

А.В. Букетов¹, А.В. Шарко¹, Д.А. Зинченко¹, Д.М. Степанчиков²¹Херсонская государственная морская академия, Украина;²Херсонский национальный технический университет, Украина

(E-mail: denim102@bk.ru)

К вопросу оптимизации ингредиентов композитных материалов на основе эпоксидной смолы

Разработан алгоритм многокритериальной оптимизации содержания ингредиентов защитных покрытий на основе анализа изменений показателей разрушающих напряжений, модуля упругости при изгибе, теплостойкости, термостойкости и температурного коэффициента линейного расширения. Методом отбора через упорядочение объектов по образцу определено наиболее оптимальное содержание двухкомпонентного дисперсного наполнителя в эпоксидном композитном материале. Установлено, что введение двух наполнителей разной дисперсности улучшает физико-механические и теплофизические свойства материалов. Доказано, что для разработанной матрицы на основе эпоксидного олигомера ЕД-20 (100 масс. ч.) и отвердителя ПЕПА (10 масс. ч.) оптимальное содержание двухкомпонентного наполнителя составляет дисульфид молибдена – 80 масс. ч., микроталька – 80 масс. ч., карбоната серебра – 0,5 масс. ч.

Ключевые слова: эпоксидный композит, ударная вязкость, модуль упругости, деструкция, оптимизация, компонентный наполнитель.

Постановка проблемы. На сегодня важной проблемой является создание конструкционных материалов, в том числе и полимерных, с необходимым комплексом улучшенных свойств [1]. Решают данную проблему за счет выбора диапазона содержания наполнителей в материалах, что достигается использованием метода многокритериальной оценки показателей физико-механических и теплофизических свойств материалов и методом скаляризации векторных оценок (метод отбора через упорядочение объектов по образцу).

Анализ последних исследований и публикаций. Одним из методов улучшения свойств композитных материалов (КМ) на основе эпоксидной матрицы является введение в связующее различных по природе и дисперсности наполнителей. Предварительно нами было исследовано влияние наполнителей различной природы и дисперсности на физико-механические и теплофизические свойства КМ [2–5]. Установлено оптимальное содержание микродисперсных (7...10 мкм) и нанодисперсных (100...500 нм) частиц наполнителей различной природы для формирования покрытий разного функционального назначения с повышенными эксплуатационными характеристиками. В плане оптимизации содержания двухкомпонентного наполнителя необходимой является многокритериальная оценка состава ингредиентов КМ (эпоксидная смола+отвердитель+нанонаполнитель+микронаполнитель), так как содержание и тип ингредиентов существенно влияют на характеристики КМ. Для такой оптимизации предлагается использование алгоритмов нечеткой логики на примере создания материалов с повышенными показателями исследуемых свойств [5–7].

Цель работы — определить наиболее оптимальную массовую часть наполнителя, используя многокритериальные методы выбора для его каждого типа.

Обсуждение экспериментальных результатов исследования

В результате проведенных ранее экспериментов получены наборы дискретных значений физико-механических (W — ударная вязкость; $\sigma_{изг}$ — разрушающие напряжения при изгибе; E — модуль упругости при изгибе) и теплофизических свойств (T — теплостойкость по Мартенсу; α — термический коэффициент линейного расширения, T_0 — температура начала деструкции) при различных массовых частях наполнителя. Рассматривали три наполнителя: дисульфид молибдена (ДМ), карбонат серебра (КС), микротальк (МТ). Исходные данные представлены в таблице 1. С точки зрения прикладного применения полезным является максимизация следующих параметров: W , $\sigma_{изг}$, E , T , T_0 и минимизация параметра α .

Дискретные значения параметров физико-механических и теплофизических свойств композитных материалов, наполненных дисульфидом молибдена, микротальком, карбонатом серебра

Содержание наполнителей q_1, q_2, q_3 , масс.ч.	$\sigma_{изг.}$, МПа	E , ГПа	T , К	W , кДж/м ²	$\alpha^\circ \times 10^{-5}$, К ⁻¹	T_0 , К
Приоритет	1(max)	2(max)	3(max)	4(max)	5(min)	6(max)
Дисульфид молибдена (q_1)						
0	48,00	2,9	341	7,27	10,3	615,7
5	39,48	2,98	361	14,27	10,1	593,0
10	38,34	3,09	372	13,16	10,2	591,8
15	35,65	3,28	373	13,08	9,82	586,8
20	33,80	3,47	373	8,56	9,76	583,2
30	31,47	3,56	373	8,38	9,37	585,7
40	29,78	3,72	374	7,92	8,40	583,0
50	29,61	3,8	374,5	7,47	8,08	578,6
60	29,58	3,9	376	7,45	7,11	555,9
80	29,46	3,98	379	7,07	6,94	568,4
Микротальк (q_2)						
5	46,12	3,47	362	8,71	11,02	617,9
10	39,11	3,89	364	9,35	9,52	615,7
15	35,09	4,22	365	10,04	9,64	610,2
20	33,06	4,52	367	9,42	9,39	612,2
30	31,46	4,87	369	8,02	9,73	614,5
40	30,07	5,25	371,5	7,51	9,93	613,1
50	30,02	5,71	372,5	7,03	9,69	620,8
60	30,02	5,94	375	6,53	7,97	621,1
80	29,99	6,63	382	6,01	8,25	621,4
Карбонат серебра (q_3)						
0,025	33,63	3,34	358	7,48	7,78	611,8
0,050	34,88	3,21	358	7,49	8,03	595,7
0,100	69,42	3,11	359	7,90	8,49	618,1
0,250	63,20	3,17	358	9,51	7,87	624,3
0,500	60,10	3,39	358	15,30	6,84	610,4
1,000	120,41	2,51	360	6,60	6,9	615,6

Теоретические основы решения

Для решения поставленной задачи применяется один из методов скаляризации векторных оценок – метод отбора через упорядочение объектов по образцу [8]. При этом необходимо перейти от векторных к скалярным оценкам объектов. Простейшей скалярной функцией, обеспечивающей получение линейного порядка объектов, является функция штрафов, формируемая относительно экстремальных значений признаков:

$$F(y_i) = \sum_{j=1}^n \Delta y_{ij}, \tag{1}$$

где под отклонением Δy_{ij} от идеальной цели по j -му признаку понимается абсолютное значение разности $\Delta y_{ij} = |y_i - c_{j,extr}|$, в которой идеальная цель при максимизации j -го признака определяется как $c_{j,extr} = y_{j,max}$, а при его минимизации – как $c_{j,extr} = y_{j,min}$. Условием правильного применения функции (1) является использование общей шкалы (в общем случае – абсолютной) для измерения всех признаков.

Под образцом понимается класс объектов, характеризуемый обобщённой целью $h = (c_1, \dots, c_1, \dots, c_n)$. Введем меру обобщенного отклонения от цели, которая позволяет не только найти объект, ближайший к образцу, но и упорядочить по удаленности от цели. Рассмотрим образец, чьи свойства формируются ограничениями по равенству ($y_j = c_j$). Отклонение j -го признака в любую сторону от точки c_j ($c_j \pm \Delta y + j$) определяет меру удаленности по этому признаку объекта от цели. Определим относительное отклонение j -го признака от цели как

$$\delta y_{ij} = \begin{cases} \frac{|y_{ij} - c_j|}{y_{j,\max} - c_j}; & y_{ij} > c_j; \\ \frac{|y_{ij} - c_j|}{c_j - y_{j,\min}}; & y_{ij} < c_j, \end{cases} \quad (2)$$

где i — номер строки; j — номер столбца в матрице (3).

В качестве параметров c_j можно выбрать максимальные значения экспериментальных физико-механических параметров (ударная вязкость, разрушающие напряжения, модуль упругости, теплостойкость, температура начала деструкции) и минимальные значения экспериментальных физико-механических параметров (ТКЛР) из таблицы 1. При таком подходе формула (2) переведет размерные величины в относительные в пределах шкалы (0, 1). Однако при таком выборе параметров c_j обязательно будут наблюдаться совпадения элементов анализируемой матрицы с величиной c_j , что будет соответствовать $\delta y_{ij} = 0$. При использовании аддитивной свертки (4) это приводит к исключению соответствующего признака из общей оценки объекта, а при использовании мультипликативных свертки (5, 6) — к их обнулению. Очевидным способом исключения таких ситуаций является расширение верхней (для максимума) и нижней (для минимума) границы каждого признака c_j в одинаковом процентном соотношении [8]. Ниже максимальные (минимальные) значения каждого из шести экспериментальных физико-механических параметров c_j были увеличены (уменьшены) на 1 % (табл. 2).

Таблица 2

Увеличенные (уменьшенные) на 1 % дискретные значения физико-механических и теплофизических параметров композитных материалов

	W , кДж/м ²	$\sigma_{\text{изг}}$, МПа	E , ГПа	T , К	$\alpha \times 10^{-5}$, К ⁻¹	T_0 , К
extr	15,30	120,41	6,63	382,00	6,84	624,30
c_j	15,45	120,61	6,70	385,82	6,77	630,54

В результате применения формулы (2) для каждого типа наполнителя получаем матрицы вида

$$R = \begin{pmatrix} q_1 & \delta y_{11} & \delta y_{12} & \dots & \delta y_{1n} \\ q_2 & \delta y_{21} & \delta y_{22} & \dots & \delta y_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ q_m & \delta y_{m1} & \delta y_{m2} & \dots & \delta y_{mn} \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где $q_1, \dots, q_i, \dots, q_m$ — массовое число наполнителя; $P_1, \dots, P_j, \dots, P_n$ — физико-механические параметры.

Для выполнения скалярной оптимизации требуются дополнительные знания о свойствах обобщающих функций, шкалах признаков и их весовых коэффициентах. Поскольку эти знания являются экспертными, упорядочение объектов в n - мерном пространстве не может быть однозначным. Поэтому важным является изучение влияния на результаты оптимизации свойств обобщающих функций, шкал признаков и весовых коэффициентов.

При теоретическом анализе были использованы следующие обобщающие многокритериальные функции полезности.

Аддитивная свертка [8]:

$$\delta y_i = \sum_{j=1}^n \omega_j \delta y_{ij}, \quad (4)$$

где ω_j — важность (весовой коэффициент) j -го признака, $\sum_{j=1}^n \omega_j = 1$.

Степенная мультипликативная свертка [8]:

$$\delta y_i = \prod_{j=1}^n (\delta y_{ij})^{\omega_j}. \quad (5)$$

Дополнительная мультипликативная свертка [8]:

$$\delta y_i = 1 - \prod_{j=1}^n (1 - \omega_j \delta y_{ij}). \quad (6)$$

Наилучшим считается объект, обладающий минимальным значением функций (4–6).

Критерий Сэвиджа (Вальда) (минимальный максимум) [9, 10]:

$$Z_v = \min_i \max_j \delta y_{ij}. \quad (7)$$

Критерий Лапласа (минимальный минимум) [9, 10]:

$$Z_L = \min_i \min_j \delta y_{ij}. \quad (8)$$

Критерий Гурвица [9, 10]:

$$Z_{hw} = \min_i \left\{ \rho \min_j \delta y_{ij} + (1 - \rho) \max_j \delta y_{ij} \right\}, \quad (9)$$

где $0 \leq \rho \leq 1$ — показатель пессимизма, при расчетах полагаем равным 0,5.

Аддитивная обобщающая функция (4) синтезирует «объемный» показатель объекта. Он отражает суммарную величину частных показателей с учетом важности. Прямая мультипликативная функция (5) отдает предпочтение объектам с равномерными оценками по всем показателям, т.е. отражает равномерность частных показателей. Дополнительная мультипликативная функция (6) имеет обратное свойство. Критерий Сэвиджа (7) является перестраховочным критерием, использование которого заключается в получении максимального гарантированного результата при наихудших условиях – ориентация на минимизацию риска. Критерий Лапласа (8) определяет стратегию, максимизирующую выигрыш (минимизирующую минимальный риск). Это критерий крайнего оптимизма. Критерий Гурвица (9) при выборе решения рекомендует руководствоваться некоторым средним результатом, характеризующим состояние между крайним пессимизмом и крайним оптимизмом.

Результаты и их анализ

Расчеты проведены в системе компьютерной математики «Maple 9.» В таблице 3 представлены результаты расчетов по формулам (4–9) для различных значений важности j -го признака.

Таблица 3

Анализ результатов (отбор через упорядочение объектов по образцу)

Наполнители	Критерии/оптимальная, масс.ч.					
	аддитивная свертка	мультипликативная свертка	дополнительная мультипликативная свертка	критерий Сэвиджа (Вальда)	критерий Лапласа	критерий Гурвица
ДМ	80 ¹⁾	80 ¹⁾	80 ¹⁾	15	80	80
МТ	80 ¹⁾	80 ¹⁾	80 ¹⁾	10	80	80
КС	0,5 ¹⁾	0,5 ¹⁾	0,5 ¹⁾	0,5	1	0,5

Расчитанные по формуле (2) матрицы для каждого типа наполнителя представлены в таблице 4. Расчеты проведены в предположении, что все критерии имеют одинаковую важность.

Таблица 4

Рассчитанные по формуле (2), (3) матрицы, наполненные дисульфидом молибдена, микротальком, карбонатом серебра

Наполнители												
Дисульфид молибдена (q_1)												
1	ω	0,167	0,167	0,167	0,167	0,167	0,167	min	max	y_a	y_{ms}	y_{md}
2	$q_{1,2,3}$	$\sigma_{изг}$	E	T	W	α	T_0					
3	0	0,798	1,000	1,000	0,976	1,000	0,189	0,189	1,000	0,829	0,726	0,594
4	5	0,891	0,979	0,556	0,142	0,943	0,500	0,142	0,979	0,670	0,565	0,514
5	10	0,904	0,950	0,311	0,273	0,972	0,514	0,273	0,972	0,656	0,575	0,506
6	15	0,933	0,900	0,289	0,285	0,864	0,581	0,285	0,933	0,643	0,571	0,498
7	20	0,953	0,850	0,289	0,823	0,847	0,635	0,289	0,953	0,733	0,685	0,545
8	30	0,978	0,826	0,289	0,845	0,737	0,595	0,289	0,978	0,712	0,665	0,534
9	40	0,997	0,784	0,267	0,899	0,462	0,635	0,267	0,997	0,675	0,616	0,515
10	50	0,999	0,763	0,267	0,953	0,371	0,689	0,267	0,999	0,675	0,606	0,515
11	60	0,999	0,737	0,222	0,955	0,0963	1,000	0,0963	1,000	0,669	0,496	0,514
12	80	1,000	0,716	0,156	1,000	0,0482	0,838	0,0482	1,000	0,628	0,406	0,493
		Vald	Laplas	Hurwitz								
		0,933	0,0482	0,524								
Микротальк (q_2)												
1	0	0,802	1,000	1,000	0,867	0,835	0,700	0,700	1,000	0,869	0,860	0,609
2	5	0,823	0,850	0,533	0,715	1,000	0,600	0,533	1,000	0,754	0,736	0,554
3	10	0,900	0,739	0,489	0,648	0,650	0,700	0,489	0,900	0,689	0,676	0,520
4	15	0,944	0,653	0,467	0,580	0,678	1,000	0,467	1,000	0,722	0,694	0,539
5	20	0,966	0,574	0,422	0,641	0,619	0,900	0,422	0,966	0,688	0,661	0,520
6	30	0,984	0,482	0,378	0,788	0,700	0,800	0,378	0,984	0,690	0,654	0,521
7	40	0,999	0,382	0,311	0,842	0,747	0,850	0,311	0,999	0,691	0,631	0,523
8	50	1,000	0,261	0,311	0,893	0,690	0,450	0,261	1,000	0,602	0,530	0,474
9	60	1,000	0,200	0,244	0,945	0,284	0,450	0,200	1,000	0,521	0,424	0,426
10	80	1,000	0,0184	0,0889	1,000	0,350	0,450	0,0184	1,000	0,485	0,252	0,406
		Vald	Laplas	Hurwitz								
		0,900	0,0184	0,509								
Карбонат серебра (q_3)												
1	0	0,835	0,907	1,000	0,925	1,000	0,412	0,412	1,000	0,847	0,812	0,601
2	0,025	1,000	0	0,622	0,901	0,286	0,529	0,286	1,000	0,691	0,638	0,523
3	0,050	0,985	0,833	0,622	0,900	0,357	1,000	0,357	1,000	0,784	0,740	0,571
4	0,100	0,590	0,857	0,600	0,854	0,487	0,353	0,353	0,857	0,625	0,596	0,484
5	0,250	0,661	0,842	0,622	0,673	0,312	0,176	0,176	0,842	0,548	0,482	0,441
6	0,500	0,697	0,790	0,622	0,0225	0,0198	0,588	0,0198	0,790	0,457	0,210	0,385
7	1,000	0,0114	1,000	0,578	1,000	0,0368	0,412	0,0114	1,000	0,508	0,215	0,421
		Vald	Laplas	Hurwitz								
		0,790	0,0114	0,405								

Примечание. y_a — аддитивная свертка; y_{ms} — мультипликативная свертка; y_{md} — дополнительная мультипликативная свертка; ω — важность.

С использованием обобщающих функций (4-6) составлен окончательный рейтинг массовых частей для каждого наполнителя, представленный в таблице 5 (рассматривали только аддитивную и мультипликативную свертки).

Окончательный рейтинг по массовому содержанию каждого наполнителя

Наполнители	Критерии/оптимальная, масс.ч.			
	Ранг	Аддитивная свертка ¹⁾	Мультипликативная свертка ¹⁾	Дополнительная мультипликативная свертка*
ДМ	1	80	80	80
	2	15	60	10
	3	10	5	60; 5
	4	5	10	40; 50
МТ	1	80	80	80
	2	60	60	60
	3	50	50	50
	4	20	40	20; 10
КС	1	0,500	0,500	0,500
	2	1,000	1,000	1,000
	3	0,250	0,250	0,250
	4	0,100	0,100	0,100

Примечание. $*\omega(W) = \omega(\sigma_{873}) = \omega(E) = \omega(T) = \omega(\alpha) = \omega(\Delta l) = \omega(\varepsilon_m) = \omega(E_a) = 0,167$.

Выводы

Для окончательного вывода относительно оптимальной массовой части того или иного наполнителя необходимо учитывать совпадения по разным обобщающим функциям, степень адекватности каждой обобщающей функции решаемой задаче. В данном решении использовали шесть обобщающих функций, вполне удовлетворяющих поставленной задаче, хотя существует множество других подходов и функций, которые также можно применить.

Анализ оптимизации позволяет сделать окончательный вывод: оптимальная массовая часть дисульфида молибдена составляет 80 масс.ч., микроталька – 80 масс.ч., карбоната серебра – 0,5 масс.ч.

Список литературы

- 1 Зінченко Д.О. Вплив мікродисперсного карбонату срібла на теплостійкість епоксикомполімерів / Д.О. Зінченко // Матеріали VII Міжнар. наук.-техн. конф., присвяченої 75-річчю кафедри ССЕСУ «Суднова енергетика: стан та проблеми». – Миколаїв: Наці. ун-т кораблебудування імені адмірала Макарова, 2015. – С. 194, 195.
- 2 Зінченко Д.О. Вплив карбонату срібла на енергію активації термоокиснювальної деструкції епоксикомполімеру / Д.О. Зінченко // Матеріали IV Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій». – Тернопіль: Тернопільський національний ун-ет імені Івана Пулюя, 2015. – С. 53.
- 3 Букетов А.В. Вплив антифрикційної добавки на фізико-механічні властивості епоксикомполімерів / А.В. Букетов, Д.О. Зінченко, О.В. Акімов, С.О. Сметанкін // Матеріали 8-ї Міжнар. наук.-практ. конф. «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті». – Херсон: Херсонська державна морська академія, 2016. – С. 310, 311.
- 4 Букетов А.В. Исследование физико-механических свойств композитных материалов на основе эпоксидиановой смолы, отвержденной полиэтиленполиамином, с добавлением пластификатора-антипирена трихлорэтил-фосфата / А.В. Букетов, А.В. Акимов, Д.А. Зинченко // Вісн. Хмельницького національного ун-ту. Технічні науки. – 2015. – № 5. – С. 126–134.
- 5 Букетов А.В. Влияние микродисперсного карбоната серебра на свойства эпоксикомполімерів / А.В. Букетов, А.А. Сапронов, Д.А. Зинченко, В.Н. Яцок // Механика композиционных материалов и конструкций – 2015. – № 4. – С. 533–547.

- 6 Букетов А.В. Дослідження впливу мікродисперсних антифрикційних наповнювачів на адгезійну міцність епоксикомпозитів / А.В. Букетов, Д.О. Зінченко, В.Д. Нігалатій // Міжвузівський збірник Наукові нотатки. — 2016. — № 53. — С. 17–23.
- 7 Buketov A.V. Enhancing performance characteristics of equipment of sea and river transport by using epoxy composites / A.V. Buketov, P.O. Maruschak, O.O. Sapronov, D.O. Zinchenko, V.M. Yatsyuk, S. Panin // Transport. Vilnius Gediminas Technical University (VGTU), 2016. — Vol. 31(3). — P. 333–342. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.3846/16484142.2016.1212267>.
- 8 Микони С.В. Многокритериальный выбор на конечном множестве альтернатив / С.В. Микони. — СПб.: Лань, 2009. — 272 с.
- 9 Дубров А.М. Моделирование рискованных ситуаций в экономике и бизнесе / А.М. Дубров, Б.А. Лагоша, Е.Ю. Хрусталева. — М.: Финансы и статистика, 2000. — 176 с.
- 10 Мушик Э. Методы принятия технических решений / Э. Мушик, П. Мюллер. — М.: Мир, 1990. — 208 с.

А.В. Букетов, А.В. Шарко, Д.А. Зинченко, Д.М. Степанчиков

Эпоксидті шайыр негізінде композитті материалдардың күрделі қосындыларын оңтайландыру мәселелері

Іліу кезіндегі серпімділік модулін, жылуөткізгіштікті, жылуөзімділік пен сызықты кеңейтудің температуралық коэффициентін, кернеуді бұзатын көрсеткіштердің өзгеруін талдау негізінде қорғаныш жабындының ингредиенттер құрылымының көп критерийлі тиімдеу алгоритмі құрылған. Нұсқа бойынша объектілерді реттеу арқылы сұрыптау әдісін қолданып, эпоксидті композитті материалды екі компонентті дисперсиялық толтырғыштың ең тиімді құрылымы анықталған. Әр түрлі дисперсиялы екі толтырғышты енгізу материалдың физика-механикалық және жылуфизикалық қасиеттерін жақсартатыны байқалған. ЕД-20 (100 масс. ч.) эпоксидті олигомер мен (10 масс. ч.) ПЕПА қатайтқышы негізінде құрылған матрица үшін екі компонентті толтырғыштың ең тиімді құрылымы келесі түрде болатыны дәлелденген: молибден дисульфиді — 80 масс. ч., микротальк — 80 масс. ч., күміс карбонаты — 0,5 масс. ч.

Кілт сөздер: эпоксидті композит, соққы тұтқырлық, серпімділік модулі, деструкция, оңтайландыру, компонентті толтырғыш.

A.V. Buketov, A.V. Sharko, D.A. Zinchenko, D.M. Stepanchikov

To the problem of ingredients optimization of composite materials based on epoxy resin

An algorithm of multi-criteria optimization of ingredients content of protective coatings based on analysis of changes in the values of destructive stress, modulus of elasticity in flexure, heat resistance, thermoresistance and temperature linear expansion coefficient was developed. The most optimal content of two-component disperse filler in the epoxy composite material was determined, using the method of selection by ordering objects like in example. It was found that the combination of two fillers with different dispersion improves physico-mechanical and thermal properties of materials. It was proved that for the developed matrix based on hardener PEPA (10 wt %) and epoxy oligomer ED-20 grade (100 wt %) the optimal content of two-component filler is: molybdenum disulfide — 80 wt %, microtalc — 80 wt %, silver carbonate — 0,500 wt %.

Keywords: epoxy composite, resilience, modulus of elasticity, destruction, optimization, component filler.

References

- 1 Zinchenko, D.O. (2015). Vpliv mikrodispersnoho karbonatu sribla na teplostiikist epoksikompozitiv [Effect of micro-dispersed silver carbonate on the heat resistance of an epoxy-composite]. *Ship Power: Status and Problems: VII Mizhnarodnaia naukovo-tekhnichnoi konferentsii, prisviachenoii 75-richchiiu kafedri SSEU – 7nd International Scientific Conference dedicated to the 75th anniversary of the department SSEU* (pp. 194–195). Nikolaev: Natsionalnii universitet korablebuduvannia imeni admirala Makarova [in Ukrainian].
- 2 Zinchenko, D.O. (2015). Vpliv karbonatu sribla na enerhiu aktivatsii termookisniuvalnoi destruktсии epoksikompozitu [Effect of silver carbonate activation energy termookisnyuvalnoyi destruction epoksykompozytu]. *Current problems of modern technology: IV Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnaia konferentsiia molodikh uchenikh ta studentiv – 4nd International scientific conference of young scientists and students.* (p. 53). Ternopil: Ternopilskii natsionalnii universitet imeni Ivana Puliuia [in Ukrainian].
- 3 Buketov, A.V., Zinchenko, D.O., Akimov, O.V., Smetankin, S.O. (2016). Vpliv antifriktsiinoi dobavki na fiziko-mekhanichni vlastivosti epoksikompozitiv [The impact of anti-friction additives on physical and mechanical properties epoksykompozytiv]. *Modern information and innovative technologies in transport: 8-aia Mizhnarodnaia naukovo-tekhnichskaia konferentsiia – 8nd International scientific conference,* pp. 310, 311. Kherson: Khersonska derzhavna morskakademiia [in Ukrainian].
- 4 Buketov, A.V., Akimov, A.V., Zinchenko, D.A. (2015). Issledovanie fiziko-mekhanicheskikh svoistv kompozitnykh materialov na osnove epoksidianovoi smoly, otverzhdennoi polietilenpoliaminom, s dobavleniem plastifikatora–antipirena trikhloretil-fosfata [Investigation of physical and mechanical properties of composite materials based on epoxy-resin resin cured with polyethylene polyamine, with the addition of plasticizer-fire retardant trichloroethyl phosphate]. *Visnik Khmelnytskoho natsionalnoho universiteta. Tekhnichni nauki – Bulletin of Khmelnytsky National University,* 5, pp. 126–134 [in Russian].
- 5 Buketov A.V., Saponov A.A., Zinchenko D.A., Yatsyuk V.N. (2015). Vliianie mikrodispersnoho karbonata serebra na svoistva epoksikompozitov [Effect of finely dispersed silver carbonate on the properties of epoxy composites]. *Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruktсии – Mechanics of Composite Materials and Structures,* 4, pp. 533–547 [in Russian].
- 6 Buketov A.V., Zinchenko D.O., Nigalatiy V.D. (2016). Doslidzhennia vplivu mikrodispersnykh antifriktsiinykh napovniuvachiv na adheziinu mitsnist epoksikompozitiv [Investigation of anti-friction micro disperse fillers on the adhesion strength epoksykompozytiv]. *Mizhvuzivskii zbirnik Naukovi notatki – Interuniversity Journal Scientific Notes,* 53, pp. 17–23 [in Ukrainian].
- 7 Buketov A.V., Maruschak P.O., Saponov O.O., Zinchenko D.O., Yatsyuk V.M., Panin S. (2016). Enhancing performance characteristics of equipment of sea and river transport by using epoxy composites // *Transport. Vilnius Gediminas Technical University (VGTU), Vol. 31(3),* pp. 333–342. Retrieved from <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.3846/16484142.2016.1212267>.
- 8 Mikoni S.V. (2009). *Mnookriterialnyi vybor na konechnom mnozhestve alternativ [Multi-criteria selection on a finite set of alternatives].* Saint Petersburg: Lan [in Russian].
- 9 Dubrov A.M., Lagosha B.A., Hrustalev E.Yu. (2000). *Modelirovanie riskovykh situatsii v ekonomike i biznese – Simulation in economics and business risk situations.* Moscow: Finansy i statistika [in Russian].
- 10 Mushik E., Myuller P. (1990). *Metody priniatia tekhnicheskikh reshenii – Methods of technical decisions,* Moscow: Mir [in Russian].