



<https://doi.org/10.15407/polymerj.43.01.012>  
УДК 541.64: 534.282

**Н.В. БАБКІНА,**

Інститут хімії високомолекулярних сполук НАН України, 48, Харківське шосе, Київ, 02160, Україна,  
e-mail: nabab1906@gmail.com  
ORCID: 0000-0002-1803-0887

**О.І. АНТОНЕНКО,**

Інститут хімії високомолекулярних сполук НАН України, 48, Харківське шосе, Київ, 02160, Україна,  
e-mail: antoks2870@gmail.com  
ORCID: 0000-0002-6451-7499

**Л.Ф. КОСЯНЧУК,**

Інститут хімії високомолекулярних сполук НАН України, 48, Харківське шосе, Київ, 02160, Україна,  
e-mail: lkosyanchuk@ukr.net  
ORCID: 0000-0002-3617-9538

**О.О. БРОВКО,**

Інститут хімії високомолекулярних сполук НАН України, 48, Харківське шосе, Київ, 02160, Україна,  
e-mail: brovko@nas.gov.ua  
ORCID: 0000-0003-0238-1137

## **ДЕМПФЕРНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ДВОШАРОВИХ ПОЛІУРЕТАНОВИХ КОМПОЗИТІВ**

За результатами динамічних механічних досліджень оцінена демпферна ефективність двошарових поліуретанових (ПУ) композитів, сконструйованих шляхом склеювання двох плівок сформованих ПУ різної температури склування ( $T_g$ ). Демпферну ефективність оцінювали за параметрами максимуму механічних втрат ( $\tan\delta$ ). Для варіювання  $T_g$  синтезовано три типи ПУ різної хімічної природи та будови. Проаналізовано вплив збільшення різниці між  $T_g$  вихідних ПУ ( $\Delta T_g$ ) на демпферну ефективність сформованих з них двошарових ПУ композитів. Область температур ефективного демпфування ( $\Delta T$ ) оцінювали як діапазон температур за умов  $\tan\delta \geq 0,3$  та  $\tan\delta \geq 0,6$ . Показано, що за  $\Delta T_g = 7$  °С двошаровий ПУ композит має один релаксаційний максимум, а його температурна область демпферної ефективності розширюється в порівнянні з  $\Delta T$  для окремих ПУ. За умов  $\Delta T_g = 23$  і 30 °С двошарові ПУ композити проявляють демпферну ефективність у двох температурних областях за  $\tan\delta \geq 0,3$ , що забезпечує появу додаткового температурного діапазону ефективного демпфування. Визначено значення будови кожного шару ПУ при формуванні двошарового композиту шляхом склеювання. Легше проникнення залишків органічного розчинника клею в поверхню плівки ПУ лінійної будови приводить до пластифікації відповідного шару в композиті і знижує  $T_g$ . Показано, що двошарова конструкція може бути застосована для вирішення конкретних завдань, пов'язаних із корегуванням або розширенням діапазону температур ефективного демпфування.

**Ключові слова:** демпферна ефективність, поліуретан, двошарові поліуретанові композити, температурний інтервал ефективного демпфування, динамічний механічний аналіз.

### **Вступ**

Для зниження або повного гасіння шкідливих вібрацій у багатьох приладах або конструкціях

використовують демпферні (вібропоглинальні) матеріали [1] в автомобільній промисловості, літако- та суднобудуванні, аеродинамічній галузі, приладобудуванні тощо. Найчастіше

Цитування: Бабкіна Н.В., Антоненко О.І., Косянчук Л.Ф., Бровко О.О. Демпферна ефективність двошарових поліуретанових композитів. *Полімерний журнал*. 2021. № 1. С. 12—18. <https://doi.org/10.15407/polymerj.43.01.012>

при розробці сучасних демпферних систем застосовують полімерні матеріали, які завдяки своїй в'язкопружній природі мають унікальну здатність поглинати механічну енергію та перетворювати її в тепло при циклічному навантаженні [2, 3]. Демпферна ефективність матеріалу оцінюється як енергія, що розсіюється під час механічної вібрації, і визначається параметром механічних втрат ( $\tan\delta$ ). Максимальні значення  $\tan\delta$  полімери мають в області релаксаційного переходу, тобто поблизу температури склування ( $T_c$ ). Як правило, для практичного застосування демпферний матеріал повинен мати не тільки високі значення  $\tan\delta$ , а й ширший діапазон температури, за якої він має ефективні вібропоглинальні властивості, тобто температурний інтервал ефективного демпфування ( $\Delta T$ ).

Зазвичай, гомополімери мають вузький пік механічних втрат в області склування. Розширення температурного діапазону демпферної ефективності матеріалу досягається шляхом отримання гетерогенних полімерних систем зі складною фазовою структурою, а саме сумішей полімерів [4, 5], блок-кополімерів, взаємопроникних полімерних сіток (ВПС) [6–11], модифікації добавками та наповнювачами [11–16], створення градієнтних і багатошарових систем [17–19]. Передбачається, що матеріали, які складаються з декількох шарів різних за складом полімерів, що мають також і різні  $T_c$ , можуть забезпечити задовільне поглинання вібрацій за ширшого інтервалу температур. Крім того, нанесенням додаткового шару полімеру з іншими визначеними властивостями можна цілеспрямовано корегувати демпферні характеристики об'єктів для розширення умов експлуатації.

Покращення демпферних властивостей матеріалів потребує створення складних систем або використання дороговартісних компонентів, що економічно не обґрунтовано. Тому актуально отримання вібропоглинальних матеріалів з широким спектром демпферних властивостей на основі вже відомих полімерів і в межах одного класу сполук. Для цього перспективне використання поліуретанів (ПУ) [20–22]. Можливості отримання на основі ПУ широкого спектра полімерних матеріалів закладено, головним чином, в особливостях їхньої структури, яка визначається як природою

вихідних компонентів, так і умовами синтезу.

Мета роботи полягала у визначенні демпферної ефективності двошарових поліуретанових композитів різної хімічної природи та будови кожного ПУ шару.

## Експериментальна частина

Для синтезу поліуретанів були використані такі реагенти:

- олігодіетиленглікольадипінат молекулярної маси 1500 (ОДА-1500) (Казанський завод СК), який сушили вакуумуванням за  $T=70-80$  °С та  $P=5-6$  мм рт. ст. протягом 5–6 год і зберігали в атмосфері сухого азоту;
- олігооксипропіленгліколь молекулярної маси 1000 (ОПГ-1000) (Rakita, Польща) – сушили та зберігали за такою ж схемою, що й ОДА-1500;
- ізоціанати: гексаметилендіізоціанат (ГМДІ) (99,9%; Merck) і 2,4-толуїлендіізоціанат (ТДІ) (81,4; Merck), використовували без додаткового очищення;
- триметилпропан (ТМП) (99,9%; Merck), сушили під вакуумом  $P=5-6$  мм рт.ст. за  $T=48$  °С протягом 60 год;
- бутандіол (БД) (99,9%; Merck), сушили над молекулярними ситами і переганяли під вакуумом за  $T_{кип} = 120$  °С,  $P= 10$  мм рт. ст.;
- поліуретановий клей «Десмокол».

Синтез ПУ проводили традиційним способом, синтезуючи спочатку форполімер – макродіізоціанат (МДІ), який отримували змішуванням олігомерного діолу і діізоціанату за мольного співвідношення 1:2, ретельно перемішуючи за температури 70 °С. Були отримані такі МДІ: МДІ-1 на основі ОДА-1500 і ГМДІ; МДІ-2 на основі ОПГ-1000 і ТДІ.

Синтез ПУ проводили додаючи до МДІ і ретельно перемішуючи форполімер і зшивач (ТМП) або подовжувач (БД) ланцюга за температури 60–70 °С протягом 15 хв з подальшим вакуумуванням реакційної суміші для видалення пухирців повітря. Плівки витримували в тефлонових формах за температури 60 °С

Таблиця 1. Склад синтезованих ПУ

Зразки	Склад
ПУ-1	МДІ-1 (ОДА-1500, ГМДІ) + ТМП
ПУ-2	МДІ-2 (ОПГ-1000, ТДІ) + БД
ПУ-3	МДІ-2 (ОПГ-1000, ТДІ) + ТМП

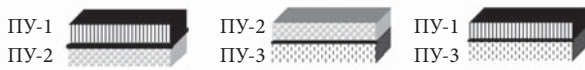


Рис. 1. Зразки сформованих двошарових ПУ композитів

протягом 6–8 год до повного затвердіння. Товщина отриманих зразків становила 1 і 2 мм. Склад синтезованих ПУ наведено в табл.1.

Отже, були отримані ПУ зразки як різної хімічної природи (ПУ-1 і ПУ-3), так і різної будови: лінійної (ПУ-2) та сітчастої (ПУ-3).

Зі сформованих ПУ плівок вирізали прямокутні зразки однакових розмірів (40мм × 10мм × 1мм), з яких конструювали двошарові композити шляхом склеювання клеєм «Десмокол» згідно з інструкцією до його застосування. Для дослідження формували 3 типи двошарових композитів (рис. 1): ПУ-1/ПУ-2 склеюванням плівок ПУ-1 і ПУ-2; ПУ-2/ПУ-3 склеюванням плівок ПУ-2 та ПУ-3; ПУ-1/ПУ-3 склеюванням плівок ПУ-1 і ПУ-3.

Співвідношення компонентів для всіх двошарових композитів визначалося за товщиною шарів і становило 50/50 % мас. Товщина клейового шару становила 25–30 мкм.

Зразки синтезованих ПУ та двошарових композитів досліджували методом динамічного механічного аналізу (ДМА) на приладі Q800 (TA Instruments, USA) в режимі деформації подвійного вигину консолі. Вимірювання тангенса механічних втрат ( $\tan\delta$ ) проводили в режимі вимушених синусоїдальних коливань з частотою 10 Гц в інтервалі температур від -70 до +100 °C за швидкості нагрівання 3 °C/хв.

## Результати дослідження та їх обговорення

Для оцінки демпферної ефективності синтезованих ПУ та двошарових поліуретанових композитів досліджували температурні залежності механічних втрат. Вважається, що полімерні матеріали з механічними втратами на рівні показника 0,3 ( $\tan\delta \geq 0,3$ ) мають бути ефективні для гасіння зовнішніх коливань [6–11]. Але чим вище значення  $\tan\delta$ , тим більша здатність матеріалу до демпфування вібрацій з високою амплітудою. За параметрами релаксаційного максимуму для досліджених матеріалів визначали  $T_c$ , максимальну інтенсивність

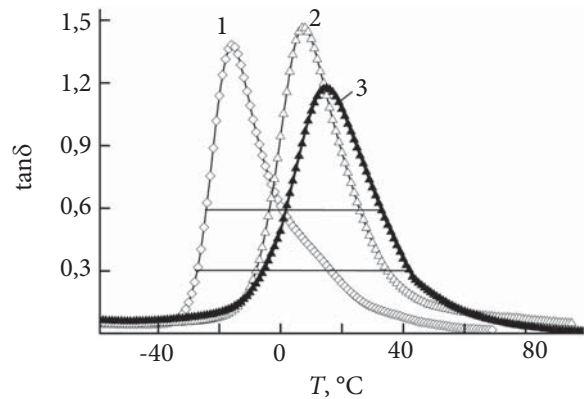


Рис. 2. Температурні залежності  $\tan\delta$  для: ПУ-1 (1); ПУ-2 (2) та ПУ-3 (3)

механічних втрат ( $\tan\delta_{\max}$ ) і температурний інтервал ефективного демпфування ( $\Delta T$ ) як ширину максимуму (з  $T_1$  до  $T_2$ ) за умов  $\tan\delta \geq 0,3$  та  $\tan\delta \geq 0,6$ .

З рис. 2 видно, що всі вихідні ПУ характеризуються чітким релаксаційним максимумом, але внаслідок різної хімічної природи та будови вони мають різні  $T_c$ , значення яких вказані в табл. 2. Найнижче значення  $T_c$  має сітчастий ПУ-1 на основі МДІ-1 ( $T_c = -16$  °C), найвище – сітчастий ПУ-3 на основі МДІ-2 ( $T_c = 14$  °C), а значення  $T_c$  для лінійного ПУ-2 на основі МДІ-2 дорівнює 7 °C. Всі ПУ мають високі значення максимальних втрат ( $\tan\delta_{\max} > 1$ ) і майже однакові значення  $\Delta T$ , а саме 42 – 47 °C за  $\tan\delta \geq 0,3$  та 26 – 30 °C за  $\tan\delta \geq 0,6$  (табл. 2). Однак, температурні межі ефективного демпфування для всіх ПУ різні, і це вказує, що як демпферний матеріал кожен із синтезованих ПУ може бути корисним в окремій визначеній температурній області.

Передбачали, що формування двошарових композитів шляхом склеювання плівок окремих вихідних ПУ з різною  $T_c$  може сприяти розширенню температурного інтервалу ефективного демпфування. Для вивчення цього питання на прикладі ПУ матеріалів з різними  $T_c$  проаналізовано, як впливає збільшення різниці між  $T_c$  вихідних ПУ ( $\Delta T_c$ ) на демпферні характеристики сформованих з них двошарових композитів. Враховуючи значення  $T_c$  для всіх синтезованих ПУ (табл. 2) збільшення  $\Delta T_c$  спостерігається у такому ряду двошарових ПУ композитів: ПУ-2/ПУ-3 ( $\Delta T_c = 7$  °C); ПУ-1/ПУ-2 ( $\Delta T_c = 23$  °C); ПУ-1/ПУ-3 ( $\Delta T_c = 30$  °C). Але

Таблиця 2. Демпферні характеристики вихідних ПУ та двошарових ПУ композитів

ПУ матеріал	$T_c, ^\circ\text{C}$	$\tan\delta_{\max}$	Ширина максимуму $\tan\delta$ з $T_1$ по $T_2, (\Delta T)$	
			$\tan\delta \geq 0,3$	$\tan\delta \geq 0,6$
ПУ-1	-16	1,36	з - 27 по 17, (44)	з - 25 по 1, (26)
ПУ-2	7	1,45	з - 8 по 34, (42)	з -4 по 25, (29)
ПУ-3	14	1,18	з -5 по 42, (47)	з 2 по 32, (30)
Двошарові ПУ композити				
ПУ-2/ПУ-3 ( $\Delta T_c=7^\circ\text{C}$ )	8	0,85	з -15 по 39, (54) з -24 по -16,(8)	з -2 по 25, (27)
ПУ-1/ПУ-2 ( $\Delta T_c=23^\circ\text{C}$ )	-20; 4	0,39; 0,80	з -7 по 28, (35) з -24 по -14, (10)	з -2 по 15, (17)
ПУ-1/ПУ-3 ( $\Delta T_c=30^\circ\text{C}$ )	-19; 9	0,37; 0,60	з -7 по 37, (44)	-

слід також враховувати, що в кожному з цих двошарових композитів обидва ПУ шари відрізняються або за хімічною природою, або будовою, що також може впливати на демпферні властивості такого двошарового матеріалу.

Отже, двошаровий композит ПУ-2/ПУ-3 з найменшим значенням  $\Delta T_c$  формувався з ПУ, що мають однакову хімічну природу, але різну будову: лінійну для ПУ-2 та сітчасту для ПУ-3. На рис. 3 наведено температурні залежності  $\tan\delta$  для ПУ-2/ПУ-3 в порівнянні з вихідними ПУ-2 та ПУ-3. Виявлено, що двошаровий композит ПУ-2/ПУ-3 має один широкий релаксаційний максимум, температура якого майже збігається з відповідним максимумом для ПУ-2. З табл. 2 видно, що лінійний ПУ-2 та композит ПУ-2/ПУ-3 мають практично однакове значення  $T_c$ . Такий результат, здавалося б, є несподіваним. Звісно передбачалося,

що для двошарового композиту ПУ-2/ПУ-3 за співвідношення компонентів 50/50 % мас. буде спостерігатися один релаксаційний перехід як результат накладання релаксаційних максимумів з близькими значеннями  $T_c$ , але очікувалось, що температура цього переходу буде близька середньому значенню  $T_c$  для ПУ-2 та  $T_c$  для ПУ-3. Отже, пояснення нижчого значення  $T_c$  для композиту ПУ-2/ПУ-3 потребує додаткових досліджень.

Показано, що за  $\tan\delta \geq 0,3$  температурний діапазон ефективного демпфування для двошарового композиту ПУ-2/ПУ-3 становить 54 градуси, і більший, ніж  $\Delta T$  для окремих ПУ-2 та ПУ-3 (табл. 2). Збільшення  $\Delta T$  для композиту ПУ-2/ПУ-3 відбувається за рахунок поширення в область низьких температур (рис. 3). Але за  $\tan\delta \geq 0,6$  межі та значення  $\Delta T$  для двошарового композиту ПУ-2/ПУ-3 та лінійного ПУ-2

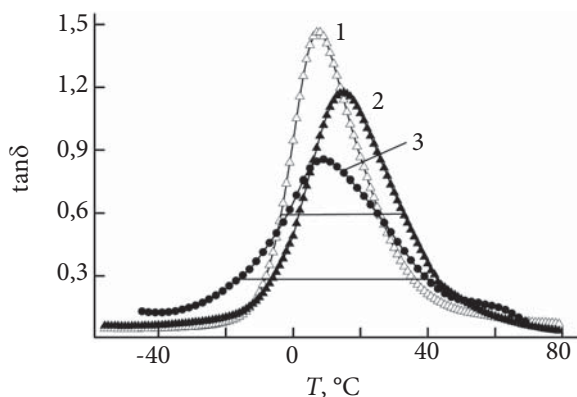


Рис. 3. Температурні залежності  $\tan\delta$  для: ПУ-2 (1); ПУ-3 (2) та двошарового композиту ПУ-2/ПУ-3 (3)

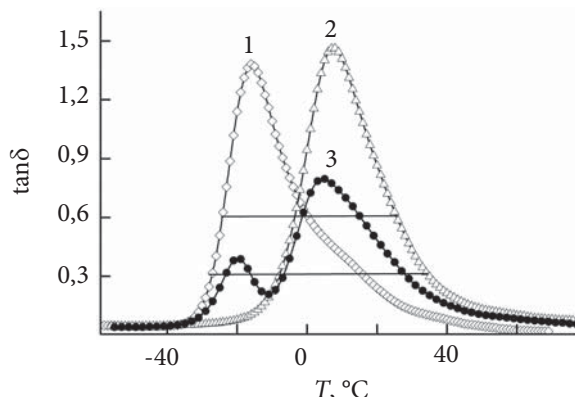


Рис. 4. Температурні залежності  $\tan\delta$  для: ПУ-1 (1); ПУ-2 (2) та двошарового композиту ПУ-1/ПУ-2 (3)



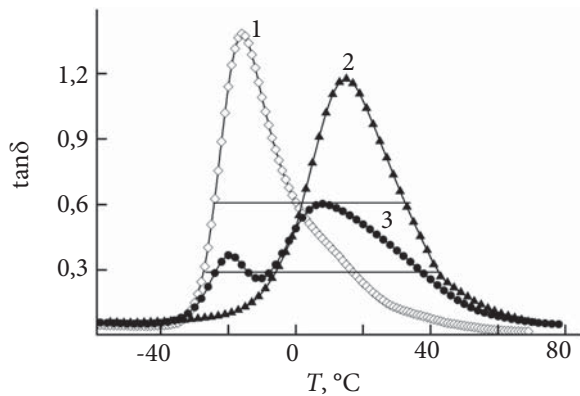


Рис. 5. Температурні залежності  $\tan\delta$  для: ПУ-1 (1); ПУ-3 (2) та двошарового композиту ПУ-1/ПУ-3 (3)

практично збігаються. При цьому інтенсивність релаксаційного максимуму для ПУ-2/ПУ-3 значно менша, ніж  $\tan\delta_{\max}$  для ПУ-2 та ПУ-3.

На рис. 4 наведено температурні залежності  $\tan\delta$  для двошарового композиту ПУ-1/ПУ-2, сформованого з шарів різної хімічної природи і будови, і  $\Delta T_c = 23$  °С. Крім сітчастої будови ПУ-1 відрізняється від ПУ-2 також хімічною природою вихідних компонентів внаслідок використання різних МДІ та поліефірів різної молекулярної маси (табл. 1). З рис. 4 видно, що композит ПУ-1/ПУ-2 характеризується двома релаксаційними максимумами, але висота кожного значно нижча, ніж  $\tan\delta_{\max}$  відповідного вихідного ПУ. Отже, за умови  $\Delta T_c = 23$  °С спостерігається явна двофазовість двошарового ПУ композиту. Виявлено, що  $T_c$ , яка відповідає ПУ-1 у двошаровому композиті, на 4 °С менша, ніж  $T_c$  вихідного ПУ-1, а  $T_c$ , що відповідає ПУ-2 у двошаровому композиті, на 3 °С менша, ніж  $T_c$  вихідного ПУ-2 (табл. 2). Ймовірно, таке зниження обох  $T_c$  для двошарового композиту ПУ-1/ПУ-2 пов'язане з незначною пластифікацією обох шарів внаслідок проникнення залишків розчинника клею в поверхні обох плівок у процесі склеювання. Температурні інтервали, за яких композит ПУ-1/ПУ-2 має ефективні демпферні властивості, поширюються з -24 до -16 °С ( $\Delta T = 8$  градусів) і з -7 до +28 °С ( $\Delta T = 35$  градусів) за  $\tan\delta = 0,3$ , і з -2 до +15 °С ( $\Delta T = 17$  градусів), коли  $\tan\delta = 0,6$  (табл. 2). Такі значення  $\Delta T$  занадто низькі, щоб вважати демпферну ефективність композиту ПУ-1/ПУ-2 задовільною.

Двошаровий композит ПУ-1/ПУ-3, для якого  $\Delta T_c = 30$  °С, сформовано з ПУ різної хімічної природи, але однакової сітчастої будови (табл. 1). Спостерігається деяка подібність температурної залежності  $\tan\delta$  для композиту ПУ-1/ПУ-3 (рис. 5) з характером релаксаційної поведінки композиту ПУ-1/ПУ-2 (рис. 4). Композит ПУ-1/ПУ-3 також демонструє два релаксаційних максимума, що відповідають кожному з компонентів, які зсуваються в бік нижчих температур щодо вихідних ПУ і мають значно нижчі значення  $\tan\delta_{\max}$ . З табл. 2 видно, що  $T_c$  для кожного компонента двошарового композиту ПУ-1/ПУ-3 нижча за  $T_c$  вихідних ПУ. Це може бути через виникнення дефектності структури кожного шару на межі з'єднання склеєних поверхонь.

Ефективні демпферні властивості композиту ПУ-1/ПУ-3 також поширюються на дві температурні області за умови  $\tan\delta \geq 0,3$ : з -24 до -14 °С ( $\Delta T = 10$  градусів) та з -7 до +37 °С ( $\Delta T = 44$  градуси) (табл. 2). Виявлено, що температурні межі першого інтервалу майже збігаються з  $\Delta T$  для композиту ПУ-1/ПУ-3, а межі другого діапазону ефективного демпфування для композиту ПУ-1/ПУ-3 ширші ( $\Delta T = 44$  градусів), ніж для композиту ПУ-1/ПУ-2 ( $\Delta T = 35$  градусів) за рахунок поширення в бік позитивних температур. Однак для композиту ПУ-1/ПУ-3 не спостерігається температурної області, де механічні втрати перевищують значення 0,6.

## Висновки

Таким чином, за даними динамічних механічних властивостей двошарових поліуретанових композитів, сконструйованих шляхом склеювання окремих сформованих ПУ з різними  $T_c$ , що варіювалась залежно від їхніх хімічної природи та будови, проаналізовано залежність демпферної ефективності двошарових матеріалів від значення  $\Delta T_c$ . Виявлено, що у випадку  $\Delta T_c = 7$  °С для двошарового ПУ композиту спостерігається один релаксаційний перехід у результаті накладання релаксаційних максимумів з близькими значеннями  $T_c$ , і температурна область демпферної ефективності розширюється. За умов  $\Delta T_c = 23$  і 30 °С двошарові ПУ композити демонструють два максимума механічних втрат, але їхня інтенсивність нижча за  $\tan\delta_{\max}$  для вихідних ПУ.

Тому такі двошарові матеріали можуть проявляти демпферну ефективність у двох температурних областях за  $\tan\delta \geq 0,3$  і забезпечити появу додаткового температурного діапазону ефективного демпфування, але не бути ефективними для гасіння потужніших механічних коливань. Визначено, що при використанні поліуретанового клею для формування двошарових ПУ композитів важливе значення має будова структури кожного шару. Вміст органічного розчинника в клеї забезпечує

легше його проникнення в ПУ лінійної будови, що знижує  $T_c$  і впливає на діапазон температур ефективного демпфування. Отже, передбачається, що двошарова конструкція може бути застосована для вирішення конкретних проблем, пов'язаних із корегуванням або розширенням діапазону температур ефективного демпфування. Формування двошарових композитів забезпечує новий підхід для розробки демпферних матеріалів.

## REFERENCES

1. Jones David I.G. Handbook of Viscoelastic Vibration Damping, New York: Wiley Interscience, 2001: 410. ISBN 0 471 49248 5.
2. Nielson L.E. Mechanical Properties of Polymer and Composites, New York: Marcel Dekker Int., 1974: 255.
3. Ferri Dzh. Vyazkouprugiye svoystva polimerov. Moscow: IL, 1963: 552.
4. Colombini D. Maurer F. H. J. Origin of Additional Mechanical Transitions in Multicomponent Polymeric Materials. *Macromolecules*, 2002, **35**, no. 15: 5891–5902. <https://doi.org/10.1021/ma020266l>.
5. Varghese H, Johnson T, Bhagawan S.S., Joseph S., Thomas S., Groeninckx G. Dynamic mechanical behaviour of acrylonitrile butadiene rubber/poly(ethylene-co-vinyl acrylate) blends. *J. Polym. Sci., Part B: Polym. Phys.*, 2002, **40**, no. 15: 1556–1570. <https://doi.org/10.1002/polb.10204>.
6. Hourston D.J., Schafer F.-U. Polyurethane/Polystyrene One-shot Interpenetrating Polymer Networks with Good Damping Ability: Transition Broadening through Crosslinking, Internetwork Grafting and Compatibilization. In book: *IPNs Around the World: Science and Engineering*. S.C.Kim and L.H.Sperling (Ed.), John Wiley and Sons, 1997: 155–171.
7. Čulin J. Interpenetrating polymer network composites containing polyurethanes designed for vibration damping. *Polimery*, 2016, **61**, no. 3: 159–165. <https://dx.doi.org/10.14314/polimery.2016.159>.
8. Qu Ch., Li X., Yang Z., Zhang X., Wang T., Wang Q., Chen Sh. Damping, thermal, and mechanical performances of a novel semi-interpenetrating polymer networks based on polyimide/epoxy. *J. Appl. Polym. Sci.*, 2019, **136**, no. 41: 48032. <https://doi.org/10.1002/app.48032>.
9. Hourston D.J., Schafer F.-U. Polyurethane/polystyrene one-shot interpenetrating polymer networks with good damping ability: Transition broadening through crosslinking, internetwork grafting and compatibilization. *Polym. Adv. Techn.*, 1996, **7**, no. 4: 273–280. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1581\(199604\)7:4<273::AID-PAT520>3.0.CO;2-Q](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1581(199604)7:4<273::AID-PAT520>3.0.CO;2-Q).
10. Wang S.H. Zawadzki S., Akcelrud L. Morphology and Damping Behavior of Polyurethane/PMMA Simultaneous Interpenetrating Networks. *Materials Research*, 2001, **4**, no. 1: 27–33. <http://dx.doi.org/10.1590/S1516-14392001000100007>.
11. Babkina N.V., Lipatov Yu.S., Alekseeva T.T. Damping properties of composites based on interpenetrating polymer networks formed in the presence of compatibilizing additives. *Mechanics of Composite Materials*, 2006, **42**, no. 4: 385–392. <https://doi.org/10.1007/s11029-006-0048-x>.
12. Trakulsujarithchok T., Hourston D.J. Damping characteristics and mechanical properties of silica filled PUR/PEMA simultaneous interpenetrating polymer networks. *Europ. Polym. J.*, 2006, **42**, no. 11: 2968–2976. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2006.07.028>.
13. Das R., Kumar R., Kundu P. P. Vibration Damping Characterization of Linseed Oil-Based Elastomers for its Effectiveness to Attenuate Structural Vibration. *J. Appl. Polym. Sci.*, 2013, **130**, no. 5: 3611–3623. <https://doi.org/10.1002/app.39607>.
14. Ma C., Chen E., Sun T., Shi S., Fang Q. Preparation and characterization of tetrapod-shaped ZnO whisker filled polyurethane cross-linked epoxy/polyurethane damping composites. *J. of Reinforced Plastics and Composites*, 2012, **31**, no. 22: 1564–1575. <https://doi.org/10.1177/0731684412446856>.
15. Saba N., Jawaaid M., Alothman Othman Y., Paridah M.T. A review on dynamic mechanical properties of natural fibre reinforced polymer composites. *Construction and Building Materials*, 2016, **106**, no. 22: 149–159. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.075>.

16. Li Y., Cai S., Huang X. Multi-scaled enhancement of damping property for carbon fiber reinforced composites. *Compos. Sci. and Techn.*, 2017, **143**: 89–97. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2017.03.008>.
17. Ding X., Liu T., Fu B., Han J. Study on the damping properties of multy-layered gradient materials based on organic hybrids. *Appl. Mechanics and Materials*, 2012, **268–270**: 119–122. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.268-270.119>.
18. Askadskij A.A., Luchkina L.V., Nikiforova G.G., Kovriga O.V. Vibropogloshchayushchie gradientnye polimernye materialy. *Plast.massy (Ukr.)*, 2007, no. 4: 30–33.
19. Wang D., Zhang H., Guo J., Chehg B., Cao Y., Lu S., Zhao N., Xu J. Biomimetic Gradient Polymers with Enhanced Damping Capacities. *Macromol. Rapid. Commun*, 2016, **37**, no. 7: 655–661. <https://doi.org/10.1002/marc.201500637>.
20. Saunders Dzh.Kh., Frish K.K. *Khimiya poliuretanov*. M.: Khimiya, 1968: 470.
21. *Sonnenchein M.F. Polyurethanes: Science, technology, markets, and trends*, New York: John Wiley and Sons, 2014: 432.
22. Chen H., Zhou H.J., Liu D.J., Li Y.T. The Effect of Polyester Structures on the Damping Property of Polyurethane Elastomers. *Advanced Materials Research*, 2012, **581–582**: 710–714. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.581-582.710>.

Received 27.01.2021

*N.V. Babkina,*

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

*O.I. Antonenko,*

Institute of Macromolecular Chemistry NAS of Ukraine, 48, Kharkivske shose, Kyiv, 02160, Ukraine  
e-mail: antoks2870@gmail.com

*L.F. Kosyanchuk,*

Institute of Macromolecular Chemistry NAS of Ukraine, 48, Kharkivske shose, Kyiv, 02160, Ukraine  
e-mail: lkosyanchuk@ukr.net

*O.O. Brovko,*

Institute of Macromolecular Chemistry NAS of Ukraine, 48, Kharkivske shose, Kyiv, 02160, Ukraine  
e-mail: brovko@nas.gov.ua

#### DAMPING EFFICIENCY OF TWO-LAYER POLYURETHANE COMPOSITES

In this work, based on the results of dynamic mechanical studies, the damping efficiency of two-layer polyurethane (PU) composites designed by gluing two films of synthesized PU with different glass transition temperatures ( $T_g$ ) was estimated. The damping efficiency was estimated by the parameters of the mechanical losses ( $\tan\delta$ ) peak. To vary  $T_g$ , three types of PU with different chemical nature and structure were synthesized. The effect of an increase in the difference between the  $T_g$  of the initial PU ( $\Delta T_g$ ) on the damping efficiency of the two-layer PU composites formed from them is analyzed. The effective damping temperature range ( $\Delta T$ ) was estimated as the temperature range under conditions  $\tan\delta \geq 0,3$  and  $\tan\delta \geq 0,6$ . It was shown that at  $\Delta T_g = 7$  °C a two-layer PU composite has one relaxation maximum, and its temperature range of damping efficiency expands in comparison with  $\Delta T$  for individual PU. Under the conditions  $\Delta T_g = 23$  °C and  $\Delta T_g = 30$  °C, two-layer PU composites exhibit damping efficiency in two temperature regions at  $\tan\delta \geq 0,3$ , which provides an additional temperature range of effective damping. The essential role of the PU structure of each of the layers in the formation of a two-layer composite by gluing has been determined. Easier penetration of residues of the adhesive organic solvent into the surface of the PU film with a linear structure leads to plasticization of the corresponding layer in the composite and reduces  $T_g$ . It is shown that a two-layer structure can be used to solve specific problems related to the adjustment or broadening the effective damping temperature range.

*Keywords:* damping efficiency, polyurethane, two-layer polyurethane composites effective damping temperature range; dynamic mechanical analysis.