

І.Г. Добротвор, к.ф.-м.н., доц.
П.Д. Стухляк, д.т.н., проф.
А.В. Букетов, д.т.н., проф.

Тернопільський державний технічний університет імені Івана Пулюя

МОДЕЛЬ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОГО ВМІСТУ ДИСПЕРСНОГО НАПОВНЮВАЧА В ЕПОКСИКОМПОЗИТАХ

Розроблено математичну модель, яка встановлює взаємозв'язок між вхідними факторами: природа, вміст, дисперсність введеного у олігомер наповнювача, та вихідними критеріями: залишкові напруження і руйнівне напруження при згинанні. Врахування кожного із цих критеріїв дає змогу визначити оптимальний вміст наповнювача у композитах з підвищеними експлуатаційними показниками.

Постановка задачі в загальному вигляді та її актуальність. Відомо, що одним із методів перевірки адекватності підібраних критеріїв для побудови математичної моделі при плануванні експерименту є аналіз кореляції між вихідними параметрами моделі. Встановлено, що залежність адгезійної міцності композитних матеріалів (КМ) від вмісту наповнювачів корелює з аналогічною залежністю залишкових напружень від вмісту часток. При цьому залишкові напруження є результатом фізичної і хімічної взаємодії на межі поділу фаз «наповнювач – зв'язувач», яка, у свою чергу, визначає когезійну міцність, а отже і руйнівне напруження при згинанні КМ. Тому важливим є аналіз кореляційної залежності між залишковими напруженнями та руйнівними напруженнями при згинанні з метою визначення критичного вмісту наповнювачів для формування КМ з підвищеними експлуатаційними характеристиками. Врахування таких критеріїв дозволить отримати модель аналізу вхідних та вихідних факторів, яка дасть змогу встановити оптимальний вміст дисперсного наповнювача у КМ.

Аналіз існуючих рішень в області. Авторами показано, що підвищення адгезійної і когезійної міцності на межі поділу фаз досягається при введенні у зв'язувач наповнювачів, у тому числі і дисперсних [1–3]. Однак, дослідженню впливу дисперсності і вмісту наповнювачів різної фізичної природи на властивості КМ приділено недостатньо уваги. Крім того, авторами доведено, що для отримання матеріалів з поліпшеними властивостями у зв'язувач необхідно вводити дисперсний наповнювач за оптимального вмісту. При цьому критичний вміст наповнювача у КМ залежить від хімічної активності та магнітних властивостей часток. Тому актуальними є дослідження впливу природи часток і визначення їх критичного вмісту у КМ на основі розроблених нових теоретичних моделей, які ґрунтуються на попередніх результатах дослідження фізико-механічних властивостей матеріалів. Перевірку адекватності побудованих моделей доцільно проводити на основі аналізу результатів дослідження властивостей матеріалів, наповнених дисперсними частками при критичному вмісті.

Метою проведених досліджень є встановлення оптимального вмісту дисперсного наповнювача у КМ на основі аналізу побудованої моделі, що враховує кореляційну залежність зміни руйнівного напруження при згинанні матеріалів з різним вмістом дисперсних часток від абсолютних значень залишкових напружень.

Викладення основного матеріалу.

Результати дослідження. При дослідженні фізико-механічних властивостей попередньо знаходили абсолютні значення залишкових напружень (σ_z) і руйнівних напружень при згинанні (σ_p) КМ, що містять дисперсні частки різної фізичної природи [4]. Руйнівне напруження при згинанні композитів досліджували на автоматизованому пристрої згідно з ГОСТ 4648-71. Залишкові напруження у покриттях досліджували консольним методом [5].

Формували КМ на основі епоксидного олігомера марки ЕД-20 з твердником поліетиленполіаміном (ТУ 6-05-241-202-78). Як наповнювачі при формуванні КМ використано порошки електрокорунду (ТУ 6-09-426-75), фериту марки 1500 НМЗ, оксиду міді, оксиду хрому (ГОСТ 2912-79), коричневого шламу, цементу марки М 400, карбиду кремнію та карбиду бору з дисперсністю 63 мкм, які вводили при вмісті від 10 до 120 мас. ч. на 100 мас. ч. зв'язувача. Дисперсні наповнювачі газової сажі та технічного графіту (ГОСТ 5420-74) вводили при вмісті від 10 до 80 мас. ч. на 100 мас. ч. зв'язувача.

Затверджували КМ за експериментально встановленим режимом: формування зразків та їх витримка протягом 2 год. При температурі $T = 293 \pm 2$ К, нагрівання зі швидкістю 3 град/хв. до температури $T = 393$ К і витримка протягом 2,0 год., охолодження до температури $T = 293 \pm 2$ К. З метою стабілізації структурних процесів у матриці зразки витримували протягом 60 год. на повітрі при температурі $T = 293 \pm 2$ К.

Результати експериментальних досліджень фізико-механічних властивостей КМ наведено у табл. 1 [4].

Таблиця 1

Вплив природи і вмісту дисперсних часток на залишкові напруження
і руйнівне напруження КМ

Наповнювач	Вміст наповнювача, q, мас. ч.	Залишкові напруження, σ_z , МПа	Руйнівне напруження при згинанні, σ_{zg} , МПа
—	0	7,2	33,2
Газова сажа	10	3,6	43,6
	20	4,8	50,4
	40	5,5	58,2
	60	4,4	62,3
	80	4,0	62,8
	100	3,3	50,8
Технічний графіт	20	4,0	61,4
	40	4,8	68,9
	60	5,6	70,3
	80	5,7	71,5
	100	5,3	48,6
Коричневий шлам	20	3,3	58,2
	40	3,0	75,4
	60	4,5	47,6
	80	3,7	43,3
	100	3,6	58,7
	120	2,7	53,4
	10	6,5	45,2
Ферит	20	5,8	54,8
	40	4,9	78,1
	60	5,1	113,2
	80	5,5	111,6
	100	4,6	98,8
	120	4,2	91,7
	10	6,3	67,5
Оксид хрому	20	5,3	81,2
	40	5,0	70,6
	60	6,0	58,5
	80	5,9	54,3
	100	6,3	53,3
	120	4,8	50,4
	10	5,0	62,4
Оксид міді	20	3,4	78,6
	40	2,8	89,8
	60	4,1	90,5
	80	3,7	110,6
	100	5,3	114,2
	120	5,1	104,3

Закінчення таблиці 1

Наповнювач	Вміст наповнювача, q, мас. ч.	Залишкові напруження, σ_z , МПа	Руйнівне напруження при згинанні, σ_{zg} , МПа
Електрокорунд	10	6,4	47,4
	20	5,5	53,3
	40	4,8	54,1
	60	5,2	58,7
	80	5,0	64,6
	100	4,1	98,2

Цемент	120	4,0	81,3
	10	5,6	59,5
	20	3,8	71,7
	40	2,6	78,4
	60	3,5	65,2
	80	3,7	58,3
	100	3,9	62,6
	120	3,4	71,9

Після побудови за допомогою кубічних сплайнів параметричних залежностей залишкових напружень та руйнівних напружень КМ від вмісту дисперсних наповнювачів встановлено проміжки монотонності обох факторів за параметром вмісту часток у КМ (рис. 1).

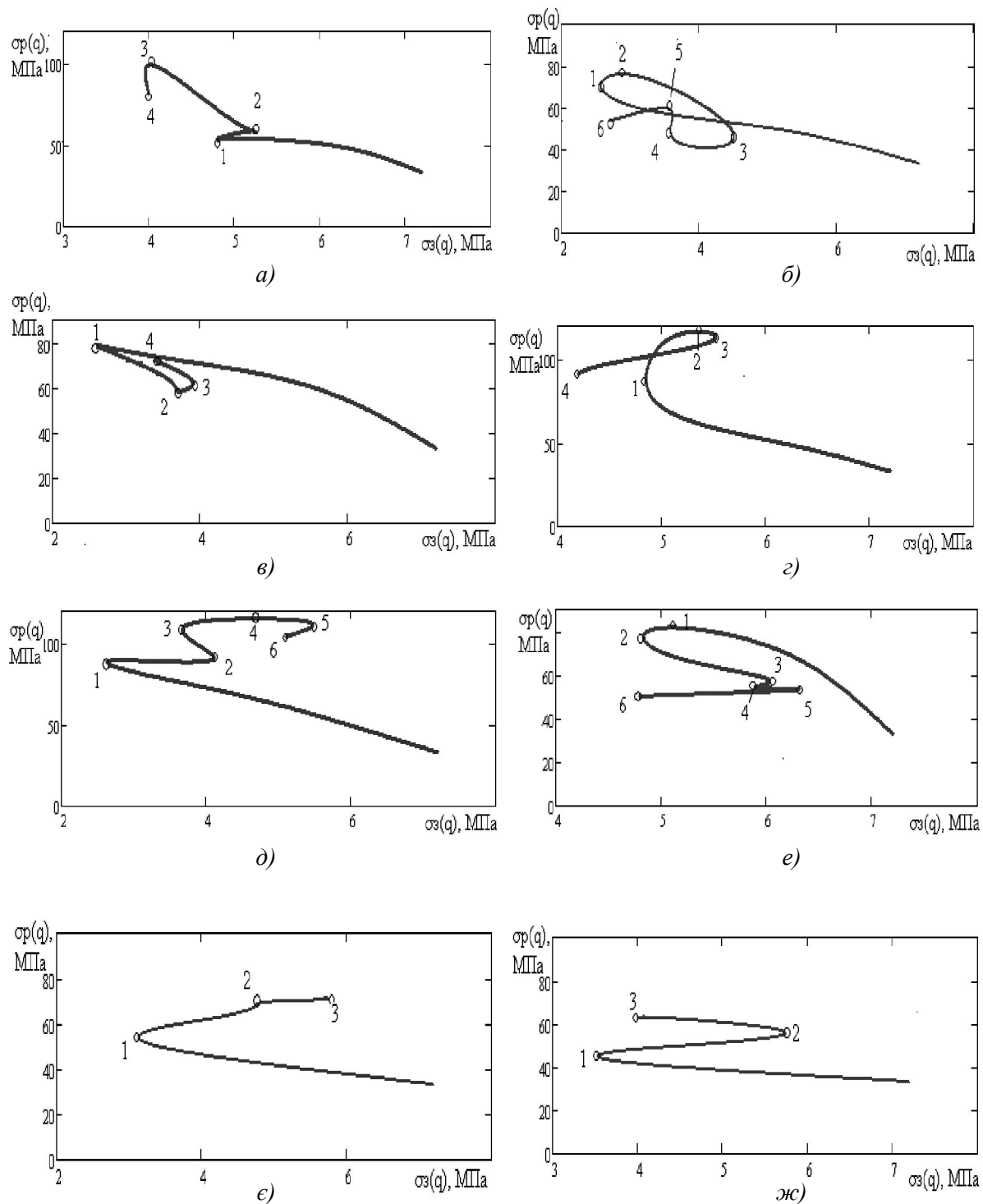


Рис. 1. Графіки параметричних залежностей руйнівних напружень при згинанні $\sigma_p(q)$ від залишкових напружень $\sigma_z(q)$ КМ з дисперсними наповнювачами:

а) електрокорунд; б) коричневий шлам; в) цемент; г) ферит.

Параметрична змінна q – вміст наповнювача у КМ;

д) оксид міді; е) оксид хрому; є) технічний графіт; ж) газова сажка.

Параметрична змінна q – вміст наповнювача у КМ

Моделювання параметричних залежностей фізико-механічних характеристик епоксикомпозитів з дисперсними наповнювачами. На основі результатів дослідження для різних діапазонів вмісту наповнювачів у матриці встановлено критичні значення вмісту наповнювачів у КМ. Критичні точки на графіках кореляційних залежностей залишкових напружень та руйнівних напружень при згинанні визначалися за умови зміни монотонності обох характеристик при збільшенні вмісту наповнювача. Алгоритм знаходження критичних точок на кривих залежності $\sigma_p - \sigma_z$ наведено на рис. 2.

Процес знаходження критичних точок складається з таких етапів. На початку за трьома масивами експериментально визначених даних (σ_p , σ_z , q) будували апроксимації функцій з неперервним аргументом $\sigma_p(q)$, $\sigma_z(q)$, використовуючи кубічні сплайни. На наступному етапі будували параметричні криві $\sigma_p(q) - \sigma_z(q)$ (рис. 1). Далі критичні точки на кривих знаходили за зміною знака хоча б однієї з похідних абсолютних значень показників фізико-механічних властивостей у критичних точках. Вважали, що дві критичні точки $A_i(\sigma_z(q_i), \sigma_p(q_i))$ та $A_j(\sigma_z(q_j), \sigma_p(q_j))$ співпадають за умови, якщо виконується кожна з нерівностей:

$$|\sigma_z(q_i) - \sigma_z(q_j)| < \varepsilon_1, \quad (1)$$

$$|\sigma_p(q_i) - \sigma_p(q_j)| < \varepsilon_2, \quad (2)$$

де ε_1 – допустимі значення різниці значень залишкових напружень у контрольних точках;

ε_2 – допустимі значення різниці значень руйнівних напружень при згинанні у контрольних точках.

Розкид значень при дослідженнях показників залишкових напружень становив 3 % від номінального, тому допустиме значення $\varepsilon_1 = 0,25$ МПа. Аналогічно розкид значень при дослідженнях показників руйнівних напружень при згинанні становив 8 % від номінального, тому допустиме значення $\varepsilon_2 = 4,8$ МПа.

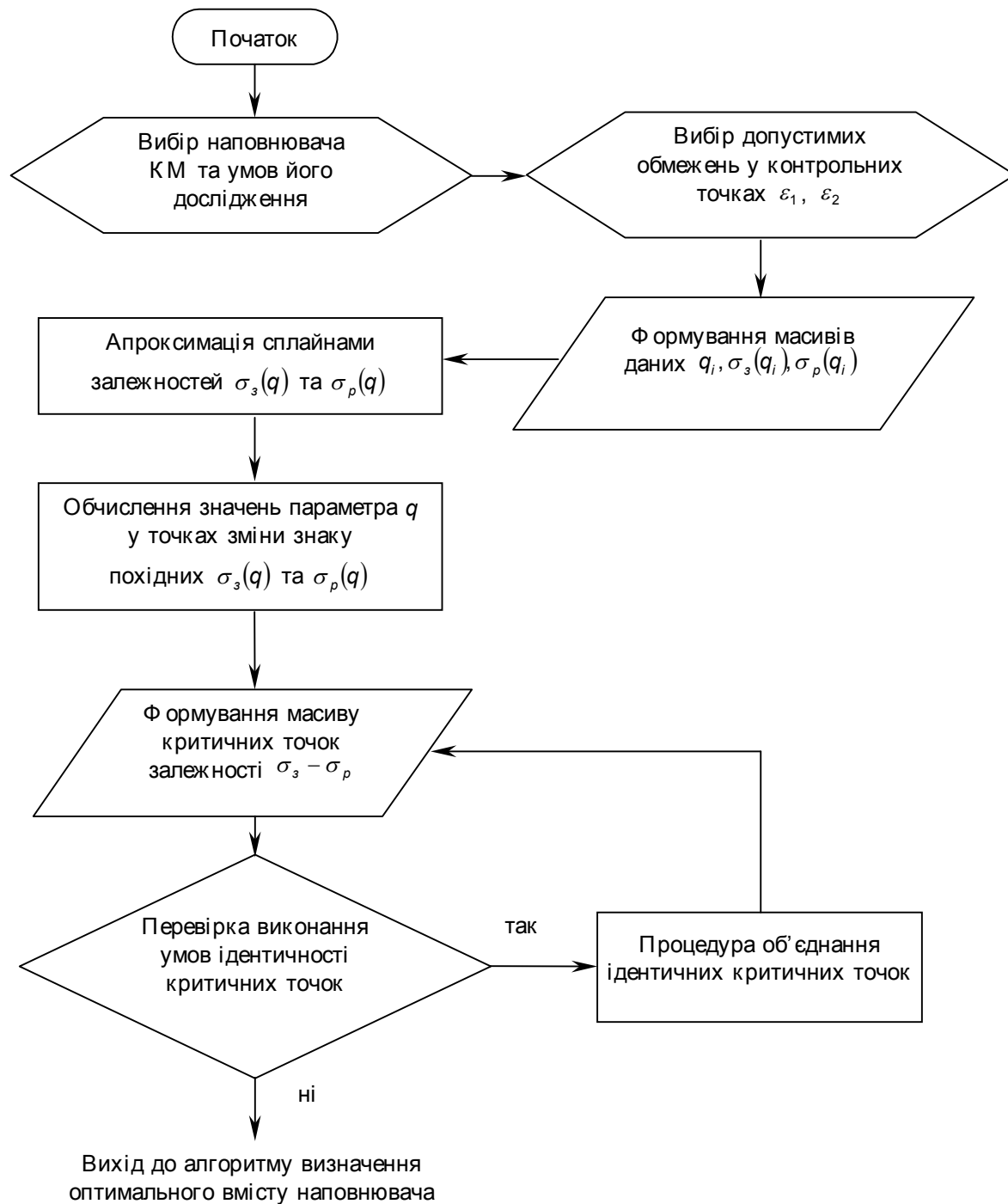


Рис. 2. Блок-схема алгоритму знаходження критичних точок на кривих залежності руйнівного напруження при згинанні від залишкових напружень у КМ

Результати значень σ_p і σ_3 у кожній із критичних точок для КМ з усіма досліджуваними наповнювачами, а також значення оптимального вмісту наповнювача у зв'язувачі наведено у табл. 2.

Таблиця 2

Результати оцінювання значень σ_3 і σ_p у критичних точках вмісту наповнювача

Дисперсний наповнювач	Критичні точки	Вміст наповнювача у КМ, q, мас. ч.	Критичні залишкові напруження, σ_3 , МПа	Критичні руйнівні напруження, σ_p , МПа	Оптимальний вміст наповнювача у КМ, q, мас. ч.
Електрокорунд	1	26,1	4,8	54,1	-
	2	58,6	5,2	58,6	-
	3	81,8	4,0	99,3	81,8
	4	99,3	3,9	81,8	99,3
Коричневий шлам	1	30,3	2,6	70,6	30,3
	2	38,4	2,9	75,7	38,4
	3	62,2	4,5	44,7	-
	4	82,8	3,6	45,3	-
	5	103,8	3,5	59,4	-
	6	120,0	2,7	53,5	-
Цемент	1	33,8	2,6	78,7	33,8
	2	80,0	3,7	58,3	-
	3	98,7	3,9	62,1	-
	4	119,4	3,4	71,6	-
Ферит	1	45,4	4,9	88,3	-
	2	68,4	5,3	116,8	68,4
	3	77,9	5,5	113,9	77,9
	4	118,2	4,2	92,2	-
Оксид міді	1	34,6	2,6	88,9	-
	2	40,2	4,1	90,9	-
	3	79,4	3,7	110,1	79,4
	4	92,8	4,7	115,4	92,8
	5	107,2	5,5	111,1	107,2
	6	119,8	5,1	104,4	-
Оксид хрому	1	23,1	5,1	81,8	23,1
	2	32,2	4,8	77,4	32,2
	3	61,9	6,0	57,8	-
	4	76,1	5,9	54,7	-
	5	97,2	6,3	53,5	-
	6	120,0	4,8	50,4	-
Технічний графіт	1	12,9	3,5	45,5	12,9
	2	32,2	5,7	55,7	32,2
	3	68,0	4,0	62,8	-
Газова сажа	1	12,3	3,5	45,5	-
	2	32,2	5,7	55,7	-
	3	68,0	4,0	62,8	68,0

Вибираючи оптимальний вміст наповнювача на основі аналізу значень руйнівного напруження при згинанні і залишкових напружень у аналітично встановлених критичних точках, керувались такими положеннями [6]. Використовуючи методи задач класифікації об'єктів, описували навколо критичних точок прямокутник із сторонами, паралельними до осей координат. Отриману фігуру ділили на чотири прямокутники відрізками, що проходять через середини сторін даного прямокутника, на перетині яких знаходиться точка умовного нуля С з координатами C_1 і C_2 (рис. 3). В результаті отримали чотири квадранти матриці значущості. Виходили з умови, що у КМ з поліпшеними фізико-механічними властивостями залишкові напруження повинні бути близькими до нуля, а показники руйнівного напруження при згинанні – максимальними [3]. Тоді перший за значущістю квадрант буде знаходитись у верхньому лівому куті прямокутника. Дані квадранти знаходяться за значущістю у такій послідовності: II, III, IV. Зазначимо, що вибрані фактори фізико-механічних властивостей приймали рівними за значущістю. На наступному етапі знаходили міру близькості кожної точки до умовного нуля (С), починаючи з першого квадранта. Шуканою критичною точкою, що визначає оптимальний вміст наповнювача у КМ, вважали таку, відстань від якої до умовного нуля була найбільшою. Крім того, зазначимо, що міру близькості критичних точок до умовного нуля визначали за формулою:

$$r_i = \sqrt{(\sigma_p(q_i) - C_1)^2 + (\sigma_3(q_i) - C_2)^2}. \quad (3)$$

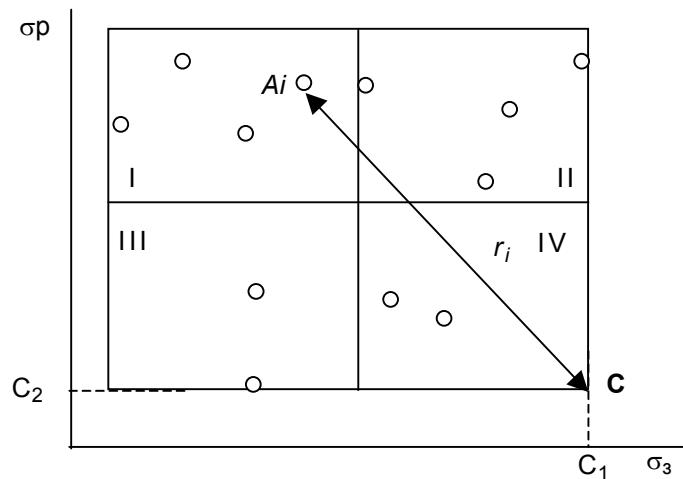


Рис. 3. Схема побудови матриці переваг для знаходження оптимального вмісту наповнювача у КМ

У випадку відсутності критичних точок у квадранті аналізували наступний за значущістю квадрант. Алгоритм знаходження оптимального вмісту наповнювачів у КМ з поліпшеними властивостями згідно з методом побудови матриці переваг наведено на рис. 4.

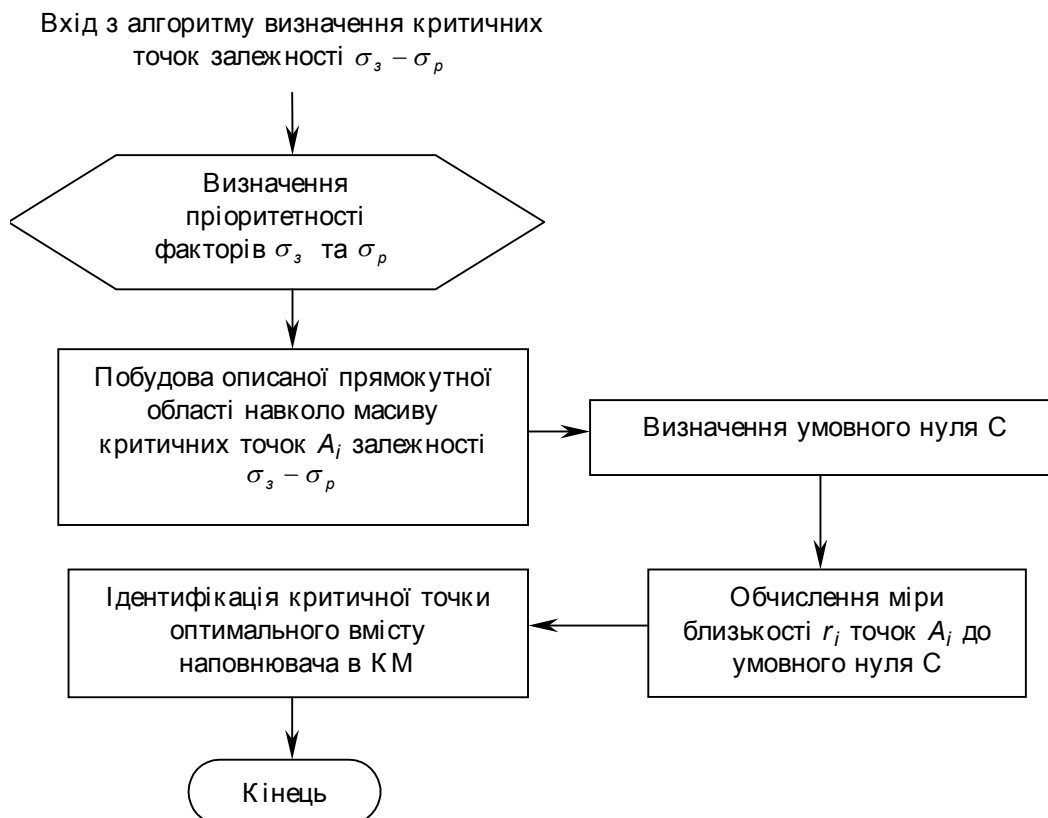


Рис. 4. Блок-схема алгоритму знаходження оптимального вмісту наповнювачів у КМ

Виходячи з використаного математичного апарата і описаної моделі, у роботі встановлено оптимальний вміст наповнювача у КМ з підвищеними експлуатаційними характеристиками (табл. 2). Водночас при оцінюванні критичного вмісту наповнювача у КМ необхідно враховувати фізичну природу інгредієнтів композиції і явища фізико-хімічної взаємодії при структуроутворенні матеріалів. Тобто при різному вмісті часток у КМ змінюються умови перебігу фізико-хімічних процесів взаємодії на межі поділу фаз, внаслідок чого навколо наповнювача утворюються зовнішні поверхневі шари (ЗПШ). Саме характер структуроутворення таких шарів у зв'язувачі і визначає критичний вміст наповнювача у матеріалі. При цьому можливий механізм структуроутворення КМ, коли при різному вмісті наповнювача

матеріал матриці майже повністю переходить у стан ЗПШ. Тобто передбачено утворення КМ з підвищеними характеристиками при різному вмісті одного і того ж наповнювача [7]. Дані положення можна пояснити на прикладі декількох КМ з досліджуваними наповнювачами.

Для КМ з феритом існує дві критичні точки з параметрами, близькими до оптимального вмісту наповнювача (рис. 1, *з*). На графіку залежності залишкових напружень (σ_z) від руйнівного напруження при згинанні (σ_p) при досягненні вмісту у КМ наповнювача $q_2 = 68,4$ мас.ч. на 100 мас.ч. зв'язувача та при $q_3 = 77,9$ мас.ч. на 100 мас.ч. зв'язувача спостерігали перегини. Внаслідок збільшення вмісту наповнювача в точці 2 до стану в точці 3 зростали показники залишкових напружень на $\Delta\sigma_z = 3,6$ %, а руйнівне напруження при згинанні зменшувались лише на $\Delta\sigma_p = 2,4$ %, тобто дана точка є лише точкою перегину і не може бути віднесена до точки оптимуму. Точка 3 є близькою до крайової точки 4 на кривій і в її околі, при збільшенні вмісту наповнювача, показники руйнівних напружень зменшуються на $\Delta\sigma_z = 22$ %, при цьому залишкові напруження також спадають на $\Delta\sigma_p = 31$ %. Введення дисперсного наповнювача при такому оптимальному вмісті $q_{opt} = 118,0$ мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомера забезпечує утворення КМ з невисокими, порівняно з вмістом наповнювача у критичній точці 2, показниками когезійної міцності матеріалу $\sigma_p = 92,2$ МПа, а значення напружень при цьому становлять $\sigma_z = 4,2$ МПа. Отже, можна зробити висновок, що з усіх встановлених при моделюванні критичних точок вмісту наповнювача у КМ з феритом оптимальним є критичний вміст дисперсних часток у зв'язувачі – $q_2 = 68,4$ мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомера марки ЕД-20 (оптимальну точку критичного вмісту часток у КМ у табл. 2 виділено жирним шрифтом).

Також показано, що для КМ, наповненого електрокорундом введення, у зв'язувач часток електрокорунду спричиняє появу на кривій залежності залишкових напружень (σ_z) від руйнівного напруження при згинанні (σ_p) двох критичних точок з параметрами, близькими до оптимального вмісту наповнювача (рис. 1, *а*). На даній кривій при досягненні вмісту у КМ наповнювача $q_3 = 81,8$ мас. ч. на 100 мас. ч. зв'язувача (точка 3) спостерігали перегин. При збільшенні вмісту наповнювача від точки 3 до точки 4 спостерігали незначне зменшення залишкових напружень на $\Delta\sigma_z = 2,5$ % і водночас зменшувались показники руйнівного напруження при згинанні на $\Delta\sigma_p = 17,6$ %. Тому є всі підстави вважати, що оптимальним критичним вмістом наповнювача електрокорунду у КМ є $q_3 = 81,8$ мас. ч. на 100 мас. ч. епоксидного олігомера. При такому вмісті наповнювача у КМ залишкові напруження у матриці становлять $\sigma_z = 4,0$ МПа, а руйнівне напруження при згинанні матеріалів – $\sigma_p = 99,3$ МПа.

Показано, що для КМ, наповнених оксидом міді, існує три точки критичного вмісту наповнювача з параметрами, близькими до оптимального вмісту наповнювача (рис. 1, *д*). Тобто на кривій залежності залишкових напружень (σ_z) від руйнівного напруження при згинанні (σ_p) при досягненні вмісту у КМ часток оксиду міді $q_3 = 79,4$ мас.ч. на 100 мас. ч. ЕД-20 спостерігали перегин, внаслідок чого при збільшенні вмісту наповнювача до точки 4 зростали показники залишкових напружень на $\Delta\sigma_z = 27,3$ %, а показники руйнівного напруження при згинанні зростали на $\Delta\sigma_p = 4,8$ % (табл. 2). Далі при збільшенні вмісту часток у матеріалі до критичної точки 5 ($q = 107,2$ мас. ч. на 100 мас. ч. зв'язувача) спостерігали (порівняно з властивостями КМ, наповнених частками при вмісті $q = 92,8$ мас. ч. на 100 мас. ч. зв'язувача) водночас збільшення залишкових напружень на $\Delta\sigma_z = 17,0$ % і зменшення показників руйнівних напружень при згинанні на $\Delta\sigma_p = 3,7$ %. Отримані результати дослідження свідчать про погіршення у комплексі властивостей матеріалів при подальшому збільшенні вмісту наповнювача у КМ. Це свідчить про недоцільність збільшення вмісту наповнювача для подальшого поліпшення властивостей матеріалу. Виходячи з вищенаведеного, можна констатувати, що з усього спектра досліджених критичних точок вмісту наповнювача у КМ, важливими, з наукової і практичної точок зору, є дві (точка 3 і точка 4). Введення часток при вмісті $q = 79,4$ мас. ч. на 100 мас. ч. зв'язувача забезпечує отримання КМ з невисокими показниками залишкових напружень, порівняно з іншими досліджуваними матеріалами. Введення більшого вмісту наповнювача до $q = 92,8$ мас. ч. на 100 мас. ч. епоксидного олігомера хоча і приводить до підвищення когезійної міцності матеріалів (руйнівне напруження при згинанні зростає), проте не суттєво. Отже, аналізуючи результати дослідження зміни руйнівного напруження при згинанні КМ від залишкових напружень і враховуючи при цьому вартість дисперсних часток оксиду міді, можна стверджувати, що оптимальним критичним вмістом часток наповнювача оксиду міді у КМ є $q = 79,4$ мас. ч. на 100 мас. ч. епоксидного олігомера. При такому вмісті дисперсних часток руйнівне напруження при згинанні КМ становить $\sigma_p = 110,1$, а залишкові напруження мають такі показники – $\sigma_z = 3,7$ МПа. Введення дисперсного наповнювача при такому оптимальному вмісті забезпечує утворення КМ з підвищеними показниками когезійної міцності матеріалу і незначними залишковими напруженнями.

Аналогічно до наведених вище прикладів у роботі встановлено оптимальний критичний вміст наповнювачів усіх досліджуваних КМ. Результати оптимізації критичного вмісту часток для матеріалів з наповнювачами різної фізичної природи наведено у табл. 2.

Отже, при встановленні критичного вмісту наповнювача у КМ слід враховувати як результати моделювання, що ґрунтуються на експериментальних результатах дослідження, так і явища фізико-

хімічної взаємодії на межі поділу фаз, які забезпечують формування ЗПШ. Водночас при виборі з двох (або кількох) критичних точок оптимальної слід враховувати не лише показники досліджуваних властивостей, але й економічні критерії, такі як вартість наповнювача, його поширеність в межах України та доступність, і вимоги екологічної безпеки.

Висновки. У роботі розроблено модель і алгоритм її функціонування для знаходження критичного вмісту наповнювача у КМ з підвищеними експлуатаційними характеристиками. На основі нового підходу і розробленої методики встановлено оптимальний вміст досліджуваних дисперсних часток у композитах. Показано, що залежно від природи наповнювача можуть існувати декілька точок критичного вмісту часток. При визначенні оптимального вмісту наповнювача у цьому випадку враховували явища фізичної і хімічної взаємодії на межі поділу фаз при структуроутворенні матеріалів у зовнішніх поверхневих шарах, а також природу, вміст і дисперсність часток. Крім того, аналіз розробленої моделі дозволяє передбачити показники фізико-механічних властивостей при оптимальному вмісті наповнювача у КМ.

ЛІТЕРАТУРА:

1. *Князев В.К.* Эпоксидные конструкционные материалы в машиностроении. – М.: Машиностроение, 1977. – 179 с.
2. *Арсланов В.В., Функе В.А.* Повышение водостойкости органических покрытий с помощью тонкого адгезионного слоя // Защита металлов. – 1989. – Т. 25. – № 3. – С. 427–432.
3. *Тростянская Е.Б., Бабаевский П.Г., Кулик С.Г., Чалых А.Е., Павленко А.А.* Влияние поверхности наполнителя на реализацию эффекта эластификации полимерной матрицы в повышении вязкости разрушения композиционных материалов // Композиц. Полимер. Материалы. – 1984. – В.21. – С. 21–27.
4. *Стухляк П.Д., Букетов А.В., Добротвор І.Г.* Епоксикомпозитні матеріали, модифіковані енергетичними полями. – Тернопіль: Збруч, 2008. – 208 с.
5. *Корякина М.И.* Испытание лакокрасочных материалов и покрытий. – М.: Химия, 1988. – 272 с.
6. *Айвазян С.А., Бежаева З.И., Староверов О.В.* Классификация многомерных наблюдений. – М.: Статистика, 1974. – 249 с.
7. *Букетов А.В., Стухляк П.Д., Бадищук В.І.* Вплив активності наповнювача на властивості епоксидних матеріалів // Вісник ТДТУ. – 2003. – № 4. – С. 12–20.

ДОБРОТВОР Ігор Григорович – кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій Тернопільського державного технічного університету імені Івана Пулюя, кандидат фізико-математичних наук, доцент.

Наукові інтереси:

- комп'ютерно-інформаційні технології;
- математичне моделювання;
- цифрова обробка зображень.

СТУХЛЯК Петро Данилович – професор, завідувач кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій Тернопільського державного технічного університету імені Івана Пулюя, доктор технічних наук, професор.

Наукові інтереси:

- комп'ютерно-інформаційні технології;
- математичне моделювання;
- цифрова обробка зображень.

БУКЕТОВ Андрій Вікторович – професор кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій Тернопільського державного технічного університету імені Івана Пулюя, доктор технічних наук, професор.

Наукові інтереси:

- комп'ютерно-інформаційні технології;
- математичне моделювання;
- цифрова обробка зображень.

Подано 08.12.2008

Добротвор І.Г., Стухляк П.Д., Букетов А.В. Модель для визначення оптимального вмісту дисперсного наповнювача у епоксикомпозитах.

Добротвор И.Г., Стухляк П.Д., Букетов А.В. Модель для определения оптимального содержания дисперсного наполнителя в эпоксикомпозитах.

Dobrotvor I.G., Stuhljak P.D., Buketov A.V. Model of the optimal disperse filler contents detection in the epoxicomposites.

УДК 667.64:678.026

Модель для определения оптимального содержания дисперсного наполнителя в эпоксикомпозитах / И.Г. Добротвор, П.Д. Стухляк, А.В. Букетов //

Разработано математическую модель, которая устанавливает взаимосвязь между входящими факторами, такими как природа, состав, дисперсность введенного в олигомер наполнителя и исходящими критериями, какими были остаточные напряжения и напряжения разрушений при изгибе. Взаимный учет каждого из этих критериев дает возможность определить оптимальное содержание наполнителя в композитах с повышенными эксплуатационными показателями.

УДК 667.64:678.026

Model of the optimal disperse filler contents detection in the epoxicomposites / I.G. Dobrotvor, P.D. Stuhljak, A.V. Buketov //

The mathematical model establishing ties between input and output factors such as nature, contents, disperse sizes of fillers in the oligomer and remaining tensions, destroying tensions in material was build in the article. Common assuming both of these criteria takes us possibility of the fillers content optimal detection in the epoxicomposites with high exploitations marks.