

А.В. Букетов, В.Д. Нігалатій, С.О. Сметанкін, Д.О. Зінченко
ВИКОРИСТАННЯ МОДИФІКАТОРА БЕНЗЕН-1,3-ДІАМІНУ ДЛЯ ПОЛІПШЕННЯ
ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЕПОКСИДНОГО КОМПЗИТУ

Досліджено вплив модифікатора бензен-1,3-діаміну на теплофізичні властивості епоксидного діанового олігомеру марки ЕД-20. У результаті аналізу отриманих даних встановлено оптимальну концентрацію модифікатора ($C_6H_8N_2$), що дозволило суттєво поліпшити теплофізичні властивості епоксикомпозитів. Встановлено, що для формування композитного матеріалу чи захисного покриття з підвищеними показниками теплофізичних властивостей необхідно у епоксидний зв'язувач вводити оптимальну кількість модифікатора – $q = 0,010...0,250$ мас.ч. на 100 мас.ч. смоли ЕД-20. У такому випадку формується композит зі значенням теплостійкості за Мартенсом – $T = 367$ К. Досліджено термічний коефіцієнт лінійного розширення матеріалів, які можливо використовувати у різних температурних діапазонах. На основі експериментальних досліджень теплофізичних властивостей з використанням сучасних методів дослідження (ДТА-, ТГА-аналіз) встановлені допустимі межі температури, при яких можливо використовувати модифіковані бензен-1,3-діаміном епоксидні композити.

Ключові слова: епоксидний композит, полімер, модифікатор, теплофізичні властивості, теплостійкість.

Рис. 4, табл. 4, літ. 10.

А.В. Букетов, В.Д. Нігалатій, С.А. Сметанкин, Д.А. Зинченко
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДИФИКАТОРА БЕНЗОЛ-1,3-ДИАМИНА ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ
ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЭПОКСИДНОГО КОМПЗИТА

Исследовано влияние модификатора бензол-1,3-диамина на теплофизические свойства эпоксидного дианового олигомера марки ЭД-20. В результате анализа полученных данных установлена оптимальная концентрация модификатора ($C_6H_8N_2$), что позволило существенно улучшить теплофизические свойства эпоксидных композитов. Установлено, что для формирования композитного материала или защитного покрытия с повышенными показателями теплофизических свойств необходимо в эпоксидное связующее вводить оптимальное количество модификатора – $q = 0,010...0,250$ масс.ч. на 100 масс.ч. смолы ЭД-20. В таком случае формируется композит со значением теплостойкости по Мартенсу – $T = 367$ К. Исследован термический коэффициент линейного расширения материалов, которые можно использовать в различных температурных диапазонах. На основе экспериментальных исследований теплофизических свойств с использованием современных методов исследования (ДТА-, ТГА-анализ) установлены допустимые пределы температуры, при которых возможно использовать модифицированные бензол-1,3-диамином эпоксидные композиты.

Ключевые слова: эпоксидный композит, полимер, модификатор, теплофизические свойства, теплостойкость.

A.V. Buketov, V.D. Nigalaty, S.O. Smetankin, D.O. Zinchenko
USING MODIFIER BENZENE-1,3-DIAMINE TO IMPROVE THE THERMAL PROPERTIES
OF THE EPOXY COMPOSITE

The effect of the modifier benzene-1,3-diamine in the thermal properties of the epoxy oligomer bisphenol brand ED-20. As a result of analysis of the data set the optimal concentration of the modifier ($C_6H_8N_2$), which significantly improve the thermal properties of epoxy composites. It was found that the formation of a composite material or a protective coating with enhanced thermal properties of the necessary epoxy binder to introduce the optimum amount of modifier – $q = 0,010... 0,250$ % of 100 % ED-20 resin. In this case, the composite is formed with the heat resistance value Martens – $T = 367$ K. The thermal coefficient of linear expansion of the materials that can be used in different temperature ranges. On the basis of experimental studies of thermal properties using modern research methods (DTA, TGA analysis) set the allowable temperature limits at which it is possible to use modified benzene-1,3-diamine epoxy composites.

Keywords: epoxy composite, polymer modifier, thermal properties, heat resistance.

Постановка проблеми. Розвиток науково-технічного прогресу вимагає створення нових матеріалів з підвищеним стандартом якості, поліпшеними експлуатаційними характеристиками і тривалим життєвим циклом. У зв'язку з цим в різних галузях промисловості все частіше використовують вироби на основі полімерних композитів, які є одними з найбільш ефективних і технологічних сучасних матеріалів. На сьогодні епоксидні композити широко застосовують у промисловості. Разом з тим, з огляду на те, що до композитних матеріалів (КМ) ставлять підвищені вимоги, виникає необхідність поліпшення їх експлуатаційних характеристик в цілому. Тому розробка і дослідження нових матеріалів з високими показниками експлуатаційних характеристик є актуальним завданням сучасного полімерного матеріалознавства [1-4]. Відомо, що створення нових матеріалів шляхом поєднання різних компонентів – економічніший процес, ніж синтезування нових полімерів. Отже, для підвищення механічних та теплофізичних характеристик таких конструкційних матеріалів, якими є композити, є перспективним їх

модифікація різними за хімічною природою сполуками, які є активними до між фазової взаємодії з епоксидним олігомером. Це дозволяє суттєво поліпшувати когезійні властивості матеріалів. Перспективним в цьому плані є використання модифікатора бензен-1,3-діаміну, який містить аміни та активні групи ($C_6H_8N_2$), здатні взаємодіяти з епоксидним зв'язувачем. Передбачали, що застосування даного модифікатора забезпечить поліпшення теплофізичних властивостей КМ.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Значний науковий і практичний досвід з розроблення і дослідження властивостей композитних матеріалів (КМ) на основі полімерних зв'язувачів висвітлено у працях авторів [1-5]. Аналіз наведених вище праць дозволяє стверджувати, що одним із шляхів підвищення експлуатаційних характеристик епоксидних композитів є модифікування матриці енергетичними полями, органічними і неорганічними хімічними компонентами (модифікаторами, пластифікаторами), що дозволить поліпшити як їх когезійні, так і теплофізичні властивості [6, 7]. При цьому значної уваги приділяють дослідження структурних процесів при нагріванні КМ, що дозволяє оцінити температурний діапазон використання нових матеріалів [1-10]

Мета роботи – дослідити вплив модифікатора бензен-1,3-діаміну на структурні процеси у епоксидних композитах в умовах впливу теплового поля.

Матеріали та методика дослідження. Як основний компонент для зв'язувача при формуванні КМ вибрано епоксидний діановий олігомер марки ЕД-20 (ГОСТ 10587-84).

Для зшивання епоксидних композицій використано низькомолекулярний твердник поліетиленполіамін $[-CH_2-CH_2-NH-]_n$ (ТУ 6-05-241-202-78), що дозволяє затверджувати матеріали при кімнатних температурах. Зшивали КМ, вводячи твердник поліетиленполіамін (ПЕПА) у композицію при стехіометричному співвідношенні компонентів за вмісту (мас.ч.) – ЕД-20 : ПЕПА – 100 : 10.

Як наповнювач для експериментальних досліджень використано модифікатор бензен-1,3-діамін. Елементарний склад модифікатора наступний, %: вуглець – 66,64; водень – 7,46; азот – 25,90.

Епоксидні КМ формували за технологією, наведеною у праці [7].

У роботі досліджували теплофізичні властивості КМ, а саме: теплостійкість (за Мартенсом), термічний коефіцієнт лінійного розширення, термостійкість (ДТА і ТГА-аналіз).

Теплостійкість (за Мартенсом) КМ визначали згідно з ГОСТ 21341-75. Методика дослідження полягає у визначенні температури, при якій досліджуваній зразок нагрівали зі швидкістю $v = 3$ К/хв під дією постійного згинаючого навантаження $F = 5 \pm 0,5$ МПа, внаслідок чого він деформується на задану величину ($h = 6$ мм).

Термічний коефіцієнт лінійного розширення (ТКЛР) матеріалів розраховували за кривою залежності відносної деформації від температури, апроксимуючи цю залежність експоненціальною функцією. Відносну деформацію визначали за зміною довжини зразка при підвищенні температури у стаціонарних умовах (ГОСТ 15173-70). Розміри зразків для дослідження: $65 \times 7 \times 7$ мм, непаралельність шліфованих торців складала не більше 0,02 мм. Перед дослідженням вимірювали довжину зразка з точністю $\pm 0,01$ мм. Швидкість підняття температури становила $v = 2$ К/хв.

Відхилення значень при дослідженнях показників теплофізичних властивостей КМ (теплостійкість (за Мартенсом), ТКЛР) становило 4...6 % від номінального.

Для дослідження впливу кількості наповнювача на термічні перетворення у композитах застосовували метод термогравіметричного (ТГА) і диференціально-термічного (ДТА) аналізу, використовуючи дериватограф «Thermoscan-2». Дослідження проводили у температурному діапазоні $\Delta T = 298...873$ К, використовуючи кварцові тиглі для зразків з об'ємом $V = 0,5$ см³. Під час дослідження швидкість підняття температури становила $v = 5$ К/хв, при цьому як еталонну речовину використовували Al_2O_3 ($m = 0,5$ г), наважка досліджуваного зразка становила – $m = 0,3$ г. Похибка визначення температури становила $\Delta T = \pm 1$ К. Точність визначення теплових ефектів – 3 Дж/г. Точність визначення зміни маси зразка – $\Delta m = 0,02$ г.

Результати досліджень та їх обговорення. З наукової і практичної точки зору значної уваги необхідно приділяти динаміці властивостей КМ, які працюють у різних діапазонах підвищених температур. Тому, на початковому етапі досліджували теплостійкість (за Мартенсом) КМ, наповнених модифікатором бензен-1,3-діаміну ($C_6H_8N_2$), у температурному діапазоні $\Delta T = 273...423$ К. При цьому вміст модифікатора змінювали у межах $q = 0,10...2,00$ мас.ч.

Встановлено [5-7], що теплостійкість модифікованої ультразвуком епоксидної матриці становить $T = 341$ К (рис.1). Введення модифікатора бензен-1,3-діаміну за вмісту

$q = 0,10 \dots 0,25$ мас.ч. приводить до значного підвищення теплостійкості КМ відносно матриці, формуючи перший максимум, який становить $T = 367$ К. Це свідчить про фізико-хімічну взаємодію амінних груп модифікатора з макромолекулами та сегментами епоксидного зв'язувача. Вважали, що саме це приводить до рівномірного процесу полімеризації КМ (у діапазоні температур $\Delta T = 273 \dots 393$ К), внаслідок чого формується і надалі збільшується густина просторової сітки полімеру. У результаті цього підвищується когезійна міцність, а, відповідно, й теплостійкість модифікованої матриці. Отриманий результат добре узгоджується з динамікою фізико-механічних властивостей, де за вмісту у КМ модифікатора бензен-1,3-діаміну у кількості $q = 0,25$ мас. ч. виявлено наступні результати: руйнівні напруження при згинанні – $\sigma_{32} = 58$ МПа, модуль пружності при згинанні – $E = 3,4$ ГПа, ударна в'язкість – $W = 11$ кДж/м². При подальшому введенні модифікатора бензен-1,3-діаміну у кількості $q = 0,50 \dots 1,00$ мас.ч. спостерігали монотонне зменшення показників теплостійкості, мінімум ($T = 360$ К) яких спостерігали за вмісту часток $q = 1,00$ мас.ч. Проте, наповнення матеріалу модифікатором бензен-1,3-діаміну у кількості $q = 1,25 \dots 1,75$ мас.ч. приводить до підвищення теплостійкості КМ до $T = 363 \dots 370$ К. Другий максимум на кривій залежності $T-q$ було виявлено за вмісту модифікатора у кількості $q = 2,00$ мас.ч., в результаті чого формується КМ з максимальними показниками теплостійкості ($T = 377$ К).

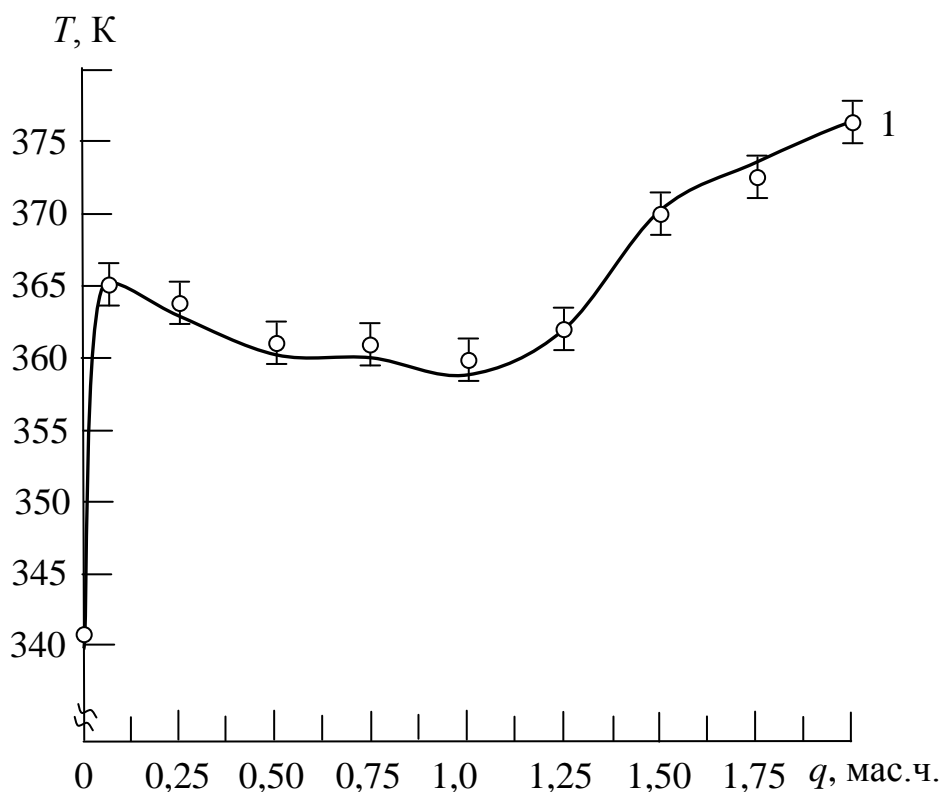
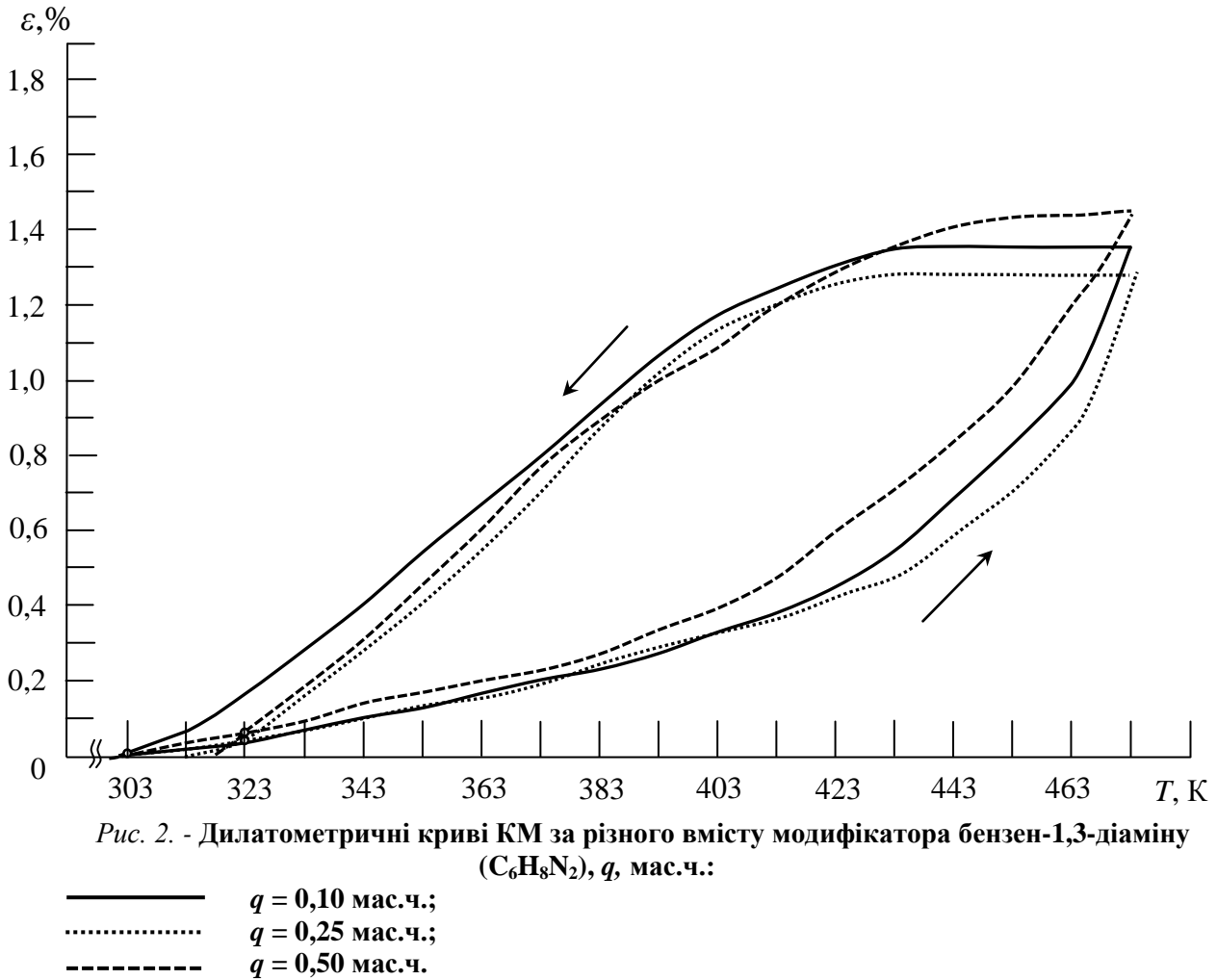


Рис. 1. - Залежність теплостійкості КМ (за Мартенсом) (T) від вмісту (q , мас.ч.) модифікатора бензен-1,3-діаміну ($C_6H_8N_2$).

На основі дилатометричних кривих, що ілюструють залежність відносної деформації від температури (рис. 2) розраховали ТКЛР КМ у різних діапазонах температур. Результати розрахунку ТКЛР композитів за різних температурних інтервалів дослідження наведено у табл. 1.

Експериментально встановлено (табл. 1), що зі зростанням температури ТКЛР епоксикомпозитних матеріалів збільшується. Дослідження поведінки КМ у області лінійного розширення при $\Delta T = 303 \dots 323$ К дозволяє стверджувати, що найменшим значенням ТКЛР характеризуються матеріали із вмістом модифікатора бензен-1,3-діаміну у кількості $q = 0,10$ мас.ч. та $q = 0,25$ мас.ч. При цьому значення ТКЛР знаходяться у межах $\alpha = (2,2 \dots 2,9) \times 10^{-5} K^{-1}$. Особливої уваги заслуговує дослідження ТКЛР матеріалів у діапазоні температур $\Delta T = 303 \dots 373$ К (табл. 1). Доведено, що найменшим термічним коефіцієнтом лінійного розширення у наведеній вище температурній області дослідження відзначається модифіковані матриці за вмісту добавки $q = 0,10$ мас.ч. та $q = 0,25$ мас.ч. Їхній ТКЛР становить $\alpha = (2,7 \dots 2,8) \times 10^{-5} K^{-1}$. Слід зазначити, що

у областях лінійного розширення $\Delta T = 303 \dots 423$ і $\Delta T = 303 \dots 473$ К також найменші значення ТКЛР, які становлять $\alpha = (3,5 \dots 7,8) \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$, характерні для КМ із вмістом модифікатора у кількості $q = 0,10$ мас.ч. та $q = 0,25$ мас.ч. (табл. 1).



Таблиця 1

Термічний коефіцієнт лінійного розширення (ТКЛР) КМ за різних температурних діапазонів випробувань

№	Вміст наповнювача, q , мас.ч.	Термічний коефіцієнт лінійного розширення, $\alpha \times 10^{-5}, \text{K}^{-1}$			
		Температурні діапазони випробування, ΔT , К			
		303...323	303...373	303...423	303...473
1	матриця	6,3	6,8	9,9	10,9
2	0,10	2,2	2,8	3,8	7,8
3	0,25	2,9	2,7	3,5	7,6
4	0,50	3,3	3,4	5,2	8,4
5	1,00	3,8	3,2	4,3	9,0
6	1,50	3,3	3,7	4,7	8,9
7	2,00	3,4	3,3	3,9	9,3

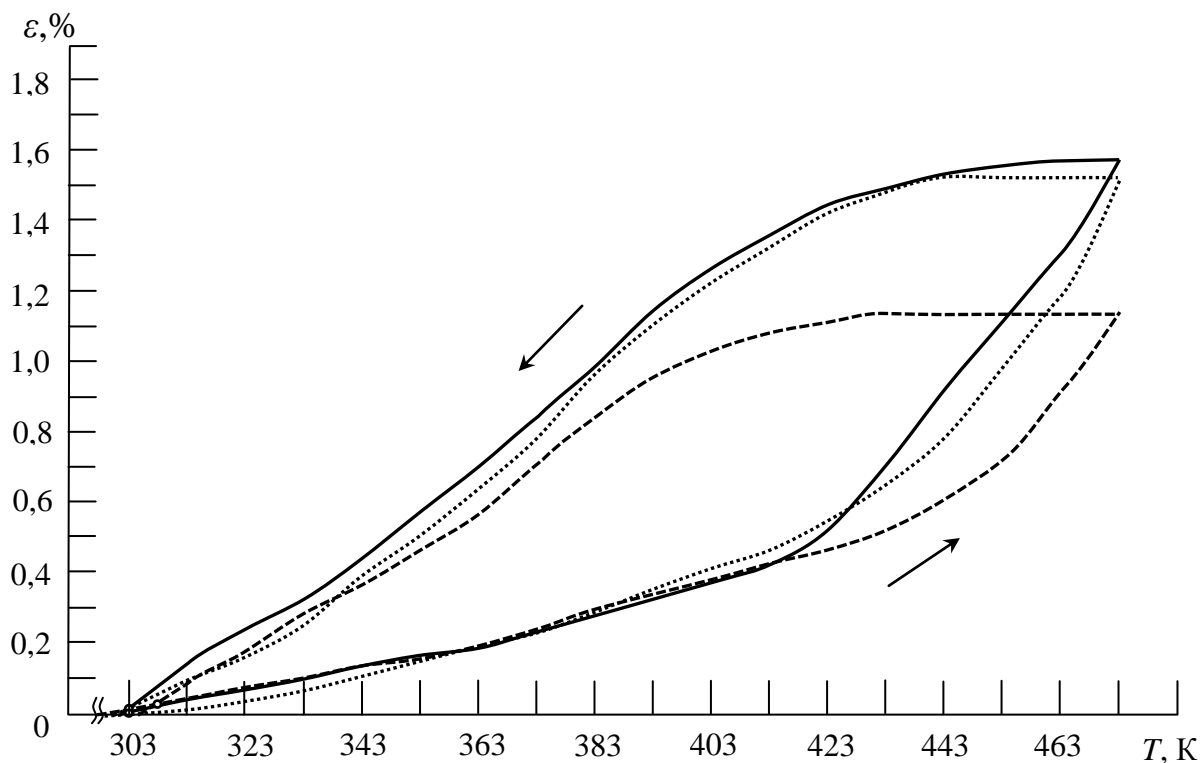


Рис. 3. - Дилатометричні криві КМ за різного вмісту модифікатора бензен-1,3-діаміну ($C_6H_8N_2$), q , мас.ч.:

- $q = 1,00$ мас.ч.;
 $q = 1,50$ мас.ч.;
 - - - - - $q = 2,00$ мас.ч.

З наведеного вище можна стверджувати, що найкращими показниками ТКЛР у досліджуваних теплових діапазонах відзначається КМ із вмістом модифікатора бензен-1,3-діаміну у кількості $q = 0,25$ мас.ч. Можна припустити, що у такому матеріалі за оптимального вмісту добавки відбувається активізація фізико-хімічних процесів взаємодії модифікатора зі зв'язувачем, яка приводить до ущільнення просторової сітки полімеру. Останній, у свою чергу, відзначається здатністю чинити опір деформуванню (лінійному чи об'ємному) при впливі температурного фактору (за максимального значення температури – $\Delta T = 303 \dots 473$ К). Крім того, на основі наведених вище результатів випробувань теплостійкості і ТКЛР композитів можна констатувати про їх добру узгодженість, що свідчить про достовірність проведених досліджень.

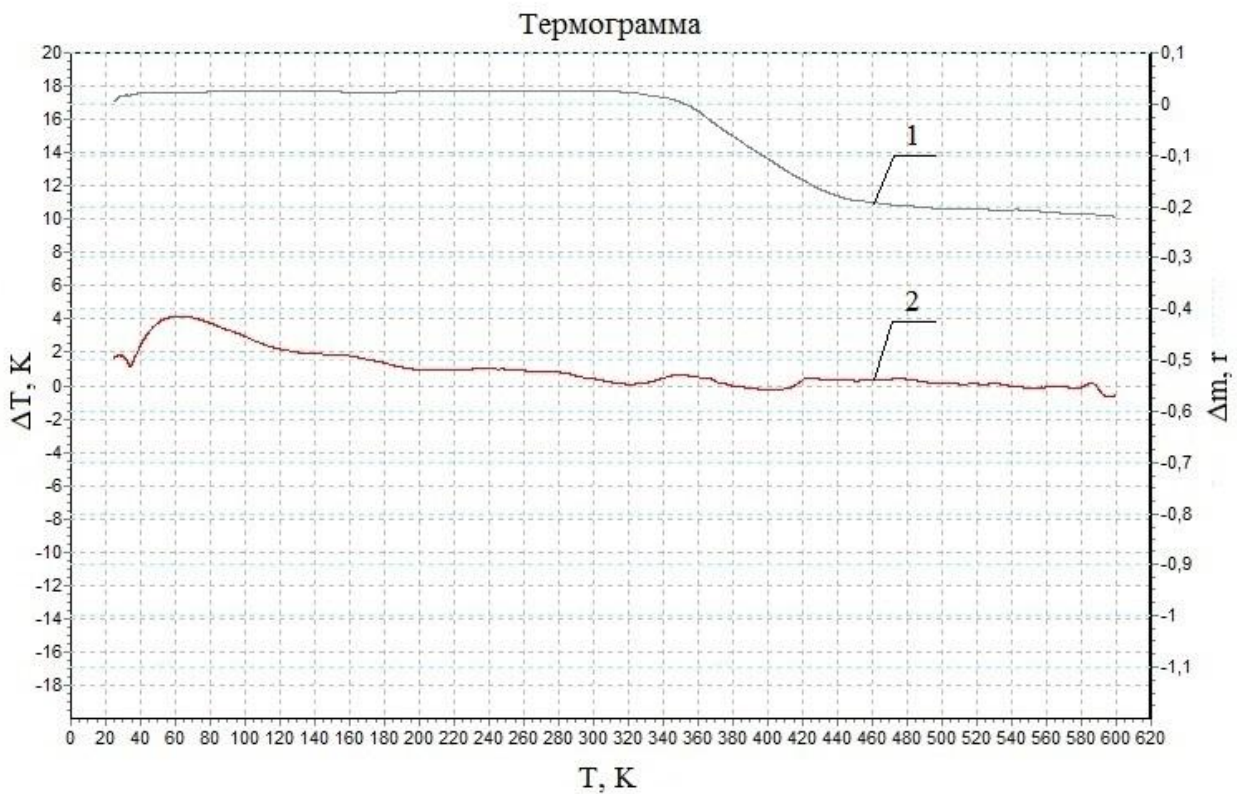
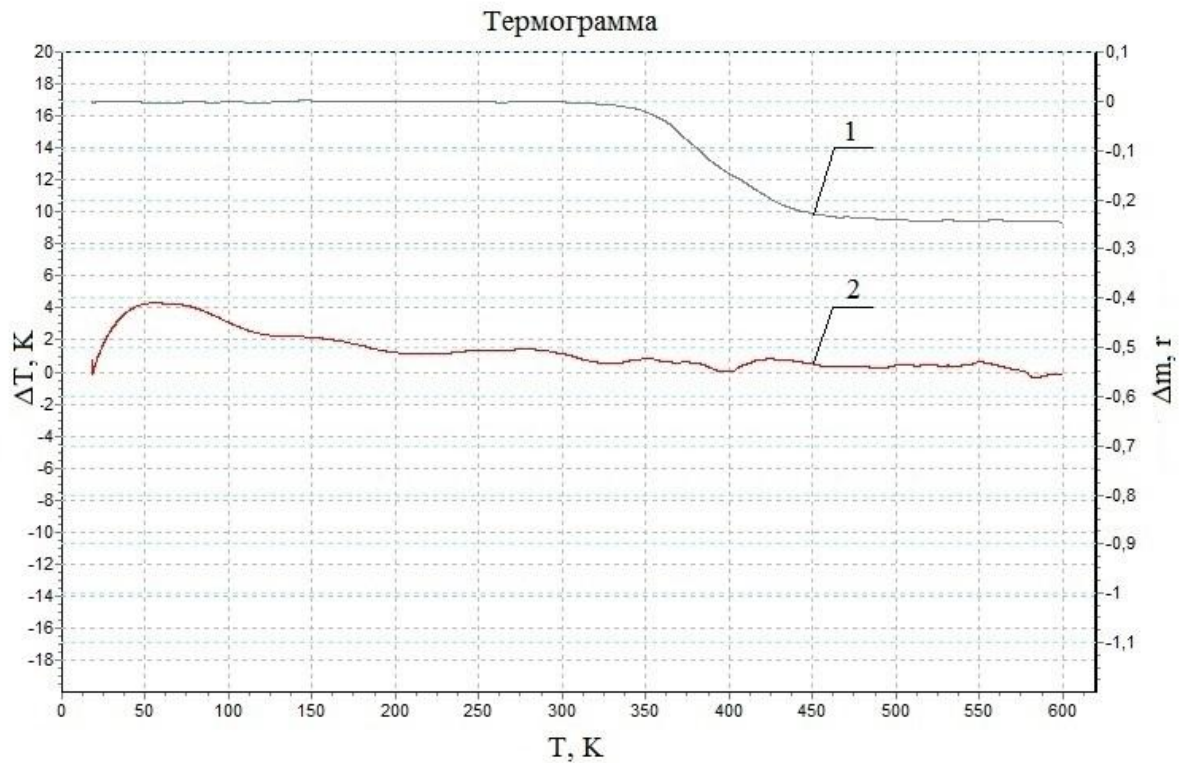
При аналізі дилатометричних кривих (рис. 2, рис. 3) додатково встановлено, що під час нагрівання і подальшого охолодження відбувається усадка матеріалів, значення якої наведено у табл. 2. Як видно із табл. 2, усадка КМ не перевищувала 2 %, а у деяких випадках вона взагалі становила $\delta = 0,002 \dots 0,003$ %. Це свідчить про суттєвий вплив модифікатора на теплофізичні властивості матриці. Отримані результати дозволяють констатувати про необхідність використання КМ у вигляді покриттів на довговимірних поверхнях складного профілю, які працюють у різних діапазонах підвищених температур.

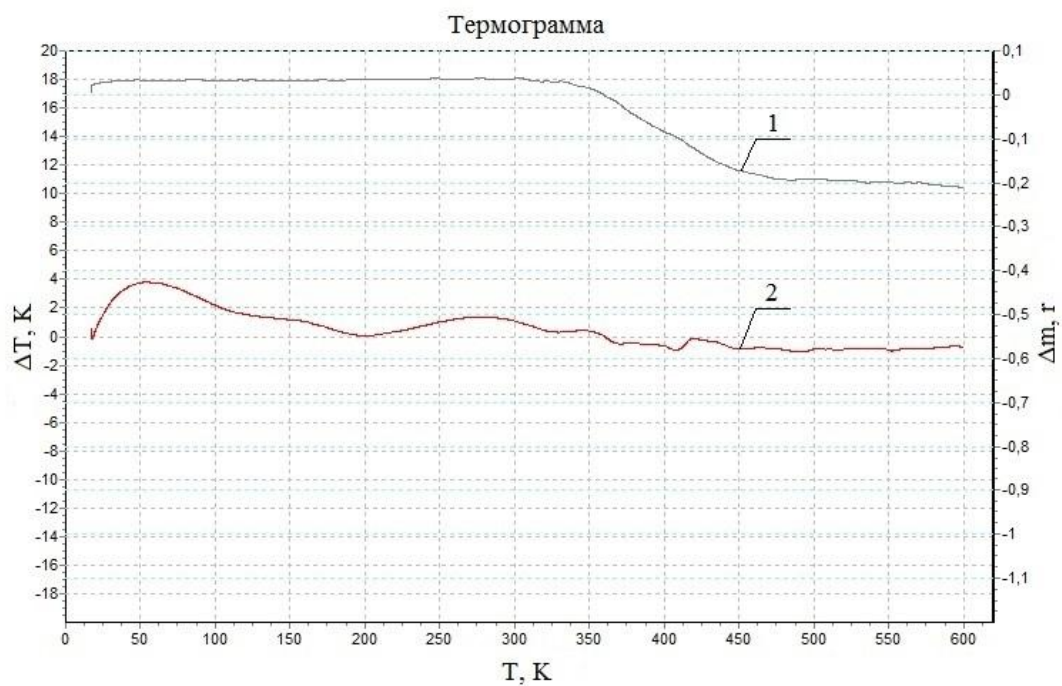
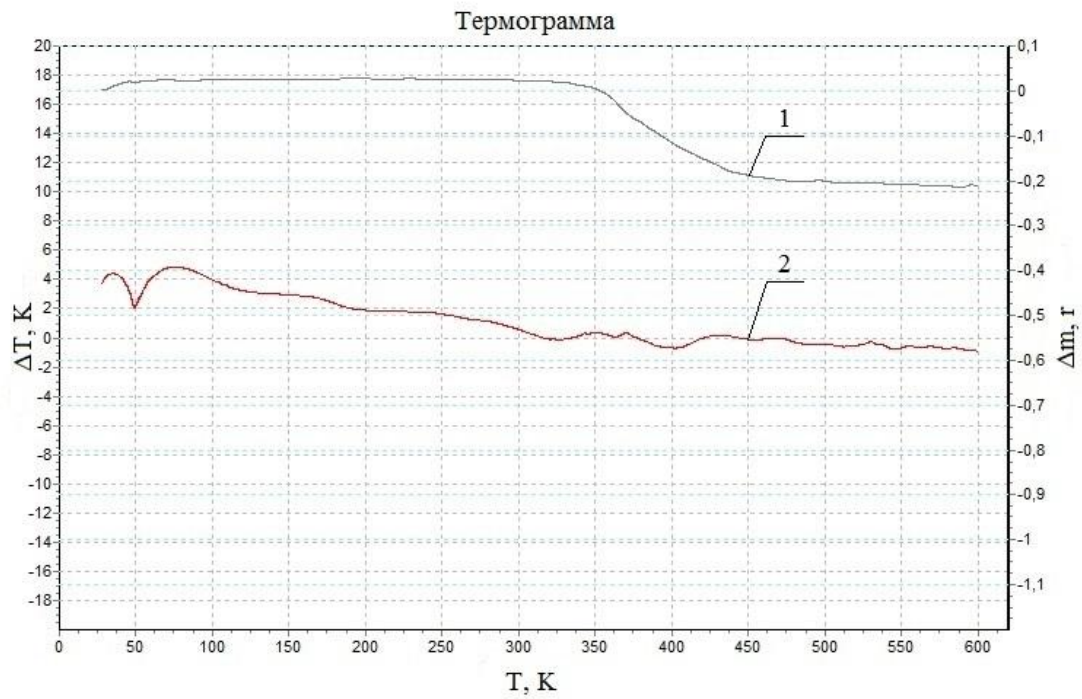
Таблиця 2

Значення усадки КМ

Характеристика	Вміст модифікатора бензен-1,3-діаміну ($C_6H_8N_2$), q , мас.ч.						
	матриця	0,10	0,25	0,50	0,100	1,50	2,00
Усадка, δ , %	0,320	0,040	0,140	0,150	0,021	0,003	0,002

У роботі додатково досліджували і аналізували поведінку епоксидних композитів за підвищених температур (термостійкість) методом термогравіметричного (ТГА) та диференціально-термічного (ДТА) аналізу (рис. 4). Аналіз проводили у середовищі повітря. При дослідженні процесу руйнування зв'язків у модифікованій матриці обрано швидкість підняття температури зразків $\nu = 10 \text{ K/хв}$.





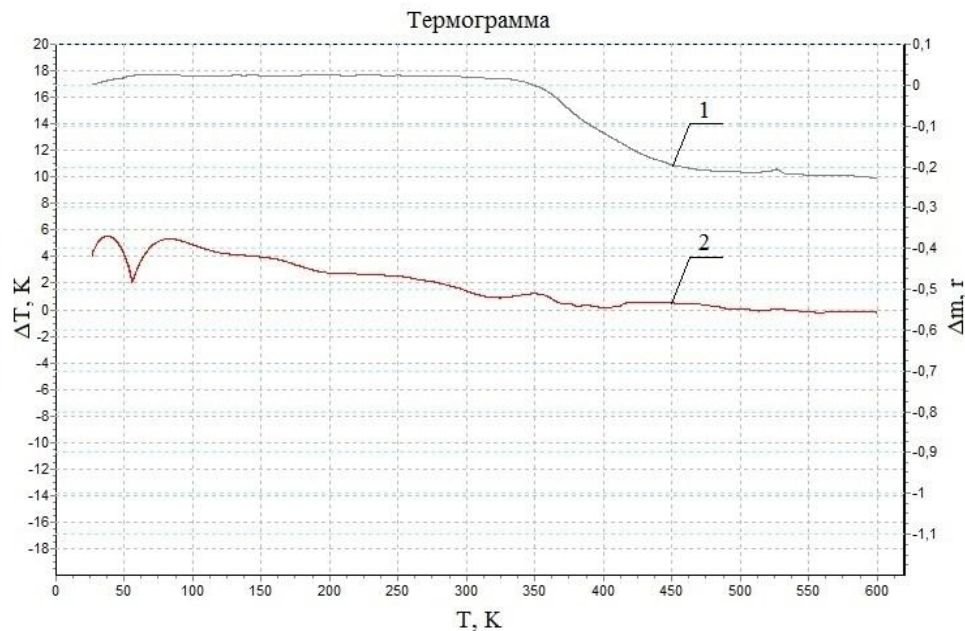
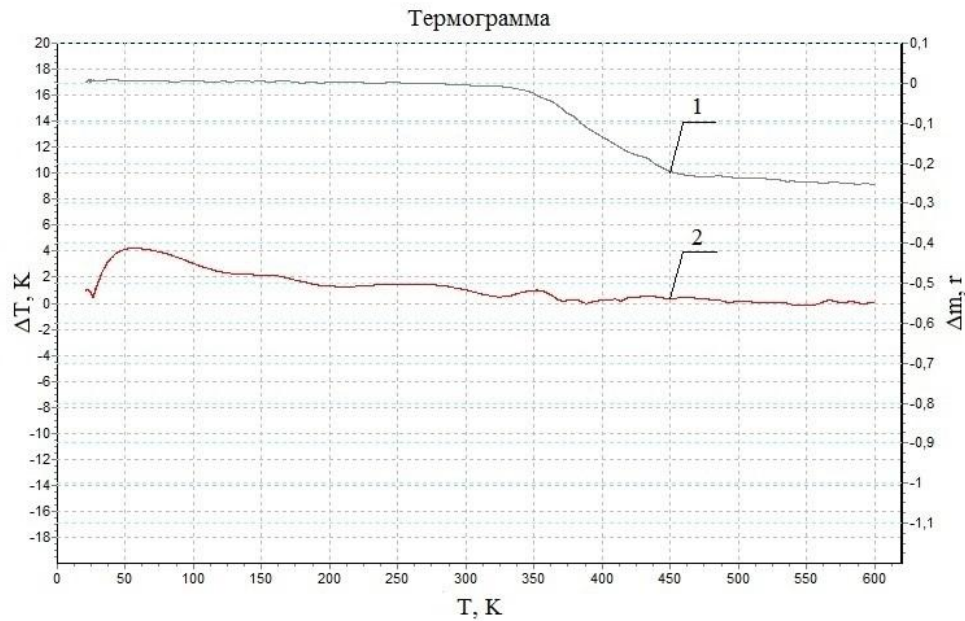


Рис. 4. - Результати термогравіметричного (1) і диференціально-термічного (2) аналізу для КМ із вмістом модифікатора бензен-1,3-діаміну ($C_6H_8N_2$): а) 0,10 мас.ч.; б) 0,25 мас.ч.; в) 0,50 мас.ч.; г) 1,00 мас.ч.; д) 1,50 мас.ч; е) 2,00 мас.ч.

На основі експериментальних досліджень встановлено відсутність втрати маси (рис. 4, табл. 3) для досліджуваних КМ у температурній області $\Delta T = 303,0 \dots 598,3$ К. Це вказує на відсутність суттєвих структурних перетворень при нагріванні у КМ та опосередковано свідчить про незначний вміст води у досліджуваних зразках. Слід підкреслити, що початковому етапі нагрівання зразків (від $T = 303,0$ до $T_0 = 598 \dots 605$ К) не спостерігали деструкції матеріалів. Відомо [10], що на основі кривої ТГА за рахунок втрати маси зразків відносно еталону можна визначити температуру, при якій відбувається початок деструкції. При дослідженні КМ, модифікованих бензен-1,3-діаміном, початок деструкції встановлено при $T_0 = 598,6 \dots 608,5$ К, а закінчення процесу – при $T_k = 736,6 \dots 754,3$ К. Відносна втрата маси для усіх зразків КМ складає $\varepsilon_m = 73,0 \dots 76,6$ % (табл. 3). На основі експериментальних даних встановлено, що найменшим значенням температури початку деструкції ($T_0 = 598,6$ К) характеризується КМ із вмістом модифікатора бензен-1,3-діаміну у кількості $q = 0,25$ мас.ч., який до того ж має найменшу

відносну втрату маси ($\epsilon_m = 73,0\%$). Вважали, що це свідчить про утворення щільної просторової сітки полімеру, яка зменшує інтенсивність рухливості основного ланцюга, макромолекул і сегментів модифікатора та епоксидного зв'язувача, за рахунок чого відбувається руйнування меншої кількості зв'язків.

Таблиця 3

Термостійкість КМ, наповненого модифікатором бензен-1,3-діаміном ($C_6H_8N_2$)

Вміст наповнювача, q , мас.ч.	T_0 , К	T_5 , К	T_{10} , К	T_{20} , К	T_k , К	ϵ_m , %
0,10	598,6	621,2	632,3	643,3	736,7	76,6
0,25	598,6	620,9	630,7	642,0	744,4	73,0
0,50	601,3	623,5	631,9	640,2	747,5	73,3
1,00	608,6	624,1	633,0	646,4	750,2	74,0
1,50	601,5	621,5	629,6	645,8	743,3	75,0
2,00	605,6	622,6	632,2	643,0	754,0	75,0

Примітка: T_0 – початкова температура втрати маси (початок деструкції); T_5 , T_{10} , T_{20} – температури втрати маси (5 %, 10 %, 20 %); T_k – кінцева температура втрати маси (завершення деструкції); ϵ_m – відносна втрата маси.

За допомогою кривих ДТА додатково встановлено екзотермічні ефекти при нагріванні КМ у діапазоні температур $\Delta T = 453,3 \dots 673,6$ К (табл. 4). При цьому, одним із найважливіших параметрів є максимальне значення екзоэффекту. Слід зауважити, що зміщення піка екзотермічного ефекту у область високих температур передбачає збільшення термостабільності матеріалу в умовах впливу теплового поля. Це, у свою чергу, зумовлено стійкістю фізико-хімічних зв'язків у КМ, що передбачає поліпшені когезійні властивості матеріалів в умовах впливу теплового поля. Встановлено, що максимальне значення екзоэффекту, яке становить $T_{max} = 643,0$ К, характерне для КМ, наповненого бензен-1,3-діаміном у кількості $q = 0,50$ мас.ч. Слід зауважити що, отриманий результат не зовсім узгоджується з результатами випробувань фізико-механічних та теплофізичних властивостей КМ. На основі аналізу температур початку і закінчення екзоэффекту T_n і T_k (табл. 4) встановлено наступне: найкращі результати показників початкової температури екзоэффекту ($T_n = 600,1$ К та $599,2$ К) характерні для зразків із модифікатором у кількості $q = 0,10$ мас.ч. та $q = 1,00$ мас.ч. Кінцева температура екзоэффекту для даних КМ становить $T_k = 669,0$ й $T_k = 644,1$ К відповідно. Однак, слід звернути увагу на результати дослідження КМ із вмістом модифікатора у кількості $q = 0,25$ мас.ч. Для такого матеріалу початкова температура екзоэффекту, порівняно з КМ, що містить модифікатор у кількості $q = 1,00$ мас.ч., є меншою на $\Delta T_n = 4,9$ К. Однак, більша кінцева температура екзоэффекту (на $\Delta T_k = 25,3$ К) та максимальне значення екзоэффекту (на $\Delta T_{max} = 4,3$ К). Відповідно, можна стверджувати про кращі теплофізичні властивості у комплексі даного композиту, порівняно з КМ, які містить модифікатор у кількості $q = 1,00$ мас.ч. Отже, за допомогою комплексної оцінки T_n і T_k (табл. 4), можна стверджувати, що КМ, який містить модифікатор бензен-1,3-діамін у кількості $q = 0,10$ мас.ч. та $q = 0,25$ мас.ч., характеризується найкращими теплофізичними властивостями серед усього діапазону досліджених матеріалів.

Таблиця 4

Температурні інтервали екзоэффектів композитів згідно ДТА

Вміст наповнювача, q , мас.ч.	Температурні інтервали екзоэффектів				Максимальне значення екзоэффектів, T_{max} , К
	T_n , К	T_k , К	ΔT_1 , К	ΔT_2 , К	
матриця	460,0	659,0	199,0	3,05	518,0
0,10	600,1	669,0	68,9	0,86	623,6
0,25	594,3	669,4	75,1	0,93	623,3
0,50	596,6	674,2	77,6	1,04	643,0
1,00	599,2	644,1	44,9	0,97	619,0
1,50	595,8	644,3	48,5	0,81	626,4
2,00	597,2	643,7	46,5	0,75	621,9

Примітка: T_n – початкова температура екзофекту; T_k – кінцева температура екзофекту; ΔT_1 – температурний інтервал екзофекту; ΔT_2 – різниця температур між зразком, у якому відбуваються перетворення, і еталоном, у якому перетворень немає.

Висновки. На основі експериментальних досліджень теплофізичних властивостей з використанням сучасних методів дослідження (ДТА-, ТГА-аналіз) встановлені допустимі межі температури, при яких можливо використовувати модифіковані бензен-1,3-діаміном епоксидні композити. А саме:

1. Для формування композитного матеріалу чи захисного покриття з поліпшеними теплофізичними властивостями у епоксидний зв'язувач доцільно вводити модифікатор у кількості $q = 0,010 \dots 0,25$ мас.ч. У результаті формується матеріал, який, окрім поліпшених фізико-механічних властивостей, відзначається теплостійкістю (за Мартенсом) – $T = 367$ К. У свою чергу, для формування композитного матеріалу чи захисного покриття, що відзначається лише підвищеними показниками теплофізичних властивостей, у епоксидний зв'язувач слід вводити модифікатор за вмісту $q = 2,00$ мас.ч., теплостійкість (за Мартенсом) якого становить $T = 377$ К.

2. Досліджено поведінку розроблених композитів під впливом теплового поля. Експериментально встановлено, що за максимального діапазону температур $\Delta T = 303 \dots 473$ К доцільно використовувати композити із вмістом модифікатора бензен-1,3-діаміну у кількості $q = 0,10 \dots 0,25$ мас.ч. Такі матеріали характеризуються найменшим значенням термічного коефіцієнту лінійного розширення, який становить $\alpha = (7,6 \dots 7,8) \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$.

3. Методом термогравіметричного та диференціально-термічного аналізу досліджено термостійкість розроблених композитів. Встановлено, що відносна втрата маси для усіх зразків модифікованої матриці у діапазоні температур $\Delta T = 598,3 \dots 754$ К складає $\varepsilon_m = 73,0 \dots 76,6$ %. Максимальне значення екзофекту становить $T_{max} = 643,0$ К для композиту, наповненого модифікатором бензен-1,3-діаміном у кількості $q = 0,50$ мас.ч. Однак, за допомогою комплексної оцінки T_n і T_k було обрано оптимальний діапазон вмісту модифікатора у епоксидній матриці – $q = 0,10 \dots 0,25$ мас.ч. Такий матеріал відзначається наступними показниками термостійкості: початкова температура екзофекту – $T_n = 594,3 \dots 600,1$ К; кінцева температура – $T_k = 669,0 \dots 669,4$ К, а максимальне значення екзофекту – $T_{max} = 623,3 \dots 623,6$ К.

Література

1. Kinloch A.J. Thermoplastic-toughened epoxy polymers / A.J. Kinloch, M.L. Yuen, S.D. Jenkins // Journal of Materials Science, vol. 29. – 1994. – P. 3781- 3790
2. Brooker R.D. The morphology and fracture properties of thermoplastic-toughened epoxy polymers / R.D. Brooker, A.J. Kinloch, A.C. Taylor // Journal of Adhesion, vol. 86. – 2010. – P. 726-741.
3. Privalko V.P., Gorodilov B.Ya., Baibak V.V., Privalko E.G. at all // Kompositi. Polim. Mater.- 2001.- 23, '1.- P. 61-68.
4. Prabhu T. N. Thermal Degradation of HDPE Short Fibers Reinforced Epoxy Composites / T. N. Prabhu, T. Demappa, V. Harish // OSR Journal of Applied Chemistry (IOSRJAC).- 2012.- 1 (1). – P. 39-44.
5. Jung-il K. Positive temperature coefficient behavior of polymer composites having a high melting temperature / K. Jung-il, P.H. Kang, Y.C. Nho // J. Appl. Poly Sci., 92.- 2004.- P. 394-401.
6. Букетов А.В. Исследование влияния 1,4-бис(N,N диметилдифокарбамато)бензена на механические свойства эпоксидной матрицы / А.В. Букетов, А.А. Сапронов, В.Н. Яцюк, Б.Д. Гришук, В.С. Барановський // Пластические массы. – 2014. – № 3-4. – С. 26–34.
7. Букетов А.В. Исследование влияния модификатора 4,4'-метиленбис (4,1-фенилен)бис(N,N-диетилдифокарбамату) на структуру и свойства эпоксидной матрицы / А.В. Букетов, А.А. Сапронов, В.Н. Яцюк, В.О. Скирденко // Пластические массы. – 2014. – № 7-8. – С. 9-16.
8. Galstian I.Ye. Electrical and thermoelectric properties of the composite polytetrafluoroethylene –multi-walled carbon nanotubes / I.Ye. Galstian, G.Yu. Mykhailova, Yu.F. Bozbej, M.M. Nishchenko // international research and practice conference [Nanotechnology and nanomaterials (Nano-2015)], (Lviv 26-29 august 2015) – Lviv: Eurosvit, 2015. – P. 62.
9. Buketov A.V. Investigation of the Physico-Mechanical and Thermophysical Properties of Epoxy Composites with a Two-Component Bidisperse Filler / A.V. Buketov, O.O. Saproinov, M.V. Brailo // Strength of Materials.-Vol. 46, No 5. - 2014.- P.717-721.
10. Buketov A.V. Epoxy nanocomposites: monograph / A.V. Buketov, O.O. Saproinov, V.L. Aleksenko. – Kherson : KSMa, 2015. – 184 p.

Стаття надійшла до редакції 10.09.2016