 – Мікрозображення зразків плівок ПУ-матриці (а) та ПУ-композитів зі вмістом каоліну 10 (б), 20 (в) та 40 мас. ч. (г)

Fig. 2 – Images of film samples of the PU matrix (a) and PU composites with a kaolin content of 10 (b), 20 (c), and 40 mass part (d).

На рис. 2 наведено мікрофотографії вихідної ПУ-матриці та ПУ-композитів.

Як видно (рис. 2а), для вихідної ПУ-матриці характерна однорідна структура. В ПУ-композитах (рис. 2б–г) частинки каоліну добре дисперговані в полімерній матриці, хоча й спостерігаємо агломерацію деяких частинок. При збільшенні вмісту каоліну частинки набувають більшої тенденції до агломерації та утворення кластерів, проте розподіл каоліну залишається достатньо рівномірним.

Для оцінки демпферної ефективності ПУ-композитів методом ДМА досліджено температурні залежності механічних втрат ($\tan\delta$). Відомо, що механічні втрати характеризують здатність полімерного матеріалу поглинати механічну енергію та перетворювати її в тепло при циклічному навантаженні [27]. Максимальні значення $\tan\delta$ полімери мають в області релаксацийного переходу, тобто поблизу температури склування (T_g), де швидкість (частота) координованого руху сегментів полімерного ланцюга має ту ж саму величину, що й швидкість (частота) механічної дії. Зазвичай вважають, що полімерні матеріали з механічними втрата-

ми на рівні показника $0,3$ ($\tan\delta \geq 0,3$) мають ефективну здатність до гасіння зовнішніх коливань. Однак для практичного застосування демпферний матеріал повинен мати не тільки високі значення $\tan\delta$, але й більш широкий діапазон температур, в якому він має ефективні вібропоглинальні властивості. Отже, ефективну демпферну здатність мають полімери, в яких є оптимальним поєднанням гнучкості молекулярного ланцюга та міжмолекулярної взаємодії, що забезпечує необхідне значення механічних втрат у визначеній області температур.

Температурні залежності $\tan\delta$ вихідної ПУ-матриці та композитів, що містять каолін, наведено на рис. 3. За параметрами релаксацийного максимуму для досліджених матеріалів визначено T_g , максимальну інтенсивність механічних втрат ($\tan\delta_{\max}$) та інтервал температур ефективного демпфування (ΔT) як область температур, в якій $\tan\delta \geq 0,3$ (табл. 2). Всі досліджені ПУ демонструють один релаксацийний перехід, що відповідає гнучкій (поліетерній) складовій. Для цього складу поліуретанів жорсткі домени утворюють дисперсну фазу, релаксацийний перехід якої зазвичай фіксують

доволі рідко. Порівняно з вихідною матрицею для наповнених ПУ-композитів релаксацийний максимум зсувається в бік низьких температур, і відповідні значення T_c є на 5–7 °С нижчими. Причиною зниження T_c для ПУ-композитів можуть бути структурні трансформації, що відбуваються через взаємодію наповнювача з матрицею. Відомо, що активні поверхні кристалів каоліну можуть легко взаємодіяти з полярними полімерами [13], і тому можна припустити, що присутні в наповнювачі гідроксильні групи утворюють у ПУ водневі зв'язки переважно з карбонільним киснем (C=O) уретанової групи. Це сприяє розшаруванню між гнучкими та жорсткими сегментами, що призводить до зростання рухливості гнучкої складової ПУ, і як наслідок зниження T_c .

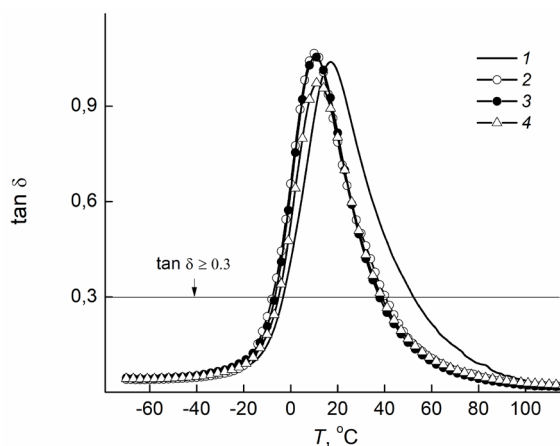


Рис. 3 – Температурні залежності $\tan \delta$ для ПУ-матриці (1) та ПУ-композитів зі вмістом каоліну 10 (2); 20 (3) та 40 мас.ч. (4)

Fig. 3 – Temperature dependence of $\tan \delta$ for PU matrix (1) and PU composites with kaolin content 10 (2); 20 (3) and 40 mass part (4)

Таблиця 2

ДМА-характеристики ПУ-матриці та композитів із різним вмістом каоліну

Table 2.

DMA characteristics of PU matrix and composites with different kaolin content.

Зразок	T_c , °С	$\tan \delta_{\max}$	Діапазон ефективного демпфування від T_1 до T_2 , (ΔT), °С	E' , МПа
ПУ	17	1,032	від -3 до 53, (56)	6,07
ПУ-10К	10	1,061	від -7 до 42, (49)	8,68
ПУ-20К	11	1,053	від -7 до 40, (47)	9,90
ПУ-40К	12	0,977	від -5 до 41, (46)	13,54

Також виявлено, що додавання каоліну в ПУ призводить до зменшення інтервалу ефективного демпфування та зсуву ΔT до менших температур (рис. 3, табл. 2). При

заміщенні частини ПУ-компонентів наповнювачем каоліном в кількості 40 мас.ч. спостерігаємо зменшення ΔT на 10 °С, і область ефективного демпфування поширю-

ється з -5 до 41 °С, що слід враховувати при використанні такого матеріалу за певних експлуатаційних умов.

Однак результати ДМА-досліджень показали, що ПУ-композити мають більш високі значення модуля пружності (E'). У табл. 2 наведено значення E' для ПУ-матриці та наповнених каоліном композитів. З рис. 4 видно, що спостерігається майже лінійна залежність зростання значень E' із підвищенням вмісту каоліну в ПУ-композиті.

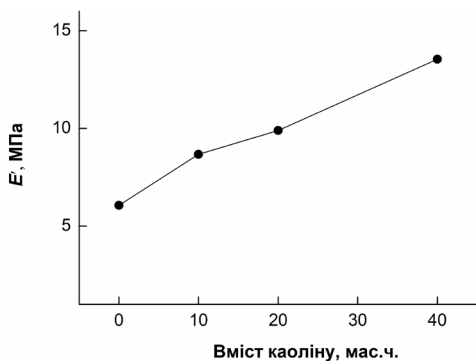


Рис. 4 – Залежність модуля пружності від вмісту каоліну в ПУ

Fig. 4 – Dependence of the storage modulus on the kaolin content in PU.

Таблиця 3

Механічні характеристики ПУ-матриці та композитів із різним вмістом каоліну

Table 3.

Mechanical characteristics of PU matrix and composites with different kaolin content.

Зразок	ПУ	ПУ-10К	ПУ-20К	ПУ-40К
σ , МПа	32,4	33,6	35,6	38,2
ϵ , %	527	304	247	186

Результати дослідження механічних властивостей ПУ-матриці та композитів, що вміщують каолін, подані в табл. 3, а на рис. 5

та рис. 6 відповідно наведено гістограми міцності при розриві σ та відносного подовження при розриві ϵ .

Показано, що за збільшенням вмісту наповнювача в ПУ спостерігаємо незначне зростання значення міцності при розриві (рис. 5) і суттєве зниження відносного подовження (рис. 6). Подібну тенденцію спостерігали й автори [25, 26]. Ймовірним механізмом посилення механічних показників за збільшенням вмісту метакаолінового наповнювача в лінійному ПУ з подовженим ланцюгом автори [26] вважають утворення водневих зв'язків між уретановими групами матриці та гідроксильними групами наповнювача, що може сприяти задовільній міжфазовій адгезії між наповнювачем і ПУ.

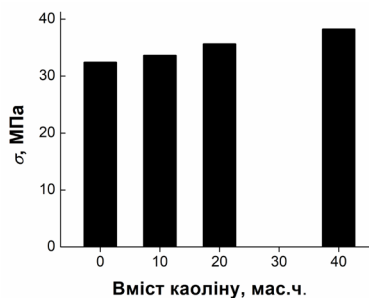


Рис. 5 – Залежність міцності при розриві від вмісту каоліну в ПУ

Fig. 5 – Dependence of tensile strength on the kaolin content in PU.

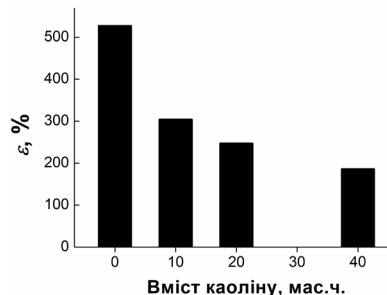


Рис. 6 – Залежність відносного подовження при розриві від вмісту каоліну в ПУ

Fig. 6 – Dependence of the relative elongation at break on the kaolin content in PU.

Температурні залежності кривих втрати ваги (ТГ) та диференційних кривих втрати ваги (ДТГ) наведено відповідно на рис. 7 та

рис. 8, показники процесу термоокиснювальної деструкції – в табл. 4.

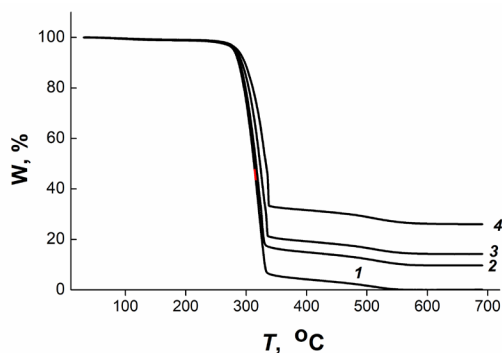


Рис. 7 – Криві ТГ для ПУ матриці (1) та ПУ-композитів зі вмістом каоліну 10 (2), 20 (3) та 40 мас.ч. (4)

Fig. 7 – TG curves for PU matrix (1) and PU composites with a kaolin content of 10 (2), 20 (3) and 40 mass part (4).

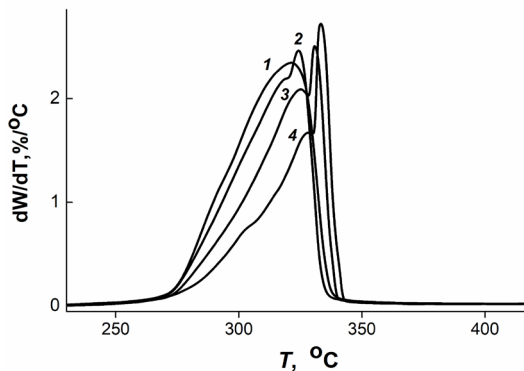


Рис. 8 – Криві ДТГ для вихідної ПУ-матриці (1) та ПУ-композитів зі вмістом каоліну 10 (2), 20 (3) та 40 мас.ч. (4)

Fig. 8 – DTG curves for PU matrix (1) and PU composites with a kaolin content of 10 (2), 20 (3) and 40 mass part (4).

Таблиця 4

Характеристики термоокиснювальної деструкції ПУ матриці та композитів із різним вмістом каоліну

Table 4.

Characteristics of thermo-oxidative destruction of PU matrix and composites with different kaolin content.

ПУ	$(T_{кінц} - T_{поч.})_{°C}$	$T_{max}^{°C}$	Втрата ваги за температур, %		Коксовий залишок, %
			300 °C	350 °C	
ПУ	338	320	25,21	94,37	0,05
ПУ-10К	338	324	21,43	83,63	9,40
ПУ-20К	339	330	15,73	79,48	16,24
ПУ-40К	341	333	11,31	67,24	28,10

Як видно з рис. 8, за додавання каоліну та підвищенням його вмісту зростають температурний інтервал стадії інтенсивного розкладання ($T_{кінц} - T_{поч}$) та температура

максимальної швидкості падіння ваги на стадії (T_{max}), що свідчить про покращення термостійкості ПУ композитів. При цьому температура початку окиснення для ПУ

і всіх розглянутих композитів практично збігаються ($T_{\text{поч}} = 270$ °С). Слід зауважити, що характер деструкції досліджених систем на стадії інтенсивного розкладу помітно змінюється за присутності наповнювача. На кривих ДТГ спостерігається розщеплення цієї стадії на дві – з максимальною швидкістю розкладу в інтервалі 318–327 °С та на більш високотемпературну в області 324–333 °С. Причому при збільшенні вмісту каоліну в композиті інтенсивність більш низькотемпературної стадії спадає, а високотемпературної стадії – зростає. Таке розщеплення можна пов'язати з формуванням у ПУ-матриці областей, які безпосередньо взаємодіють із поверхнею каоліну, і таких, що не мають взаємодії з наповнювачем. З табл. 4 також видно, що зі збільшенням вмісту каоліну знижується втрата ваги зразка композиту за температур 300 та 350 °С. Коксовий залишок відповідає концентрації наповнювача (мас.%).

ВИСНОВКИ. Методом *insitu* синтезовано поліуретанові композити, в яких як наповнювач використано природний мінерал каолін. Вміст каоліну в композитах складав від 10 до 40 масових частин. Наповнення ПУ-матриці каоліном значно здешевлює полімерний матеріал і за вмістом 40 мас.ч. каоліну його собівартість знижується майже на 30 відсотків. За результатами морфологічних досліджень кристалічний порошок каоліну являє собою частинки у вигляді агломерованих шаруватих пластинок неправильної форми розмірами від 1 до ~120 мкм, які в поліуретановій матриці рівномірно диспергуються, але за збільшення концентрації наповнювача мають тенденцію до агломерації. Досліджено в'язкопружні, механічні та термічні властиво-

сті поліуретанових композитів і за результатами динамічних механічних досліджень оцінено їхню демпферну ефективність. Виявлено, що наявність наповнювача призводить до незначного зменшення температурної області ефективного демпфування ПУ-композитів. Проте наповнення ПУ каоліном збільшує термостійкість та покращує механічні характеристики, що може сприяти розширенню функціональних властивостей ПУ-композитів.



Роботу виконано в межах держбюджетної теми «Наукові засади створення функціональних полімерних систем для сучасних технологій», державний реєстраційний номер: 0122U000435.

EFFECT OF FILLING A POLYURETHANE MATRIX WITH KAOLIN ON DAMPING EFFICIENCY, MECHANICAL AND THERMAL PROPERTIES.

N.V. Babkina, O.I. Antonenko,
L.O. Vorontsova, L.F. Kosyanchuk,
N.V. Kozak, O.O. Brovko*

*Institute of Macromolecular Chemistry NAS of
Ukraine,
48 Kharkivske shose, 02160 Kyiv, Ukraine
E-mail: nabab1906@gmail.com

One of the ways to reduce the cost of a polymer material is to replace the weight part of its composition with a cheaper natural filler. In this work, the objects of study are polyurethane composites synthesized by the *insitu* method,

containing the mineral filler kaolin from 10 to 40 mass parts. Filling with kaolin significantly lowers the price of polyurethane material, and its cost is reduced by almost 30 percent when the content of the filler is 40 mass parts. Morphological studies have shown that kaolin particles are uniformly dispersed in the polyurethane matrix, but there is a tendency for the agglomeration as the filler concentration increases. Viscoelastic, mechanical, and thermal properties of polyurethane composites were studied. The damping efficiency of polyurethane materials was estimated from the results of dynamic mechanical analysis. It is found that the filler additions slightly decrease the effective damping temperature range of polyurethane composites, but their heat resistance and mechanical properties improve. The method of thermogravimetric analysis was shown the presence of kaolin significantly changes the character of thermo-oxidative destruction of composites. The temperature interval of the intensive decomposition stage increases for filled systems and the temperature of the maximum rate of weight loss at the decomposition stage (T_{\max}) increases with increasing kaolin content. According to the results of mechanical studies, an increase in the kaolin content in polyurethanes leads to an increase in the storage modulus (E') and a significant decrease in the relative elongation (ϵ). Thus, filling with kaolin significantly reduces the cost of polyurethane composites and contributes to their expansion of functional properties due to increased heat resistance and improved mechanical characteristics.

Keywords: polyurethane composites, kaolin, damping efficiency, mechanical properties, heat resistance.

ЛІТЕРАТУРА

1. Sonnenchein M.F. Polyurethanes: Science, technology, markets, and trends. New York: John Wiley and Sons, 2014. 432 p. ISBN-10: 1118737830.
2. Engels H.-W., Pirkel H.-G., Albers R., Albach R. W., Krause J., Hoffmann A., Casselmann H., Dormish J. Polyurethanes: Versatile Materials and Sustainable Problem Solvers for Today's Challenges. *Angew. Chem. Intern. Ed.* 2013. **52**(36). P. 9422–9441. <https://doi.org/10.1002/anie.201302766>
3. Somarathna H.M.C.C., Raman S.N., Mohotiti D., Mutalib A.A., Badri K.H. The use of polyurethane for structural and infrastructural engineering applications: A state-of-the-art review. *Construction and Building Materials*. 2018. **190**. P. 995–1014. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.166>
4. Lipatov Yu. S., Kercha Yu. Yu., Sergeeva L.M. Структура и свойства полиуретанов. К.: Nauk dumka, 1970. 280 p. (*in Russian*).
5. Chen S., Wang Q., Wang T. Preparation, tensile, damping and thermal properties of polyurethanes based on various structural polymer polyols: effects of composition and isocyanate index. *Journal of Polymer Research*. 2012. **19**(11). P. 1–7. DOI: 10.1007/s10965-012-9994-2
6. Chen H., Zhou H.J., Liu D.J., Li Y.T. The Effect of Polyester Structures on the Damping Property of Polyurethane Elastomers. *Adv. Mat. Res.* 2012. **581–582**. P. 710–714. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.581-582.710>.
7. Nakamura M., Aoki Y., Enna G., Oguro K., Wada H. Polyurethane damping material. *J. Elastomers and Plastics*. 2015. **47**(6). P. 515–522. <https://doi.org/10.1177/0095244314526739>
8. Beniah G., Liu K., Heath W.H., Miller M.D., Scheidt K.A., Torkelson J.M. Novel thermoplastic polyhydroxyurethane elastomers as ef-

- fective damping materials over broad temperature ranges. *European Polymer Journal*. 2016. **84**. P. 770–783.
DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2016.05.031
9. Feng Z., Jianjun G., Xin D., Ligang C. Study on Inorganic Modification of Damping Capacity of Polyurethane Materials for Building. *MATEC Web of Conferences*. 2018. **175**: art. 01016.
<https://doi.org/10.1051/matecconf/201817501016>
 10. Feng Y., Zhou H., Zhang X., Li Y., Li Y. Preparation and characterization of polyurethane damping materials derived from mixed-base-prepolymers containing numerous side methyls. *e-Polymers*. 2015. **15**(5). P. 323–327.
<https://doi.org/10.1515/epoly-2015-0097>
 11. Babkina N.V., Antonenko O.I., Kosianchuk L.F., Brovko O.O. Dempferna efektyvnist dvosharovykh poliuretanykh kompozytiv. *Polym. J.* 2021. **43**(1). P. 12–18.
DOI 10.15407/polymerj.43.01.012
 12. Babkina N., Antonenko O., Kosyanchuk L., Vorontsova L., Babich O., Brovko O. Effect of polyurethane material design on damping ability. *Polymers for Advanced Technologies*. 2023. **34**(11). P. 3426–3437.
<https://doi.org/10.1002/pat.6156>
 13. Katz H.S., Milewski J.V. (Eds.) Handbook of fillers and fillers for cements for plastics. New York: Van Nostrand Reinhold, 1978. 652 p.
 14. Murray H.H. Applied Clay Mineralogy: Occurrences, Processing and Applications of Kaolins, Bentonites, Palygorskite-Sepiolite, and Common Clays. *Developments in Clay Science*, 2. Amsterdam: Elsevier, 2007. 180 p.
ISBN-10: 0-444-51701-4.
 15. Anam A., Gamit N., Prajapati V., Dholakiya B.Z. An overview of kaolin and its potential application in thermosetting polymers. *Materials Today Communications*. 2023. **36**: 106827.
<https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.106827>
 16. Wu W., Tian L. Formulation and morphology of kaolin-filled rubber composites. *Applied Clay Science*. 2013. **80–81**. P. 93–97.
<https://doi.org/10.1016/j.clay.2013.06.025>
 17. Sheikh S.H., Yin X., Ansarifar A., Yendal K. The potential of kaolin as a reinforcing filler for rubber composites with new sulfur cure systems. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2017. **36**(16). P. 1–14.
<https://doi.org/10.1177/0731684417712070>
 18. Ahmed N.M., El-Sabbagh S.H. The Influence of Kaolin and Calcined Kaolin on SBR Composite Properties. *Polymer composites*. 2014. **35**(3). P. 570–580.
<https://doi.org/10.1002/pc.22697>
 19. Mohammed J.H. Tensile and Compressive Properties of Kaolin Reinforced Epoxy. *Al-Khwarizmi Engineering Journal*. 2015. **11**(3): 96–101.
 20. Jang K.-S. Mineral filler effect on the mechanics and flame retardancy of polycarbonate composites: talc and kaolin. *e-Polymers*. 2016. **16**(5): 379–386.
<https://doi.org/10.1515/epoly-2016-0103>
 21. Mustafa S.N. Effect of kaolin on the mechanical properties of polypropylene/polyethylene composite material. *Diyala Journal of Engineering Sciences*. 2012. **5**(2). P. 162–178.
<https://doi.org/10.24237/djes.2012.05212>
 22. Salmah H., Ruzaidi C.M., Supri A.G. Compatibilisation of Polypropylene/Ethylene Propylene Diene Terpolymer/Kaolin Composites: The Effect of Maleic Anhydride-Grafted-Polypropylene. *Journal of Physical Science*. 2009. **20**(1). P. 99–107.
<https://doi.org/10.24237/djes.2012.05212>
 23. Thongsoon D., Abeykoon C., Vera-Marun I.J., Potluri P., Polrut W., Boonliang B. Comparison of Mechanical Properties of Carbon Fibre and Kaolin Reinforced Polypropylene Composites. *Proceedings of the 7th World Congress on Mechanical, Chemical, and Material Engineering (MCM'21)*. 2021. Virtual Conference, Paper No. MMME 301.
<https://doi.org/10.11159/mmme21.301>
 24. Rama M.S., Swaminathan S. Influence of Structure of Organic Modifiers and Polyurethane

- on the Clay Dispersion in Nanocomposites via In Situ Polymerization. *Journal of Applied Polymer Science*. 2010. **118**(3). P. 1774–1786. <https://doi.org/10.1002/app.32500>
25. Shahzamani M., Rezaeian I., Loghmani M.S., Zahedi P., Rezaeian A. Effects of BaSO₄, CaCO₃, kaolin and quartz fillers on mechanical, chemical and morphological properties of cast polyurethane. *Plastics, Rubber and Composites*. 2012, **41**(6) P. 263–269. <https://doi.org/10.1179/1743289811Y.0000000035>
 26. Roopa S., Siddaramaiah. Effect of Meta Kaolin Filler on the Physico-mechanical Properties and Chemical Resistance of Chain Extended Polyurethane. *Journal of Reinforced plastics and composites*. 2007. **26**(7). P. 681–686. <https://doi.org/10.1177/0731684407075578>
 27. Nielson L.E. Mechanical Properties of Polymer and Composites. New York: Marcel Dekker-Int., 1974. 255 p. ISBN-10: 0824761837.
 4. Lipatov Yu. S., Kercha Yu. Yu., Sergeeva L.M. Структура ісожствя поліуретанов. К.: Nauk. dumka, 1970. 280 p. (*in Russian*).
 5. Chen S., Wang Q., Wang T. Preparation, tensile, damping and thermal properties of polyurethanes based on various structural polymer polyols: effects of composition and isocyanate index. *Journal of Polymer Research*. 2012. **19**(11): 1–7. DOI: 10.1007/s10965-012-9994-2
 6. Chen H., Zhou H.J., Liu D.J., Li Y.T. The Effect of Polyester Structures on the Damping Property of Polyurethane Elastomers. *Adv. Mat. Res.* 2012. **581–582**: 710–714. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.581-582.710>.
 7. Nakamura M., Aoki Y., Enna G., Oguro K., Wada H. Polyurethane damping material. *J. Elastomers and Plastics*. 2015. **47**(6): 515–522. <https://doi.org/10.1177/0095244314526739>
 8. Beniah G., Liu K., Heath W.H., Miller M.D., Scheidt K.A., Torkelson J.M. Novel thermo-plastic polyhydroxyurethane elastomers as effective damping materials over broad temperature ranges. *European Polymer Journal*. 2016. **84**: 770–783. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2016.05.031
 9. Feng Z., Jianjun G., Xin D., Ligang C. Study on Inorganic Modification of Damping Capacity of Polyurethane Materials for Building. *MATEC Web of Conferences*. 2018. **175**: art. 01016. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201817501016>
 10. Feng Y., Zhou H., Zhang X., Li Y., Li Y. Preparation and characterization of polyurethane damping materials derived from mixed-base-prepolymers containing numerous side methyls. *e-Polymers*. 2015. **15**(5): 323–327. <https://doi.org/10.1515/epoly-2015-0097>
 11. Babkina N.V., Antonenko O.I., Kosianchuk L.F., Brovko O.O. Демпферна ефектывність двошарових поліуретанових композицій. *Polym. J.* 2021. **43**(1): 12–18. DOI 10.15407/polymerj.43.01.012

REFERENCES

1. Sonnenchein M.F. Polyurethanes: Science, technology, markets, and trends. New York: John Wiley and Sons, 2014. 432 p. ISBN-10: 1118737830.
2. Engels H.-W., Pirkl H.-G., Albers R., Albach R.W., Krause J., Hoffmann A., Casselmann H., Dormish J. Polyurethanes: Versatile Materials and Sustainable Problem Solvers for Today's Challenges. *Angew. Chem. Intern. Ed.* 2013. **52**(36): 9422–9441. <https://doi.org/10.1002/anie.201302766>
3. Somarathna H.M.C.C., Raman S.N., Mohotti D., Mutalib A.A., Badri K.H. The use of polyurethane for structural and infrastructural engineering applications: A state-of-the-art review. *Construction and Building Materials*. 2018. **190**: 995–1014. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.166>

12. Babkina N., Antonenko O., Kosyanchuk L., Vorontsova L., Babich O., Brovko O. Effect of polyurethane material design on damping ability. *Polymers for Advanced Technologies*. 2023. **34**(11): 3426–3437. <https://doi.org/10.1002/pat.6156>
13. Katz H.S., Milewski J.V.(Eds.) Handbook of fillers and reinforcements for plastics. New York: Van Nostrand Reinhold. 1978. 652 p.
14. Murray H.H. Applied Clay Mineralogy: Occurrences, Processing and Applications of Kaolins, Bentonites, Palygorskite-Sepiolite, and Common Clays. *Developments in Clay Science*. 2. Amsterdam: Elsevier. 2007. 180 p. ISBN-10: 0-444-51701-4.
15. Anam A., Gamit N., Prajapati V., Dholakiya B.Z. An overview of kaolin and its potential application in thermosetting polymers. *Materials Today Communications*. 2023. **36**: 106827. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.106827>
16. Wu W., Tian L. Formulation and morphology of kaolin-filled rubber composites. *Applied Clay Science*. 2013. **80–81**: 93–97. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2013.06.025>
17. Sheikh S.H., Yin X., Ansarifar A., Yendal K. The potential of kaolin as a reinforcing filler for rubber composites with new sulfur cure systems. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2017. **36**(16): 1–14. <https://doi.org/10.1177/0731684417712070>
18. Ahmed N.M., El-Sabbagh S.H. The Influence of Kaolin and Calcined Kaolin on SBR Composite Properties. *Polymer composites*. 2014. **35**(3): 570–580. <https://doi.org/10.1002/pc.22697>
19. Mohammed J.H. Tensile and Compressive Properties of Kaolin Reinforced Epoxy. *Al-Khwarizmi Engineering Journal*. 2015. **11**(3): 96–101.
20. Jang K.-S. Mineral filler effect on the mechanics and flame retardancy of polycarbonate composites: talc and kaolin. *e-Polymers*. 2016. **16**(5): 379–386. <https://doi.org/10.1515/epoly-2016-0103>
21. Mustafa S.N. Effect of kaolin on the mechanical properties of polypropylene/polyethylene composite material. *Diyala Journal of Engineering Sciences*. 2012. **5**(2): 162–178. <https://doi.org/10.24237/djes.2012.05212>
22. Salmah H., Ruzaidi C.M., Supri A.G. Compatibilisation of Polypropylene/Ethylene Propylene Diene Terpolymer/Kaolin Composites: The Effect of Maleic Anhydride-Grafted-Polypropylene. *Journal of Physical Science*. 2009. **20**(1): 99–107. <https://doi.org/10.24237/djes.2012.05212>
23. Thongsoon D., Abeykoon C., Vera-Marun I.J., Potluri P., Polrut W., Boonliang B. Comparison of Mechanical Properties of Carbon Fibre and Kaolin Reinforced Polypropylene Composites. *Proceedings of the 7th World Congress on Mechanical, Chemical, and Material Engineering (MCM'21)*. 2021. Virtual Conference, Paper No. MMME 301. <https://doi.org/10.11159/mmme21.301>
24. Rama M.S., Swaminathan S. Influence of Structure of Organic Modifiers and Polyurethane on the Clay Dispersion in Nanocomposites via In Situ Polymerization. *Journal of Applied Polymer Science*. 2010. **118**(3): 1774–1786. <https://doi.org/10.1002/app.32500>
25. Shahzamani M., Rezaeian I., Loghmani M.S., Zahedi P., Rezaeian A. Effects of BaSO₄, CaCO₃, kaolin and quartz fillers on mechanical, chemical and morphological properties of cast polyurethane. *Plastics, Rubber and Composites*. 2012. **41**(6): 263–269. <https://doi.org/10.1179/1743289811Y.0000000035>
26. Roopa S., Siddaramaiah. Effect of Meta Kaolin Filler on the Physico-mechanical Properties and Chemical Resistance of Chain Extended Polyurethane. *Journal of Reinforced plastics and composites*. 2007. **26**(7): 681–686. <https://doi.org/10.1177/0731684407075578>
27. Nielson L.E. Mechanical Properties of Polymer and Composites. New York: Marcel Dekker Int., 1974. 255 p. ISBN-10: 0824761837.

Стаття надійшла 26.09.2023.