

ІНЖЕНЕРНІ НАУКИ

УДК 667.64:678.026

М.В. БРАЙЛО, О.С.КОБЕЛЬНИК, С.В. ЯКУЩЕНКО

Херсонська державна морська академія

Д.П. СТУХЛЯК

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

В.В. РАЧИНСЬКИЙ

Херсонський національний технічний університет

**ТЕПЛОФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ЕПОКСИДНИХ КОМПОЗИТІВ,
НАПОВНЕНИХ СУМІШАМИ НАНОДИСПЕРСНИХ СПОЛУК**

Проаналізовано, що актуальним на сьогодні для формування захисних покриттів з полішеними властивостями є використання полімерних матеріалів на основі реактопластів. Аргументовано, що ефективним у даному напрямку є використання модифікованих епоксикомпозитних полімерних матеріалів. Встановлено, що полішення властивостей епоксикомпозитів відбувається шляхом додавання до їх складу нанодобавок. У роботі для експериментальних досліджень використано, як нанодисперсний наповнювач порошки, які є сумішшю нанодисперсних сполук і характеризуються різним хімічним складом та розміром часток. За результатами проведеної роботи доведено, що при додаванні часток у вигляді суміші нанодисперсних сполук змінюються показники теплофізичних властивостей композитів на епоксидній основі. Досліджено теплостійкість (за Мартенсом), термічний коефіцієнт лінійного розширення, температуру склування і усадку композитів на основі модифікованої епоксидної матриці.

Експериментально доведено, що для формування композитного матеріалу чи захисного покриття з полішеними теплофізичними властивостями у модифікований епоксидний зв'язувач доцільно вводити нанодисперсний наповнювач у кількості $q = 0,5 \dots 1,0$ мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру ЕД-20. У результаті формується матеріал, який, окрім полішених фізико-механічних властивостей, відзначається теплостійкістю (за Мартенсом) – $T = 368 \dots 370$ К. Додатково доведено, що усадка модифікованих матриць не перевищувала 1%. Також досліджено поведінку розроблених композитів під впливом теплового поля. Експериментально встановлено, що за діапазону температур $\Delta T = 303 \dots 473$ К доцільно використовувати розроблений епоксикомпозитний матеріал з полішеними теплофізичними властивостями, із вмістом наночасток за критичного вмісту, для захисту поверхонь деталей та механізмів при впливі теплового поля.

Ключові слова: епоксидний олігомер, матриця, нанонаповнювач, теплостійкість, композити.

Н.В. БРАЙЛО, О.С.КОБЕЛЬНИК, С.В. ЯКУЩЕНКО

Херсонская государственная морская академия

Д.П. СТУХЛЯК

Тернопольский национальный технический университет им. Ивана Пулюя

В.В. РАЧИНСКИЙ

Херсонский национальный технический университет

**ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭПОКСИДНЫХ КОМПОЗИТОВ,
НАПОЛНЕННЫХ СМЕСЯМИ НАНОДИСПЕРСНЫХ СОЕДИНЕНИЙ**

Проанализировано, что актуальным на сегодня для формирования защитных покрытий с улучшенными свойствами является использование полимерных материалов на основе реактопластов. Аргументировано, что эффективным в данном направлении является использование модифицированных епоксикомпозитных полимерных материалов. Установлено, что улучшение свойств епоксикомпозитов происходит путем добавления в их состав нанодобавок. В работе для экспериментальных исследований использованы, как нанодисперсный наполнитель порошки, которые являются смесью нанодисперсных соединений и характеризуются различным химическим составом и размером частиц. По результатам проведенной работы доказано, что при добавлении частиц в виде смеси нанодисперсных соединений изменяются показатели теплофизических свойств композитов на эпоксидной основе. Исследована теплостойкость (по Мартенсу), термический коэффициент линейного расширения, температуру стеклования и усадку композитов на основе модифицированной эпоксидной матрицы.

Экспериментально доказано, что для формирования композитного материала или защитного покрытия с улучшенными теплофизическими свойствами в модифицированное эпоксидное связующее

целесообразно вводить нанодисперсный наполнитель в количестве $q = 0,5...1,0$ масс.ч. на 100 масс.ч. эпоксидного олигомера ЭД-20. В результате формируется материал, который, кроме улучшенных физико-механических свойств, отличается теплостойкостью (по Мартенсу) - $T = 368...370$ К. Дополнительно доказано, что усадка модифицированных матриц не превышала 1%. Также исследовано поведение разработанных композитов под влиянием теплового поля. Экспериментально установлено, что за диапазона температур $\Delta T = 303...473$ К целесообразно использовать разработанный эпоксикомпозитный материал с улучшенными теплофизическими свойствами, с содержанием наночастиц при критическом содержания, для защиты поверхностей деталей и механизмов при воздействии теплового поля.

Ключевые слова: эпоксидный олигомер, матрица, нанонаполнитель, теплостойкость, композиты.

M.V. BRAILO, O.S. KOBELNIK, S.V. YAKUSHCHENKO

Kherson State Maritime Academy

D.P. STUKHLYAK

Ternopil Ivan Puluj National Technical University

V.V. RACHYNSKYI

Kherson national technical university

THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF EPOXY COMPOSITES FILLED WITH MIXTURES OF NANODISPERSED COMPOUNDS

It was analyzed that today the use of polymeric materials based on thermosetting materials is relevant for the formation of protective coatings with improved properties. It was proved that the use of modified epoxy-composite polymeric materials is effective in this direction. It was found that improvement of the properties of epoxy composites occurs by adding nano-additives to their composition. In the work for experimental studies the nanodispersed powder filler was used, which is a mixture of nanodispersed compounds and characterized by different chemical composition and particle size. According to the results of the work, it is proved that the parameters of the thermophysical properties of composites on the epoxy basis change with adding particles in the form of a mixture of nanodispersed compounds. Heat resistance (by Martens), thermal coefficient of linear expansion, glass transition temperature and shrinkage of composites based on modified epoxy matrix have been investigated.

It has been experimentally proved that in order to form a composite material or protective coating with improved thermophysical properties, it is advisable to introduce a nanodispersed filler in the amount of $q = 0.5 ... 1.0$ pts.wt. in the modified epoxy binder per 100 pts.wt. of epoxy oligomer ED-20. As a result, a material with the improved physical and mechanical properties is formed. It is characterized by increased indexes of heat resistance (by Martens) – $T = 368 ... 370$ K. Additionally, it has been experimentally proved that shrinkage of modified matrices did not exceed 1%. The behavior of the developed composites under the influence of the thermal field is also studied. It has been experimentally found that in the temperature range $\Delta T = 303 ... 473$ K, it is advisable to use composites containing nanoparticles at the critical content.

Keywords: epoxy oligomer, matrix, nanofiller, heat resistance, composites.

Постановка проблеми

Загальновідомо [1], що при формуванні нових виробів і деталей завжди постає питання вибору матеріалів функціонального призначення з прогнозованою динамікою властивостей залежно від умов експлуатації. При виборі матеріалу вагомим фактором є його вартість, тому на сьогодні відбувається витіснення металевих виробів полімерними [2, 3]. Сучасні полімерні матеріали відрізняються не лише покращеними фізико-механічними та теплофізичними властивостями, а й низькою вартістю інгредієнтів та технологічних режимів формування. Зокрема затрати на виготовлення складних деталей з полімерів є значно меншими порівняно з металевими виробами. Актуальним у даному напрямку є використання полімерних матеріалів на основі реактопластів [4]. Останні покращують внаслідок введення у зв'язувач модифікаторів та наповнювачів. Це дозволяє підвищити показники фізико-механічних властивостей матеріалів в умовах впливу теплового поля. Сучасний розвиток полімерного матеріалознавства постійно ставить нові вимоги щодо властивостей полімерів у комплексі. Водночас на сьогодні створення модифікованих епоксикомпозитних полімерних матеріалів з поліпшеними теплофізичними властивостями є актуальним завданням сучасного матеріалознавства [3-5].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Відомо [5, 6], що важливе місце серед широкого спектру зв'язувачів для полімерних матеріалів займають епоксидні олігомери. Епоксидні композити відносяться до групи реактопластичних полімерів, які відрізняються високими показниками фізико-механічних та теплофізичних властивостей, простотою формування та відносно незначною вартістю [6]. Також відомо, що властивості епоксикомпозитів

залежать від їх складу (наповнювачів, модифікаторів, пластифікаторів) та методів формування [6-12]. У працях [6, 8] висвітлено вплив модифікаторів різної природи на властивості епоксикомпозитів. Авторами [9, 10] досліджено вплив мікродисперсних часток – продуктів промислових відходів – на адгезійні та когезійні властивості полімерних композитних матеріалів (КМ) на епоксидній основі. Водночас відомо [7, 11, 12], що актуальним на сьогодні є використання нанонаповнювачів за незначного вмісту для створення КМ з наперед заданими властивостями [7-11]. Зокрема, у працях [11, 12] досліджено вплив вуглецевих нанотрубок на властивості КМ. Однак, пошук нових нанодобавок, які впливатимуть на теплофізичні властивості епоксикомпозитних матеріалів, є перспективним і актуальним на сьогодні.

Формулювання мети дослідження

Дослідити вплив часток у вигляді суміші нанодисперсних сполук на теплофізичні властивості епоксидних композитів.

Викладення основного матеріалу дослідження

Як основний компонент для зв'язувача при формуванні епоксидних КМ вибрано епоксидний діановий олігомер марки ЕД-20 (ГОСТ 10587-84), який характеризується високою адгезійною та когезійною міцністю, незначною усадкою і технологічністю при нанесенні на поверхні складного профілю.

Як модифікатор використано 2,4-діамінотолуен (ДАТ). Модифікатор вводили у зв'язувач за вмісту від 0,1 мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру ЕД-20 (тут і далі за текстом мас. ч. наводять на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру ЕД-20). Молекулярна формула модифікатора: $C_7H_{10}N_2$. Молекулярна маса 2,4-діамінотолуену – 122.1677. Температура плавлення – 98 °С. Дана речовина із серії діамінів феніленового ряду. Модифікатор розчинний у полярних органічних розчинниках – метанол, етанол, ацетон, етилацетат, малорозчинний у воді. Використовується як синтон для синтезу акридинових барвників.

Для зшивання епоксидних композицій використано твердник поліетиленполіамін ПЕПА (ТУ 6-05-241-202-78), що дозволяє затверджувати матеріали при кімнатних температурах. ПЕПА є низькомолекулярною речовиною, яка складається з таких взаємозв'язаних компонентів: $[-CH_2-CH_2-NH-]_n$. Зшивали КМ, вводючи твердник у композицію при стехіометричному співвідношенні компонентів за вмісту (мас.ч.) – ЕД-20 : ПЕПА – 100 : 10.

Як нанодисперсний наповнювач для експериментальних досліджень використано порошки, які є сумішшю нанодисперсних сполук (СНДС) і характеризуються наступним складом, %:

1. СНДС 1: Si_3N_4 – 59,5; Al_2O_3 – 24,4; AlN – 10,1; TiN – 6,0;
2. СНДС 2: Si_3N_4 – 85; AlF_3 – 5; IN – 5; ZrH – 5.

Зернистість часток становить: СНДС 1 – $d = 20...80$ нм, СНДС 2 – $d = 30...40$ нм. Характеристики нанонаповнювачів наведено у табл. 1.

Таблиця 1

Характеристики нанонаповнювачів

Характеристики	Si_3N_4	Al_2O_3	AlN	TiN
Питома площа поверхні, S , m^2/g	44	44	39	48
Розмір часток, визначений методом теплової адсорбції, d , нм	41	41	47	23
Розмір часток, визначений методом електронної мікроскопії, d , нм	39	76	26	43

Епоксидні композити формували за такою технологією: підігрівання смоли до температури $T = 353 \pm 2$ К і витримка при даній температурі впродовж часу $\tau = 20 \pm 0,1$ хв; гідродинамічне суміщення олігомери, модифікатора і часток наповнювача впродовж часу $\tau = 10 \pm 0,1$ хв; ультразвукова обробка (УЗО) композиції впродовж часу $\tau = 1,5 \pm 0,1$ хв; охолодження композиції до кімнатної температури впродовж часу $\tau = 60 \pm 5$ хв; введення твердника і перемішування композиції впродовж часу $\tau = 5 \pm 0,1$ хв. Затверджували КМ за режимом: формування зразків та їх витримання впродовж часу $\tau = 12,0 \pm 0,1$ год за температури $T = 293 \pm 2$ К, нагрівання зі швидкістю $v = 3$ К/хв до температури $T = 393 \pm 2$ К, витримання впродовж часу $\tau = 2,0 \pm 0,05$ год, повільне охолодження до температури $T = 293 \pm 2$ К. З метою стабілізації структурних процесів у композитах зразки витримували впродовж часу $\tau = 24$ год на повітрі за температури $T = 293 \pm 2$ К з наступним проведенням експериментальних випробувань.

У роботі досліджували наступні властивості КМ: теплостійкість (за Мартенсом) (T), термічний коефіцієнт лінійного розширення (ТКЛР).

Теплостійкість (за Мартенсом) КМ визначали згідно з ГОСТ 21341-75. Методика дослідження полягає у визначенні температури, при якій досліджуваний 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).

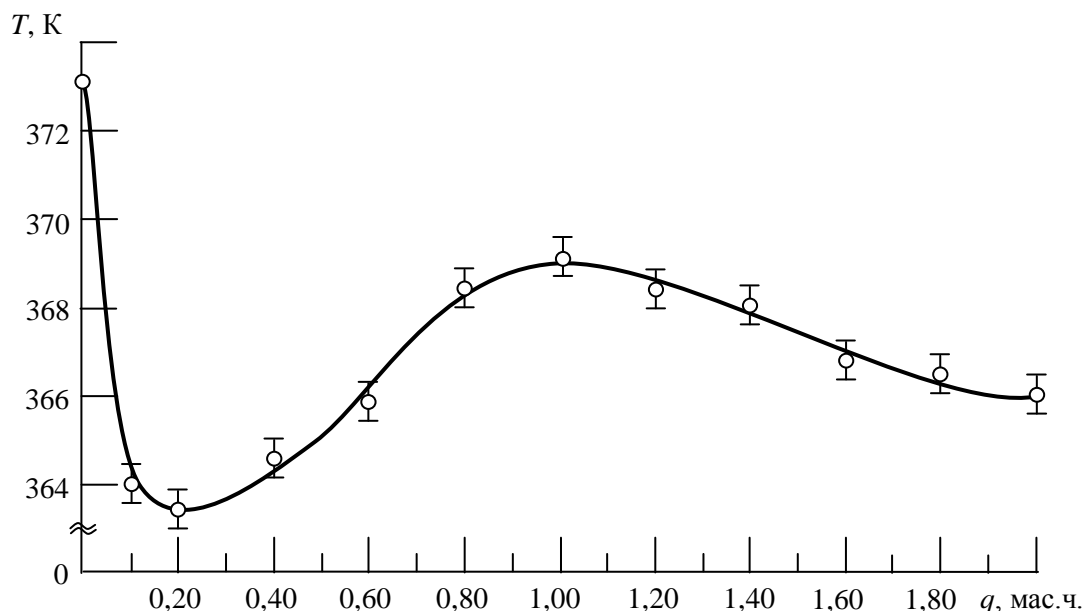
Таблиця 3

Термічний коефіцієнт лінійного розширення КМ, наповнених частками СНДС 1, за різних температурних діапазонів дослідження

№	Вміст наночастинок СНДС 1, q , мас.ч.	Термічний коефіцієнт лінійного розширення, $\alpha \times 10^{-5}$, K^{-1}			
		Температурні діапазони дослідження, ΔT , К			
		303...323	303...373	303...423	303...473
1	Модифікована матриця	2,57	2,91	3,29	9,04
2	0,10	2,95	2,63	3,37	7,45
3	0,50	1,55	2,55	3,30	7,34
4	1,00	1,77	2,42	3,35	8,02
5	2,00	1,78	1,75	2,56	6,17

Отже, аналізуючи ТКЛР досліджуваних КМ, наповнених частками СНДС 1, і, враховуючи отримані попередні значення теплостійкості (за Мартенсом), температури склування, усадки КМ, доведено, що у комплексі оптимальними поліпшеними показниками за теплофізичними властивостями відрізняється матеріал за вмісту нанонаповнювача СНДС 1 у кількості $q = 0,50$ мас.ч. При цьому, теплостійкість (за Мартенсом) такого матеріалу становить – $T = 370$ К, температура склування – $T_c = 321$ К, усадка $\delta = 0,032$ %, ТКЛР в діапазоні температур: $\Delta T = 303...323$ К – $\alpha = 1,55 \times 10^{-5} K^{-1}$, $\Delta T = 303...373$ К – $\alpha = 2,55 \times 10^{-5} K^{-1}$, $\Delta T = 303...423$ К – $\alpha = 3,30 \times 10^{-5} K^{-1}$, $\Delta T = 303...473$ К – $\alpha = 7,34 \times 10^{-5} K^{-1}$.

На наступному етапі досліджували вплив вмісту нанонаповнювача СНДС 2 на теплофізичні властивості модифікованих КМ. Встановлено (рис. 2), що введення часток СНДС 2 призводить до зниження показників теплостійкості (за Мартенсом) КМ. При цьому за вмісту наночастинок у кількості $q = 0,10$ мас.ч. значення теплостійкості знижується від $T = 373$ К (для модифікованої матриці) до $T = 364$ К. Далі, збільшення вмісту СНДС 2 до $q = 1,00$ мас.ч. сприяє зростанню теплостійкості (за Мартенсом) до $T = 369$ К, що практично не відрізняється від значень теплостійкості модифікованої матриці ($T = 373$ К). Введення нанодобавок у КМ понад критичного вмісту ($q = 1,40...2,00$ мас.ч.) зумовлює формування КМ з високими показниками теплостійкості (за Мартенсом) – $T = 366...368$ К.

Рис. 2. Залежність теплостійкості (за Мартенсом) (T) КМ від вмісту нанонаповнювача СНДС 2

Аналіз показників температури склування та лінійної усадки КМ, наповнених частками СНДС 2, дозволяє констатувати, що отримані значення корелюють із динамікою теплостійкості (за Мартенсом) досліджуваних матеріалів. При введенні часток даного наповнювача температура склування монотонно зменшується від $T_c = 333$ К до $T_c = 315$ К за вмісту СНДС 2 – $q = 0,50$ мас.ч. Подальше збільшення кількості нанонаповнювача приводить до зростання температури склування до $T_c = 319$ К (за вмісту

добавки – $q = 1,00$ мас.ч.). Введення наночастинок понад $q = 1,00$ мас.ч. також призводить до зниження T_c композитів.

Розглядаючи отримані результати дослідження лінійної усадки КМ, наповнених СНДС 2 (табл. 4), встановили, введення СНДС 2 за вмісту $q = 0,10$ мас.ч у епоксидний КМ призводить до збільшення показників від $\delta = 0,062$ % (для епоксидної матриці) до $\delta = 0,128$ %. За вмісту нанодобавки $q = 0,50$ мас.ч. формується КМ з меншим показником усадки, який становить $\delta = 0,095$ %, однак за вмісту часток – $q = 1,00$ мас.ч. усадка КМ знову збільшується до $\delta = 0,102$ %. Ці значення є вищими від показників модифікованої матриці, тому доцільним є розглядати теплофізичні властивості розроблених КМ у комплексі. Також, слід звернути увагу, що за вмісту СНДС 2 – $q = 2,00$ мас.ч. значення усадки КМ, як і у матеріалі, наповненому частками СНДС 1 за такої ж кількості, є від'ємним. Тобто, спостерігали збільшення розмірів КМ під впливом теплового поля після циклу «нагрівання-охолодження».

Таблиця 4

Теплофізичні властивості КМ, наповнених частками СНДС 1

№	Характеристики	Вміст модифікатора, q , мас.ч.				
		матриця	0,10	0,50	1,00	2,00
1	Температура склування, T_c , К	333	319	315	319	301
2	Усадка, δ , %	0,062	0,128	0,095	0,102	-0,031*

Примітка * - розміри зразка збільшилися у кінці дослідження.

При дослідженні ТКЛР КМ, наповнених частками СНДС 2 (табл. 5), встановлено, що у чотирьох наперед заданих інтервалах випробувань ($\Delta T = 303...323$ К, $\Delta T = 303...373$ К, $\Delta T = 303...423$ К, $\Delta T = 303...473$ К) мінімальними значеннями характеризується матеріал за вмісту часток СНДС 2 – $q = 2,00$ мас.ч. Однак, згідно результатів дослідження усадки (табл. 4), встановлено, що за вмісту наночастинок у кількості $q = 2,00$ мас.ч., формується композит, у якого об'єм в результаті випробувань ТКЛР збільшується, що є неприйнятним з практичної точки зору. Серед інших досліджуваних КМ мінімальним значенням ТКЛР у вибраних температурних інтервалах відзначається КМ за вмісту СНДС 2 у кількості $q = 1,00$ мас.ч. Слід зазначити, що в діапазоні температур $\Delta T = 303...323$ К показник ТКЛР за даного вмісту є найвищим, однак враховуючи умови застосування матеріалів пріоритетним є значення ТКЛР у діапазоні підвищених температур.

Таблиця 5

Термічний коефіцієнт лінійного розширення КМ, наповнених частками СНДС 2, за різних температурних діапазонів дослідження

№	Вміст наночастинок СНДС 2, q , мас.ч.	Термічний коефіцієнт лінійного розширення, $\alpha \times 10^{-5}$, K^{-1}			
		Температурні діапазони дослідження, ΔT , К			
		303...323	303...373	303...423	303...473
1	Модифікована матриця	2,57	2,91	3,29	9,04
2	0,10	2,40	2,22	3,33	8,22
3	0,50	2,58	2,27	3,37	8,36
4	1,00	2,76	2,19	3,22	8,06
5	2,00	1,57	1,57	2,32	6,05

Отже, з отриманих результатів дослідження впливу нанонаповнювача СНДС 2 на властивості КМ встановлено, що оптимальними показниками у комплексі за теплофізичними характеристиками відрізняється КМ за вмісту наночастинок у кількості $q = 1,00$ мас.ч. При цьому, теплостійкість (за Мартенсом) становить – $T = 369$ К, температура склування – $T_c = 319$ К, усадка $\delta = 0,102$ %, ТКЛР в діапазоні температур: $\Delta T = 303...323$ К – $\alpha = 2,76 \times 10^{-5}$ K^{-1} , $\Delta T = 303...373$ К – $\alpha = 2,19 \times 10^{-5}$ K^{-1} , $\Delta T = 303...423$ К – $\alpha = 3,22 \times 10^{-5}$ K^{-1} , $\Delta T = 303...473$ К – $\alpha = 8,06 \times 10^{-5}$ K^{-1} .

Висновки

За результатами дослідження доведено, що є доцільним введення нанонаповнювачів за критичного вмісту – $q = 0,50...1,00$ мас.ч. в модифіковану епоксидну матрицю (ЕД-20 – 100 мас.ч., модифікатор 2,4-діамінотолуен – 0,1 мас.ч., твердник поліетиленполіамін – 10 мас.ч.) для поліпшення у комплексі теплофізичних властивостей композитних матеріалів. При цьому встановлено наступне.

1. Експериментально доведено, що поліпшеними теплофізичними властивостями відрізняється композит, наповнений порошком ($q = 0,5$ мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру ЕД-20) у вигляді суміші нанодисперсних сполук ($d = 20...80$ нм) наступного складу, %: Si_3N_4 – 59,5; Al_2O_3 – 24,4; AlN –

10,1; TiN – 6,0. Розроблений матеріал має наступні характеристики: теплостійкість (за Мартенсом) – $T = 370$ К, температура склування – $T_c = 321$ К, усадка $\delta = 0,032$ %, термічний коефіцієнт лінійного розширення в діапазоні температур: $\Delta T = 303 \dots 323$ К – $\alpha = 1,55 \times 10^{-5}$ К⁻¹, $\Delta T = 303 \dots 373$ К – $\alpha = 2,55 \times 10^{-5}$ К⁻¹, $\Delta T = 303 \dots 423$ К – $\alpha = 3,30 \times 10^{-5}$ К⁻¹, $\Delta T = 303 \dots 473$ К – $\alpha = 7,34 \times 10^{-5}$ К⁻¹.

2. Встановлено, що введення порошку у вигляді суміші нанодисперсних сполук ($d = 30 \dots 40$ нм) наступного складу, %: Si₃N₄ – 85; AlF₃ – 5; ІН – 5; ZrH – 5 за критичного вмісту ($q = 1,0$ мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру ЕД-20) забезпечує формування композиту з наступними показниками теплофізичних властивостей: теплостійкість (за Мартенсом) – $T = 369$ К, температура склування – $T_c = 319$ К, усадка $\delta = 0,102$ %, термічний коефіцієнт лінійного розширення в діапазоні температур: $\Delta T = 303 \dots 323$ К – $\alpha = 2,76 \times 10^{-5}$ К⁻¹, $\Delta T = 303 \dots 373$ К – $\alpha = 2,19 \times 10^{-5}$ К⁻¹, $\Delta T = 303 \dots 423$ К – $\alpha = 3,22 \times 10^{-5}$ К⁻¹, $\Delta T = 303 \dots 473$ К – $\alpha = 8,06 \times 10^{-5}$ К⁻¹.

Список використаної літератури

1. P.O. Maruschak, I.V. Konovalenko, V. Gliha, et al., «Physical regularities in cracking of nanocoating and the method for automated determination of crack network parameters» in: Book of Abstracts of the 19th Conf. on Materials and Technology (November 22-23, 2011, Slovenia, Portoroz) (2011) - P. 52.
2. Применение пластмасс в строительстве и городском хозяйстве: Материалы X Международной научно-технической интернет-конференции. – Харьков: ХНАГХ, 2012. – 183 с.
3. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология: учеб. пособие / Кербер М. Л., Виноградов В. М., Головкин Г. С. и др.; под ред. Берлина А. А. – СПб.: Профессия, 2008. – 560 с.
4. Chawla, Krishan Kumar. Composite materials: science and engineering / Krishan K. Chawla. – 2nd ed. – Springer New York, 1998. – 483 p.
5. Михайлов М. И., Карпов А. А., Плещачевский Ю. М. Исследование влияния компонентов композиционного материала на основе эпоксиполиэфирных смол на его свойства // Вестник Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого. – 2008. – №. 3-4 (35).
6. Букетов А.В. Дослідження адгезійних та фізико-механічних властивостей епокси-поліефірного матриці модифікованої метилендіфенілдіізоціанатом / А.В. Букетов, М.В. Браїло, С.В. Якущенко, В.М. Яцюк, М.Ю. Амелін // Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції до 100 річчя з дня заснування НАН України та на вшанування пам'яті Івана Пулюя (100 річчя з дня смерті) [«Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій»], (Тернопіль 22 – 24 травня 2018 року). – Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2018. – С. 31.
7. Buketov A.V. Influence of the ultrasonic treatment on the mechanical and thermal properties of epoxy nanocomposites / A.V. Buketov, O.O. Saponov, M.V. Brailo, V.L. Aleksenko // Materials Science. – Vol. 49, Issue 5. – 2014. – P.696-701.
8. Кочергин Ю.С. Клеевые композиции на основе модифицированных эпоксидных смол / Ю.С. Кочергин, Т.А. Кулик, Т.И. Григоренко // Пластические массы, 2005. – № 10. – С. 9-16.
9. Букетов А., Стухляк П., Рудько О. Теплофізичні властивості епоксикомпозитів, наповнених мінеральними відходами промислового виробництва // Машинознавство. – 2010. – №. 3-4. – С. 53-58.
10. Віленський В.О., Демченко В.Л. Вплив природи дисперсних наповнювачів на структуру, теплофізичні властивості та електропровідність композитів на основі епоксидної смоли. – 2008. – Т. 30. – №2. С. 131–138.
11. Buketov A. Investigation of thermophysical properties of epoxy nanocomposites / A. Buketov, P. Maruschak, O. Saponov, M. Brailo, O. Leshchenko, L. Bencheikh and A. Menou // Molecular Crystals and Liquid Crystals. – 2016. – Vol. 628. – Issue – 1. – pp. 167-179.
12. Improvement of modulus, strength and fracture toughness of CNT/Epoxy nanocomposites through the functionalization of carbon nanotubes / J. Cha, G.H. Jun, J.K. Park et al. // Composites Part B: Engineering. – 2017. – Vol. 129. – pp. 169-179.