

І.Г. ДОБРОТВОР

Тернопільський національний економічний університет

Д.П. СТУХЛЯК

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ У ЕПОКСИДНИХ КОМПОЗИТНИХ ПОКРИТТЯХ ДЛЯ РІЗНИХ ДИСПЕРСНИХ НАПОВНЮВАЧІВ

На основі проведених випробувань побудовано модель та здійснено аналіз параметрів епоксидних композитних покриттів із дисперсними наповнювачами різної природи. Встановлено рекомендації для формування оптимальних покриттів на основі мінімізації залишкових внутрішніх напружень матеріалу. Вказано межі параметрів, що не рекомендуються для експлуатації.

Ключові слова: композит, олігомер, наповнювач, вміст, покриття, товщина, напруження.

I.G. DOBROTVOR

Ternopil National Economical University

D.P. STUKHLYAK

Ternopil Ivan Puluj National Technical University

RESIDUAL STRESSES INVESTIGATION IN EPOXYD COMPOSITE COATING FOR DIFFERENT DYSPERSE FILLERS

In most of the cases the exploitation of mechanisms and machines depends on maintainability of working details surfaces. The most popular reason of nodes becoming out-of-work is wearing out of the surfaces mentioned above. Such details recovery can be obtained with the help of usage of polymer composite materials in the capacity of coatings. The most effective method is to use thermosetting materials, including those that are formed on the basis of epoxy-diane oligomers. Usage of polyethylenepolyamine in the capacity of the hardener gives an opportunity to form coatings on wear-out working surfaces with complex configurations without usage of complicated technical equipment. Residual stresses appear during epoxy composite coating formation. Coating thickness influence is quite ambiguous for the values of the given residual stresses. Residual stress is one of the parameters that define material behavior during operations; it impacts on stress-response and maintainability of composite coatings of surface details. Estimation of dependences of residual stresses of composite with fillers (oxides and carbides) on coating thickness and material filling capacity is investigated. Investigation results of uninterrupted change of residual stresses towards increasing thickness coating are analyzed. It gives an opportunity to define thickness values of composite film. Residual stresses are increasing for the given thickness values being investigated. The increase of residual stresses should be avoided in order to preserve coating operation parameters. Estimation of positive conditions for coating formation was also conducted. MathCAD-15 application usage gives an opportunity to visualize residual stresses values in epoxy composites. Improvement of defining accuracy of the given parameters is possible while applying differential operators with usage of qualitative theory of differential equations.

Key words: composite, oligomer, filler, content, coating, thickness, stress.

Постановка проблеми

В основі фізичних методів регулювання структури і властивостей полімерних композитів є вплив вмісту та природи наповнювача на структуроутворення і ступінь зшивання епоксидної матриці, що визначає властивості матеріалів у процесі експлуатації. Одним з факторів, що визначають властивості матеріалу у процесі експлуатації є залишкові напруження, які впливають на адгезійну міцність. Стійкість до спрацювання та ремонтоздатність композитних покриттів поверхонь деталей. Метою досліджень є аналіз залежностей залишкових напружень композиту з наповнювачами – оксидами та карбідами, від товщини покриття та ступені наповнення матеріалу.

Аналіз останніх джерел

Об'єктом дослідження вибрано епоксидіановий олігомер марки ЕД-20 (ГОСТ 10587-84), який характеризується незначною усадкою, високою адгезійною та когезійною міцністю, технологічністю при нанесенні на довговимірні поверхні складного профілю, розвинутою сировинною базою [1–3]. Враховуючи умови їх формування на робочих поверхнях деталей машин, для зшивання епоксидного зв'язувача використано твердник поліетиленполіамін (ТУ 6-05-241-202-78). Більшість матеріалів на основі епоксидного зв'язувача використовують у вигляді покриттів [4, 5].

Виклад основного матеріалу

Методика досліджень. Виготовлення композиту виконували шляхом введення у матрицю дисперсних наповнювачів, після чого здійснювали суміщення компонентів протягом 5 хвилин з додаванням твердника поліетиленполіаміну (ПЕПА). Залишкові напруження у покриттях визначали залежно від природи та вмісту наповнювачів, використовуючи консольний метод (рис. 1). Покриття різної товщини (0,1 – 1,5 мм) формували згідно з ГОСТ 4648-71 на сталійній основі з товщиною $\delta=0,3$ мм. Як наповнювачі використовували дисперсні (63 мкм) матеріали: оксид міді, електрокорунд, карбід бору та карбід кремнію. У процесі зшивання на межі поділу фаз “захисне покриття – металева основа” формуються зв'язки, що зумовлює виникнення залишкових напружень стиску. Внаслідок цього у процесі зшивання олігомера спостерігали деформацію консолі (у вигляді основи з покриттям), абсолютне значення N якого визначали після періоду $\tau = 72$ год. процесу тверднення матеріалу. Формування зразків відбувалося протягом 12 год. З метою стабілізації структурних процесів у матриці, зразки після витримки протягом 3-х часової термообробки при $T = 393 \pm 3K^\circ$ повільно охолоджували до температури $T = 293 \pm 2K^\circ$ та витримували 10-

12 годин на повітрі з наступним проведенням випробувань. Дослідження залишкових напружень з наповнювачами дисперсністю 63 мкм: карбід бору, карбід кремнію, оксид алюмінію (електрокорунд) та оксид міді з концентраціями 0; 20; 30; 40; 50; 60 та 80 мас. ч. наповнювача на 100 мас. ч. олігомера проводили (1) з кількістю зразків $n = 6$. Покриття наносили на пластину із сталі Ст.3 товщиною $\delta = 0,3$ мм.

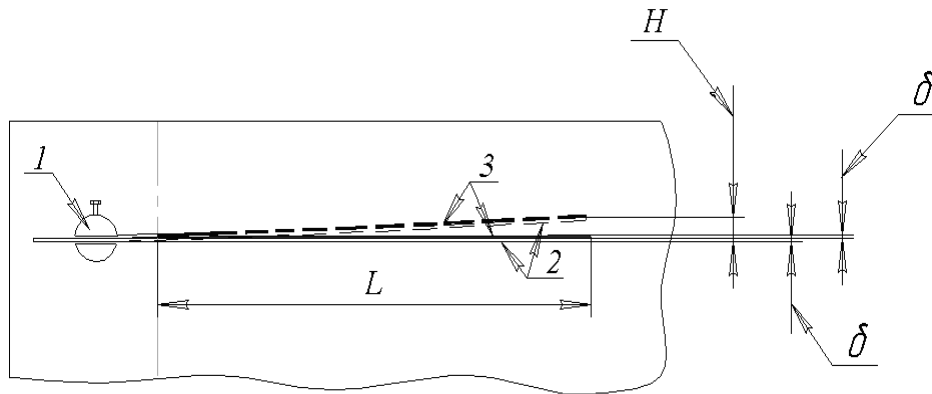


Рис. 1. Схема формування зразків для дослідження залишкових напружень у захисних покриттях:
 1 – опора, до якої кріпиться зразок із покриттям;
 2 – основа зі сталі Ст.3;
 3 – захисне покриття;
 H – відхилення пластинки-основи від початкового положення;
 L – довжина пластинки-основи з покриттям; δ – товщина пластинки-основи; δ^* – товщина покриття.

Величину залишкових напружень $\sigma_{зал}$ визначали за формулою:

$$\sigma_{зал} = \frac{HE \delta^3}{3L^2 (\delta + \delta^*) \delta^*}, \tag{1}$$

де H – відхилення пластинки-основи від початкового положення;
 E – модуль пружності пластинки-основи ($E = 2 \cdot 10^5$ МПа);
 L – довжина пластинки-основи з покриттям ($L = 7$ см);
 δ – товщина пластинки-основи ($\delta = 0,3$ мм);
 δ^* – товщина покриття, мм.

Таблиця 1 (а, б, в, г).

Залишкові напруження $\sigma_{зал}(q, \delta)$ (МПа) композитів для різного вмісту наповнювачів q (мас.ч. на 100 мас.ч. олігомеру):

а) ненаповнений олігомер

δ , мм мас. ч.	(0.1; 0.2)	(0.2; 0.3)	(0.3; 0.4)	(0.4; 0.5)	(0.5; 0.6)
ЕД-20	3,43	4,48	3,15	3,52	4,31

б) наповнювач – карбід кремнію

δ , мм q, мас.ч.	(0.1; 0.18)	(0.18; 0.26)	(0.26; 0.34)	(0.34; 0.42)	(0.42; 0.5)
SiC 20	4,75	3,04	2,13	4,44	4,23
SiC 30	6,74	6,03	5,93	5,31	6,26
SiC 40	8,13	6,74	6,16	5,95	4,91
SiC 50	6,32	7,76	5,30	5,08	4,71
SiC 60	2,98	2,58	6,21	4,74	4,66
SiC 80	2,85	5,67	5,40	5,55	4,87

в) наповнювач – карбід бору

δ , мм q, мас.ч.	(0.1; 0.18)	(0.18; 0.26)	(0.26; 0.34)	(0.34; 0.42)	(0.42; 0.5)
B4C 20	2,35	4,62	5,56	4,58	4,44
B4C 30	3,07	5,11	5,08	4,16	4,23
B4C 40	6,14	5,73	6,47	5,11	5,36
B4C 50	4,23	6,03	5,52	4,95	5,35
B4C 60	4,49	5,38	7,04	5,37	5,74
B4C 80	3,83	6,71	5,01	5,64	4,28

г) наповнювач - електрокорунд

δ мм q, мас. ч.	(0.1; 0.2)	(0.2; 0.3)	(0.3; 0.4)	(0.4; 0.5)	(0.5; 0.6)
Al ₂ O ₃ 20	5,90	6,34	5,45	5,76	5,27
Al ₂ O ₃ 30	8,04	7,95	6,05	5,34	5,44
Al ₂ O ₃ 40	10,63	10,57	8,14	6,67	5,90
Al ₂ O ₃ 50	10,68	11,38	10,74	8,01	7,01
Al ₂ O ₃ 60	8,44	8,69	8,20	6,65	6,42
Al ₂ O ₃ 80	8,36	9,76	8,62	7,38	6,17

д) наповнювач – оксид міді

δ мм q, мас. ч.	(0.1; 0.2)	(0.2; 0.3)	(0.3; 0.4)	(0.4; 0.5)	(0.5; 0.6)
CuO 20	6,78	7,26	6,78	5,68	5,34
CuO 30	7,18	7,65	8,34	6,33	5,51
CuO 40	8,30	7,18	7,67	6,27	5,67
CuO 50	10,64	7,46	8,16	6,95	5,91
CuO 60	10,84	6,82	7,61	6,62	5,79
CuO 80	7,57	6,35	7,34	7,20	5,90

Обґрунтування методів аналізу дискретних замірів (табл. 1 а-г) основане на введенні в ході обробки результатів замірів випробувань функції відліків, що характеризує графічні залежності залишкових напружень покриттів від двох основних параметрів. При встановленні адекватності вимірюваного параметру (товщини покриття та вмісту наповнювача) і вимірювального математичного апарату досліджуваних характеристик (залишкови напруження) використовували можливість вибору зернистості для параметрів та значень функції f відліків [6]. Така функція f дозволяє виявляти параметри досліджуваної системи у момент часу t в елементі об'єму dx та у околі точки замірів $X(x_1, x_2, \dots, x_N)$, кожна із координат якої має скінченну множину значень.

Представимо однотипні елементи простору, залежні від їх розміщення в однорідному середовищі деякої області в околі точки X , яка містить ресурс і елементи, як деяку синергічну єдність, що в результаті створює систему, яка дозволяє з відповідною точністю визначити значення залишкових напружень. Під ресурсом будемо розуміти набір структурних, хімічних і фізичних параметрів елементарних комірок зв'язувача, які можуть змінюватися з плином часу. Під системою будемо розуміти синергічну суму параметрів елементарних комірок у даний момент часу. Елементи (або комірки) такої системи можуть обмінюватись між собою ресурсами у вигляді "миттєвих" парних взаємодій.

З метою побудови функції дискретних відліків f одного із вибраних компонент ресурсу (табл. 1) складемо діаграму розподілу, у якій елементи розміщені у порядку зростання. Далі вказуємо для кожного з них дискретну величину n_x , вміщеного у ньому ресурсу із певного діапазону. Однак, побудоване таким чином наближення функції відліків f може і не бути оптимальним для моделювання процесу ресурсообміну між елементами у зв'язувачі. Крім того, така функція не є диференційована і не інтегровна, що ускладнює роботу з нею. Оцінюючи кількісно густину розміщення об'єктів n_x вздовж осі x і представляючи її графічно у вигляді стовпців n_x^l на відрізках Δx з довжиною l одиниць x . Отримана дискретна функція n_x^l також може бути не достатньо інформативною, порівняно з попередньою, а тому на кожному з наступних етапів аналізу наближення функції відліків збільшували крок дискретизації залежності (2) вибраного параметру оцінки ресурсу.

У випадку, коли отриману гістограму n_x^k можна буде апроксимувати гладкою огинаючою кривою $f(x)$, стане можливо записати аналітично вигляд функції відліків і проводити над ними дослідження залишкових напружень. Таку функцію для кожного вибраного моменту часу t називали зернистою функцією відліків $f(x)$ дискретності $L = \{l_1, l_2, \dots, l_s\}$. Кількість s інтервалів n_x^k , $k=1, \dots, s$; залежить від об'єму N вибірки ресурсу n_x . Для оцінки нижньої межі s для великих N використовували формулу Старджеса:

$$s \approx \log_2 N + 1.$$

Оцінку зернистості l_i , де: i – номер ітерації, проводили шляхом мінімізації похибки Δ_i при чисельному обчисленні похідної функції $f(x)$ на деякому інтервалі зміни просторовоподібної лінійної (або часової) змінної x :

$$\Delta_i = \left| \frac{df(x)}{dx} - \frac{f(x+l_i) - f(x)}{l_i} \right|. \quad (2)$$

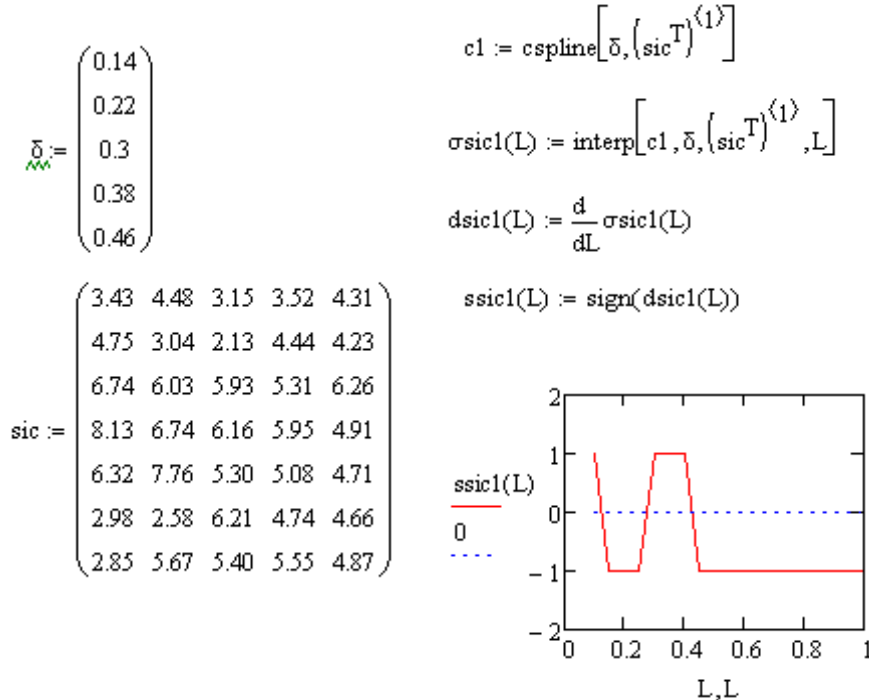
Це пов'язано із наявністю похибок вимірювання, які зокрема зумовлені дискретним представленням числових даних (2). Звідси можна зробити висновок про те, що значення кроку l_i не потрібно вибирати дуже малим, інакше за рахунок похибок обчислення $f(x)$ чисельний результат диференціювання буде невірним. Крім того, малий крок суттєво впливає на швидкість та об'єм подальших обчислень. У результаті

дискретизації змінної $x_k = x_0 + kh$, $h = \underset{i}{opt}(l_i)$, $k=1, \dots, s$; отримали послідовність значень функції дискретних відліків $f_k = f(x_k)$ як зважених δ -функцій зміни x .

Спектр оптимального кроку h суттєво залежить від структури досліджуваного середовища. Тому за його характеристиками (екстремуми, періодичність, монотонність) можна стверджувати про клас і структуру ділянок середовища. У даній роботі середовище покриття, що представляє собою тонку плівку композиту із відповідним наповненням характеризується залишковими напруженнями, які суттєво впливають на експлуатаційні характеристики досліджуваного об'єкта.

Отримані результати випробувань проаналізовано за допомогою програми MathCAD (лістинг 1) у припущенні неперервної зміни залишкових напружень відносно зростаючої товщини покриття з метою визначення таких діапазонів величин товщини плівок композитів, для яких залишкові напруження матеріалу зростають [7–9]. Останній факт із необхідністю приведе до виникнення дефектів матеріалу, що є негативним явищем при експлуатації покриттів, а тому не може бути рекомендованим для використання.

Лістинг 1 (не применшуючи загальності, наведено у якості прикладу).



Програма (лістинг 1) на основі MathCAD-15 дозволяє візуалізацію залежності знаку процесу зміни величини залишкових напружень покриттів із використанням наповнених дисперсіями карбиду кремнію композитів із наповненням 20 мас.ч. на 100 мас.ч. олігомеру. Матриця sic побудована на основі даних 1-го рядка таблиці 16. Вектор-стовбець δ містить координати серединних точок рядка δ цієї таблиці. У даному прикладі аналітично визначено, що критичною товщиною покриттів для ненаповненого олігомеру є товщина: (0.3-0.35) мм [10].

Таблиця 2.

Діапазони товщин покриттів для наповнювачів – карбідів із зростаючими залишковими напруженнями

Наповнювач, мас.ч. на 100 мас.ч. олігомеру	Діапазони критичних товщин, мм	Наповнювач, мас.ч. на 100 мас.ч. олігомеру	Діапазони критичних товщин, мм
SiC 20	0,3-0,35	B4C 20	0,3-0,35
SiC 30	0,25-0,3	B4C 30	0,4-0,45
SiC 40	0,2-0,25 0,35-0,4	B4C 40	0,4-0,45
SiC 50	--	B4C 50	0,2-0,25 0,4-0,45
SiC 60	0,3-0,35	B4C 60	0,35-0,4

Для наповнених епоксидних композитів отримано ряд діапазонів товщини покриттів, для яких при нанесенні захисних шарів слід уникати з метою збереження експлуатаційних характеристик покриття (табл. 2, 3). Більш детальне дослідження можливе із використанням диференціальних операторів та із застосуванням якісної теорії диференціальних рівнянь [11]. Такий підхід здійснювався у попередніх дослідженнях авторів [9, 12].

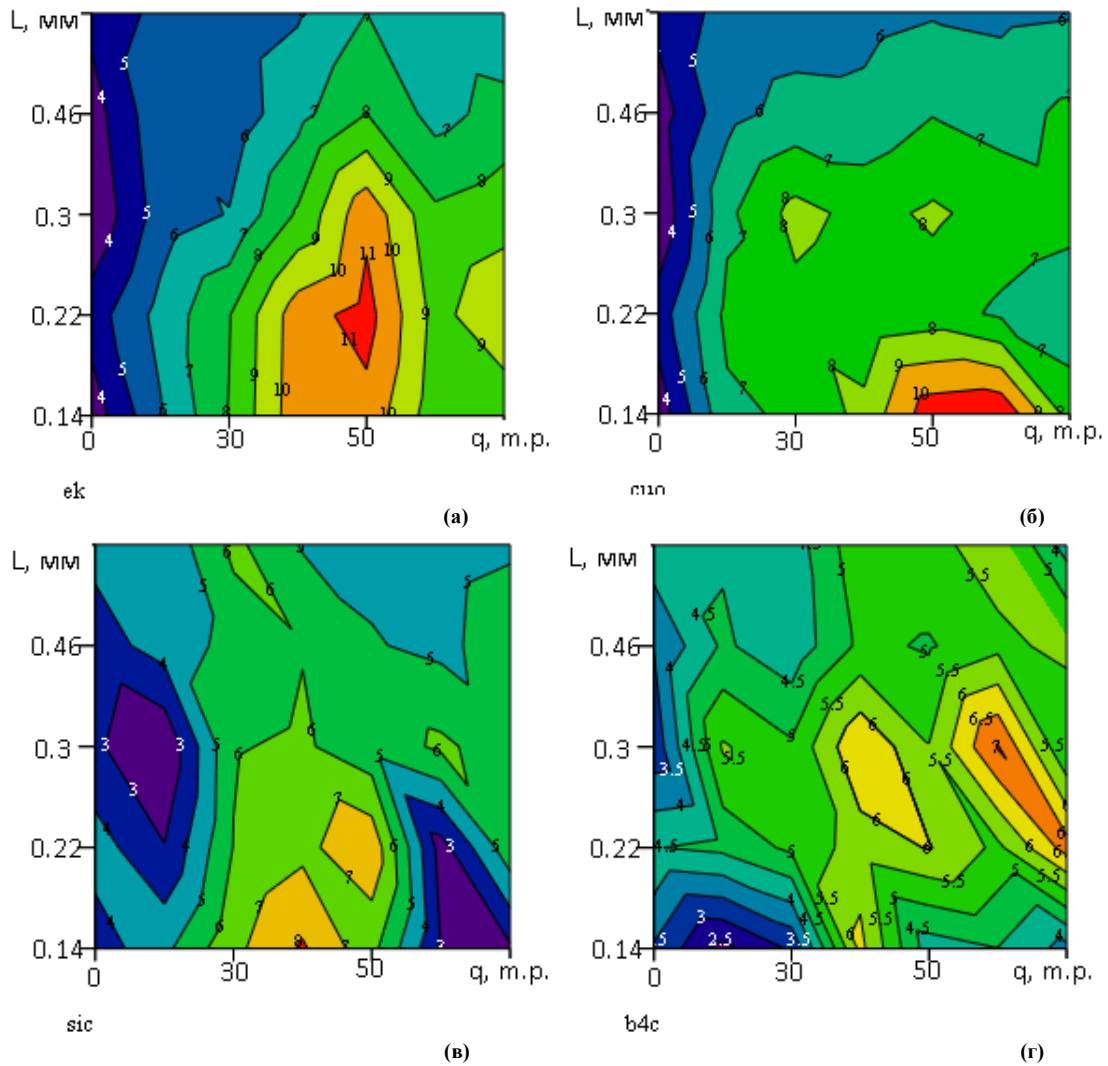


Рис. 2. Діаграми залежностей від товщини покриття L та вмісту наповнювача q внутрішніх напружень у епоксидних композитних покриттях із наповнювачами: (а) електрокорунд, (б) оксид міді, (в) карбід кремнію, (г) карбід бору

Таблиця 3

Діапазони товщини покриттів для наповнювачів – оксидів із зростаючими залишковими напруженнями

Наповнювач, мас.ч. на 100 мас.ч. олігомеру	Діапазони критичних товщин, мм	Наповнювач, мас.ч. на 100 мас.ч. олігомеру	Діапазони критичних товщин, мм
Al_2O_3 20	0,3-0,35	CuO 20	0,3-0,35
Al_2O_3 30	0,3-0,35	CuO 30	0,4-0,45
Al_2O_3 40	0,35-0,4	CuO 40	0,15-0,2 0,4-0,45
Al_2O_3 50	--	CuO 50	0,2-0,25 0,4-0,45
Al_2O_3 60	0,4-0,45	CuO 60	0,2-0,25 0,4-0,45
Al_2O_3 80	0,4-0,45	CuO 80	0,4-0,45

Лінії рівня на діаграмах (рис. 2 а-г) при визначеній оптимальній точності замірів (2) показують, що залишкові напруження покриттів змінюються нерівномірно відносно товщини покриття та вмісту дисперсного наповнювача. Існують області скалярного поля L - q (вміст-товщина) із незначними внутрішніми напруженнями (<3 МПа) та напруженнями високими (>7 МПа). Проміжні зони, за згаданими областями можуть по різному впливати на експлуатаційні характеристики покриттів (табл. 4).

**Діапазони критичних та сприятливих для формування
епоксидних композитних покриттів для різних дисперсних наповнювачів**

Наповнювач	Діапазони критичних параметрів	Діапазони сприятливих параметрів
Al ₂ O ₃	35-55 мас.ч., 0,14-0,3 мм	0-15 мас.ч.
CuO	45-65 мас.ч. 0-0,2 мм	0-10 мас.ч.
SiC	35-40 мас.ч. 0-0,15 мм	0-20 мас.ч. + 55-80 мас.ч. 0-0,3 мм
B ₄ C	55-80 мас.ч. 0,2-0,35 мм	0-10 мас.ч. + 0-10 мас.ч. 0-0,2 мм

Висновки

Проведені дослідження дозволили виділити критичні зони параметрів покриття із високими рівнями внутрішніх напружень а також сприятливі діапазони умов для формування покриттів із низькими значеннями внутрішніх напружень. Отримано також діапазони товщини покриттів для наповнювачів із зростаючими залишковими напруженнями, які не сприяють довговічності покриттів. Отримані результати дозволяють забезпечити умови довговічності покриттів із дисперсними наповнювачами на основі епоксикомпозитних різного функційного призначення.

Література

1. Stukhljak P., Dobrotvor I., Mytnyk M., Mykytyshyn A. Investigation of the phenomena revealed on phase interface in epoxide-composites. *Przetworstwo tworzyw. Polymer processing*. 2017 (styczen-luty) – N1 (175)/23, p. 53-63.
2. Добротвор І. Аналіз систем розпізнавання образів структури композитів / І. Добротвор, П.Стухляк, А.Микитишин, М. Митник. – Тернопіль : ТНТУ імені Івана Пулюя, 2018. – 224 с.
3. Dobrotvor I. Layers density determination on phases verges division in epoxocomposites with the disperse fillers / I. Dobrotvor, P. Stukhljak, A. Buketov, I. Sorivka. *Оралдын гылым жаршысы*. – 2012. - № 2(38). – С.117–126.
4. Paliy I., Zahorodnia D., Pigovsky Y., Dobrotvor I., Bykovyy P., Krylov V. Structural Statistic Method Identifying Facial Images by Countour Characteristic Points IEEE 8th International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications, 23-27 September 2015, Warsaw, Poland, pp.295-298.
5. Stukhljak P., Dobrotvor I., Mytnyk M., Mykytyshyn A. Investigation of the phenomena revealed on phase interface in epoxide-composites. *Przetworstwo tworzyw. Polymer processing*. 2017 (styczen-luty) – N1 (175)/23, - P. 53-63.
6. Овчинников П. П. Вища математика / П. П. Овчинников. – К. : Техніка, 2000. – Ч. 2. – 792 с.
7. Dunets O., Wolf C., Sachenko A., Hladij G., Dobrotvor I. Multi-agent System of IT Project Planning The 9th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications 21-23 September, 2017, Bucharest, Romania, vol. 1, P. 548-552. – ISBN 978-1-586-0696-4.
8. Патент № 89682. Україна МПК C09D 163/00. Спосіб отримання модифікованого епоксикомпозитного покриття / П.Д. Стухляк, І.Г. Добротвор, В.В. Карташов ; заявник і патентовласник Тернопільський нац. техн. ун-т. – Заявл. 09.12.2013. – Бюл. № 20.
9. Технологія нанесення захисних покриттів на основі оцінок характеристик структур епоксикомпозитів / П. Стухляк, І. Добротвор, М. Митник, О. Ястубчак // Вісник Тернопільського державного технічного університету. – 2014. – № 3 (75). – С. 114–121.
10. Добротвор І. Умови стаціонарності процесів тверднення наповнених епоксидних композитів / І. Добротвор, Д. Стухляк // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції: Транспорт: механічна інженерія, експлуатація, матеріалознавство (ТМІЕТ – 2017). – С. 115.
11. Добротвор І. Моделювання оптичних характеристик структур епоксикомпозитів параметрами операторних перетворень / І. Добротвор, Д. Стухляк, А. Каплун // Вісник Тернопільського державного технічного університету. – 2015. – № 2 (78). – С. 144–152.
12. Стухляк П. Дослідження і моделювання залежностей залишкових напружень епоксикомпозитних покриттів від вмісту дисперсних часток / П. Стухляк, І. Добротвор, І. Сорівка, В. Карташов, О. Вербицький // Науковий вісник ХДМУ : науковий журнал – Херсон : Видавництво ВНЗ

References

1. Stukhljak P., Dobrotvor I., Mytnyk M., Mykytyshyn A. Investigation of the phenomena revealed on phase interface in epoxide-composites. *Przetworstwo tworzyw. Polymer processing*. 2017 (styczen-luty) – N1 (175)/23, p. 53-63.
2. Dobrotvor I. Analiz system rozpoznavania obraziv struktury kompozytiv / I. Dobrotvor, P. Stukhliak, A. Mykytyshyn, M. Mytnyk. – Ternopil : TNTU imeni Ivana Puliuia, 2018. – 224 s.
3. Dobrotvor I. Layers density determination on phases verges division in epoxycomposites with the disperse fillers / I. Dobrotvor, P. Stukhljak, A. Buketov, I. Sorivka. *Oraldym hylым zharshыsы*. – 2012. - № 2(38). – S.117–126.
4. Paliy I., Zahorodnia D., Pigovsky Y., Dobrotvor I., Bykovyy P., Krylov V. Structural Statistic Method Identifying Facial Images by Countour Characteristic Points IEEE 8th International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications, 23-27 September 2015, Warsaw, Poland, pp.295-298.
5. Stukhljak P., Dobrotvor I., Mytnyk M., Mykytyshyn A. Investigation of the phenomena revealed on phase interface in epoxide-composites. *Przetworstwo tworzyw. Polymer processing*. 2017 (styczen-luty) – N1 (175)/23, - P. 53-63.
6. Ovchynnykov P. P. *Vyshcha matematyka* / P. P. Ovchynnykov. – K. : Tekhnika, 2000. – Ch. 2. – 792 s.
7. Dunets O., Wolf C., Sachenko A., Hladij G., Dobrotvor I. Multi-agent System of IT Project Planning The 9th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications 21-23 September, 2017, Bucharest, Romania, vol. 1, P. 548-552. – ISBN 978-1-586-0696-4.
8. Patent № 89682. Ukraina MPK C09D 163/00. Sposib otrymannia modyfikovanoho epoksykompozytnoho pokryttia / P.D. Stukhliak, I.H. Dobrotvor, V.V. Kartashov ; zaiavnyk i patentovlasnyk Ternopil'skyi nats. tekhn. un-t. – Zaiavl. 09.12.2013. – Biul. № 20.
9. Tekhnolohiia nanesennia zakhysnykh pokryttiv na osnovi otsinok kharakterystyk struktur epoksykompozytiv / P. Stukhliak, I. Dobrotvor, M. Mytnyk, O. Yastubchak // *Visnyk Ternopil'skoho derzhavnogo tekhnichnogo universytetu*. – 2014. – № 3 (75). – S. 114–121.
10. Dobrotvor I. Umovy statsionarnosti protsesiv tverdnennia napovnenykh epoksydnykh kompozytiv / I. Dobrotvor, D. Stukhliak // *Materialy mizhnarodnoi naukovo-tekhnichna konferentsii: Transport: mekhanichna inzheneriia, ekspluatatsiia, materialoznavstvo (TMIET – 2017)*. – S. 115.
11. Dobrotvor I. Modeliuvannia optychnykh kharakterystyk struktur epoksykompozytiv parametry operatornykh peretvoren / I. Dobrotvor, D. Stukhliak, A. Kaplun // *Visnyk Ternopil'skoho derzhavnogo tekhnichnogo universytetu*. – 2015. – № 2 (78). – S. 144–152.
- Stukhliak P. Doslidzhennia i modeliuvannia zalezhnosti zalyshkovykh napruzhen epoksykompozytnykh pokryttiv vid vmistu dyspersnykh chastok / P. Stukhliak, I. Dobrotvor, I. Sorivka, V. Kartashov, O. Verbytskyi // *Naukovyi visnyk KhDMI : naukovyi zhurnal – Kherson : Vydavnytstvo VNZ «KhDMI»*. – 2012. – № 2(7). – S. 217–222.

Рецензія/Peer review : 22.05.2018 р.

Надрукована/Printed : 10.07.2018 р.

Стаття рецензована редакційною колегією