

УДК 678.5:666.792.32

*О.Ю. Полоз, Ю.М. Ващенко, Ю.Р. Ебіч, Н.М. Євдокименко, Ю.В. Гаврилюк***МОДЕЛЮВАННЯ ЩІЛЬНОСТІ ПАКУВАННЯ ЧАСТИНОК ПОЛІДИСПЕРСНОГО КРЕМНІЙ КАРБІДУ В ЗНОСОСТІЙКИХ ЕПОКСИДНИХ КОМПОЗИТАХ****ННІ «Український державний хіміко-технологічний університет»
Українського державного університету науки і технологій, м. Дніпро, Україна**

Створення конкурентоспроможних зносостійких полімерних матеріалів, які відповідають сучасним вимогам з якості, ефективності та експлуатаційної надійності, є однією із актуальних задач полімерного матеріалознавства на сучасному етапі розвитку промисловості. Як один із напрямів вирішення цієї задачі розглядається необхідність формування в зносостійких епоксидних композитах щільного пакування частинок полідисперсного наповнювача з високою твердістю за шкалою Мооса. Метою даного дослідження є застосування найбільш поширених розрахункових методів моделювання щільності пакування частинок полідисперсного кремній карбїду для зносостійких епоксидних композитів з визначенням найбільш ефективного із них. Для досягнення поставленої мети використано оптичну мікроскопію, ситовий аналіз гранулометричного складу полідисперсного кремній карбїду із чотирьох промислових фракцій (F1000, F90, F40, F14), моделювання щільності пакування частинок наповнювача з використанням еталонних кривих за формулами Боломея, Гуммеля, Фуллера, Функа-Дингера. Встановлено зміни щільності пакування частинок полідисперсного кремній карбїду в залежності від значень коефіцієнтів в формулах еталонних кривих. З'ясовано, що найменше відхилення (15%) змодельованих кривих гранулометричного складу полідисперсного кремній карбїду від еталонних спостерігається при застосуванні формули Функа-Дингера, яка враховує форму частинок дисперсного наповнювача.

Ключові слова: полідисперсний кремній карбїд, ситовий аналіз, гранулометричний склад наповнювача, щільність пакування частинок, моделювання щільних пакувань частинок наповнювача.

DOI: 10.32434/0321-4095-2025-160-3-119-125**Вступ**

Створення конкурентоспроможних зносостійких полімерних матеріалів, які відповідають сучасним вимогам з якості, ефективності та експлуатаційної надійності, є однією із актуальних задач полімерного матеріалознавства на сучасному етапі розвитку обладнання для гірничозбагачувальної, хімічної, будівельної та інших галузей промисловості [1–3]. Найбільш широке застосування серед зносостійких полімерних матеріалів у світовій практиці знайшли епоксидні, наповнені

дисперсними наповнювачами з високою твердістю за шкалою Мооса (кремній карбїд, електрокорунд тощо), що мають високі в'язко-пружні властивості, адгезію до різноманітних субстратів, експлуатаційну витривалість при дії абразивного середовища [4–6].

Необхідний комплекс експлуатаційних властивостей наповнених зносостійких епоксидних матеріалів досягається при формуванні оптимальної тривимірної структури зв'язуючого (епоксидної смоли) та дисперсної структури на-

© О.Ю. Полоз, Ю.М. Ващенко, Ю.Р. Ебіч, Н.М. Євдокименко, Ю.В. Гаврилюк, 2025



This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Modeling the packing density of polydisperse silicon carbide particles in wear-resistant epoxy composites

повнювача з високою адгезійною міцністю зв'язку між ними [7]. При цьому одним із визначальних факторів, що впливає на дисперсну структуру наповнювача, є щільність пакування його частинок, які міцно зв'язані з отвердженням зв'язуючим. Система частинок прагне до мінімального запасу внутрішньої надлишкової енергії, що досягається за рахунок агрегування, флокулювання, тобто кластеризації структури. У певний момент утворюється об'ємний скелет з частинок наповнювача, який сприймає навантаження, а фаза, що з'єднує частинки, передає зусилля від однієї частинки до іншої [8]. Зі зменшенням розмірів частинок їх кластери характеризуються більш упорядкованою структурою.

Для досягнення щільно упакованої дисперсної структури наповнювача в зносостійких епоксидних композитах використовуються полідисперсні за розмірами його частинки (дрібно- (1–100 мкм), середньо- (100–500 мкм), і крупнодисперсні (500–2500 мкм)), щільність пакування яких досягається за рахунок заповнення меншими за розмірами частинками пустот між більш крупними. Слід зауважити, що кожний окремий монодисперсний наповнювач, як правило, є полідисперсним з набором його частинок за розмірами в межах певного діапазону. Це доведено гранулометричним складом наповнювачів при застосуванні методу розсіювання з використанням набору стандартних сит [9].

Досягнення найбільш щільного пакування частинок наповнювача забезпечується підбором оптимального гранулометричного складу його компонентів, їх розподіленням за розмірами, кількісним вмістом в системі, а також ступенем їх участі в формуванні структури отвердженого зв'язуючого [10]. Щільна упакована дисперсна структура полідисперсного наповнювача формує в отвердженому зв'язуючому «твердий каркас», який складніше потоку абразивного середовища зношувати, роз'єднувати і відокремлювати його складові.

Склад полімерних композитів з полідисперсним наповнювачем або наповнювачами, що відрізняються за хімічною природою (наприклад, кремній карбід SiC та електрокорунд Al₂O₃), можна розробити експериментальним методом математичного планування експерименту з урахуванням найбільш характерного параметра, що оптимізується (в даному випадку, наприклад, величина зношування композитів), та комплексу фізико-механічних характеристик. Використання планованого експерименту надає цінну інформацію, зменшує час досягнення бажаних результатів, але

все ж є трудомістким, потребує певного обладнання для здійснення випробувань. Необхідний позитивний результат також можна досягти із застосуванням розрахунково-експериментальних методів, що використовуються при розробці складів сумішей з щільним пакуванням полідисперсних частинок наповнювачів в будівельній індустрії: Болomeя, Гуммеля, Фуллера, Функа-Дингера тощо [10,11].

Отже, має науковий та практичний інтерес застосування цих розрахункових методів з вибором найбільш ефективного із них для моделювання гранулометричного складу щільного пакування частинок полідисперсного кремній карбїду в зносостійких епоксидних композитах, що і стало метою даного дослідження.

Методика експерименту

При порівняльному оцінюванні розрахункових методів моделювання щільності пакування частинок полідисперсного кремній карбїду застосовували формули для побудови еталонних кривих гранулометричного складу полідисперсних наповнювачів Болomeя, Гуммеля, Фуллера, Функа-Дингера з використанням програми «Granumetric 5.0» [10,11]:

– формула Функа-Дингера:

$$A_j = 100 \cdot (\alpha + (1 - \alpha) \cdot (D_j^n - D_{\min}^n) / (D_{\max}^n - D_{\min}^n)), \quad (1)$$

– формула Фуллера:

$$A_j = 100 \cdot (D_j / D_{\max})^n, \quad (2)$$

– формула Гуммеля:

$$A_j = 100 \cdot (D_j / D_{\max})^m, \quad (3)$$

– формула Болomeя:

$$A_j = B + (100 - B) \cdot (D_j / D_{\max})^{0.5}, \quad (4)$$

де A_j – повне проходження частинок через умовне сито з розміром отвору D_j ; $D_{\max}$ та $D_{\min}$ – найбільший та найменший розмір частинки наповнювача; n – коефіцієнт розподілення, який дорівнює 0,5 за Фуллером або 0,37 за Адreasеном; α – коефіцієнт форми частинок, який змінюється від 0 до 0,2; m – емпіричний коефіцієнт, який змінюється від 0,1 до 1,0; B – коефіцієнт, який дорівнює 10 для малопластичних сумішей із щебнем, 12 для пластичних сумішей із гравієм та 14 для пластичних сумішей із щебнем.

Чим ближче крива гранулометричного скла-

ду реального полідисперсного наповнювача наближається до еталонної кривої, тим досягається більша щільність пакування частинок наповнювача [10,11].

За оптимальний прийнято гранулометричний склад [12] полідисперсного кремній карбїду із чотирьох промислових фракцій (F1000, F90, F40, F14 за ТУ У24.1-00222226-059:2006) ПрАТ «Запорізький абразивний комбінат», Україна, фактичний розмір частинок якого і їх вміст, визначений методом розсіву із застосуванням стандартних сит, наведено в табл. 1. Оптимальний склад попередньо було встановлено із використанням методу математичного планування експерименту Бокса-Уїлсона. Епоксидний композит, що містить оптимальний склад полідисперсного кремній карбїду чотирьох фракцій, має високі експлуатаційні властивості на рівні кращих світових зносостійких композитів [13]. Такі властивості зносостійкого епоксидного композиту з полідисперсним кремній карбїдом досягаються завдяки формуванню в епоксидній матриці дисперсної структури наповнювача з щільно упакованими його частинками (рис. 1), яку було визначено із застосуванням цифрового оптичного USB-мікроскопу Microsafe ShinyVision MM-2288-5X-BN (КНР) та цифрової камери Canon PC1562.

Результати та їх обговорення

У табл. 2, як приклад, наведено гранулометричний склад полідисперсного кремній карбїду для побудови еталонних кривих за формулами (1)–(4) при межових значеннях коефіцієнтів в них. Відповідно до наданих даних найменший вплив на зміни гранулометричного складу наповнювача спостерігаються при застосуванні межових коефіцієнтів в формулі Боломея, найбіль-

ший – в формулі Гуммеля. При детальному покроковому варіюванні коефіцієнтів при розрахунках для побудови еталонних кривих гранулометричного складу полідисперсного кремній карбїду за формулами (1)–(4) спостерігаються більш суттєві його зміни і, як наслідок, відхилення реального гранулометричного складу від еталонного змінюються в більш широкому діапазоні (табл. 3, рис. 2 і 3).

Більш широкий діапазон відхилень характерний для застосування формули (3) Гуммеля, найменший – для застосування формули (1) Функа-Дингера; значення коефіцієнта В в формулі (4) Боломея незначно впливають на цей показник. Слід зазначити, що рівняння еталонних кривих гранулометричного складу полідисперсного наповнювача дають тільки приблизний склад



Рис. 1. Дисперсна структура ($\times 100$) полідисперсного кремній карбїду в зносостійкому епоксидному композиті оптимального складу:

1 – F14; 2 – F40; 3 – F90; 4 – F1000

Таблиця 1

Гранулометричний склад полідисперсного кремній карбїду різних фракцій

Отвір сита, мм	Проходження крізь отвір сита, %				Отвір сита, мм	Проходження крізь отвір сита, %			
	F14	F40	F90	F1000		F14	F40	F90	F1000
3,150	100	100	100	100	0,300	0	10	100	100
2,500	95	100	100	100	0,250	0	0	90	100
2,000	85	100	100	100	0,180	0	0	70	100
1,400	50	100	100	100	0,150	0	0	40	100
1,180	20	100	100	100	0,125	0	0	30	100
1,000	5	100	100	100	0,106	0	0	10	100
0,850	0	100	100	100	0,063	0	0	0	100
0,630	0	90	100	100	0,038	0	0	0	100
0,500	0	75	100	100	0,007	0	0	0	50
0,425	0	55	100	100	0,005	0	0	0	0
0,355	0	30	100	100	–	–	–	–	–

Таблиця 2

Еталонний гранулометричний склад полідисперсного кремній карбїду, розрахований за формулами (1)–(4) при межових значеннях коефіцієнтів в них з використанням програми «Granumetric 5.0»

Отвір сита (D), мм	Проходження крізь отвір сита (A), %									
	Функа-Дингера			Фуллера		Гуммеля		Боломея		
	n=0,50, α=0,20	n=0,37, α=0,20	n=0,37, α=0	n=0,50	n=0,37	m=1,0	m=0,1	B=14	B=12	B=10
3,150	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
2,500	90,91	92,78	90,97	89,09	91,80	79,37	97,72	90,61	90,40	90,18
2,000	83,07	86,37	82,96	79,68	84,53	63,49	95,56	82,53	82,12	81,71
1,400	72,23	77,16	71,45	66,67	74,08	44,44	92,21	71,33	70,67	70,00
1,180	67,68	73,16	66,45	61,20	69,54	37,46	90,65	66,64	65,86	65,08
1,000	63,63	69,52	61,90	56,34	65,41	31,75	89,16	62,46	61,58	60,71
0,850	59,96	66,15	57,69	51,95	61,59	26,98	87,72	58,67	57,71	56,75
0,630	53,94	60,46	50,58	44,72	55,13	20,00	85,13	52,46	51,35	50,25
0,500	49,88	56,48	45,60	39,84	50,61	15,87	83,19	48,26	47,06	45,86
0,425	47,29	53,88	42,35	36,73	47,66	13,49	81,85	45,59	44,32	43,06
0,355	44,65	51,17	38,97	33,57	44,59	11,27	80,39	42,87	41,54	40,21
0,300	42,39	48,80	36,00	30,86	41,89	9,52	79,05	40,54	39,16	37,77
0,250	40,15	46,39	32,99	28,17	39,16	7,94	77,62	38,23	36,79	35,35
0,180	36,60	42,44	28,05	23,90	34,68	5,71	75,11	34,56	33,04	31,51
0,150	34,86	40,45	25,56	21,82	32,42	4,76	73,75	32,77	31,20	29,64
0,125	33,28	38,59	23,23	19,92	30,3	3,97	72,42	31,13	29,53	27,93
0,106	31,96	37,01	21,26	18,34	28,51	3,37	71,24	29,78	28,14	26,51
0,063	28,46	32,61	15,76	14,14	23,52	2,00	67,62	26,16	24,45	22,73
0,038	25,83	29,07	11,34	10,98	19,5	1,21	64,29	23,45	21,67	19,89
0,007	20,61	21,08	1,34	4,71	10,43	0,22	54,28	18,05	16,15	14,24
0,005	20,00	20,00	0,00	3,98	9,21	0,16	52,49	17,43	15,51	13,59

Таблиця 3

Відхилення (ΔA, %) гранулометричного складу полідисперсного кремній карбїду від еталонних кривих з урахуванням коефіцієнтів в формулах (1)–(4)

Розрахункова формула	Відхилення (ΔA, %) від еталонних кривих при різних значеннях коефіцієнтів									
Функа-Дингера	(21,4), n=0,37, α=0	(18,5), n=0,37, α=0,05	(15,6), n=0,37, α=0,10	(15,0), n=0,37, α=0,15	(20,0), n=0,37, α=0,20	(29,6), n=0,50, α=0	(26,3), n=0,50, α=0,05	(23,0), n=0,50, α=0,10	(19,8), n=0,50, α=0,15	(20,0), n=0,50, α=0,20
Фуллера	(27,0), n=0,50	(16,0), n=0,37	–	–	–	–	–	–	–	–
Гуммеля	(50,6), m=1	(47,4), m=0,9	(43,5), m=0,8	(39,1), m=0,7	(33,6), m=0,6	(27,0), m=0,5	(18,8), m=0,4	(14,5), m=0,3	(27,6), m=0,2	(52,5), m=0,1
Боломея	(18,2), B=14	(19,4), B=12	(20,6), B=10	–	–	–	–	–	–	–

максимальної щільності пакування його частинок, що пояснюється різною формою частинок реальної системи, відмінної від сферичної: чим більше форма частинок наповнювача відрізняється від ідеальної сферичної (рис. 4), тим більшу частку у полідисперсному складі має займати дрібна фракція [10].

Таким чином, мінімальне значення відхилення гранулометричного складу полідисперсного кремній карбїду від еталонного за формулою (1) Функа-Дингера (15% при значеннях коефіцієнтів $n=0,37$, $\alpha=0,15$, що є прийнятним для подібних розрахунків), а також врахування в цій формулі впливу форми частинок наповнювача є підставою для рекомендації її застосування при моделюванні полідисперсних систем наповнених полімерних зносостійких композитів.

Висновки

Ситовим аналізом визначено гранулометричний склад промислових фракцій кремній карбїду (F1000, F90, F40, F14) різного ступеня дисперсності (0,005–2,200 мм), що входять до оптимального полідисперсного складу наповнювача зносостійкого епоксидного композиту і які було

використано при моделюванні щільності пакування його частинок із застосуванням еталонних кривих за формулами Боломея, Гуммеля, Фуллера і Функа-Дингера.

Із застосуванням програми «Granumetric 5.0» встановлено зміни щільності пакування частинок полідисперсного кремній карбїду в залежності від значень коефіцієнтів в формулах еталонних кривих і з'ясовано, що найменше відхилення (15% при $n=0,37$, $\alpha=0,15$) змодельованих кривих гранулометричного складу полідисперсного наповнювача від еталонних спостерігається при застосуванні формули Функа-Дингера, яка враховує форму частинок дисперсного наповнювача.

Методом оптичної мікроскопії доведено високу щільність пакування частинок полідисперсного кремній карбїду в змодельованому оптимальному складі зносостійкого епоксидного композиту.

Рекомендовано при моделюванні гранулометричного складу щільного пакування частинок полідисперсних наповнювачів в епоксидних композитах використовувати формулу еталонних кривих Функа-Дингера.

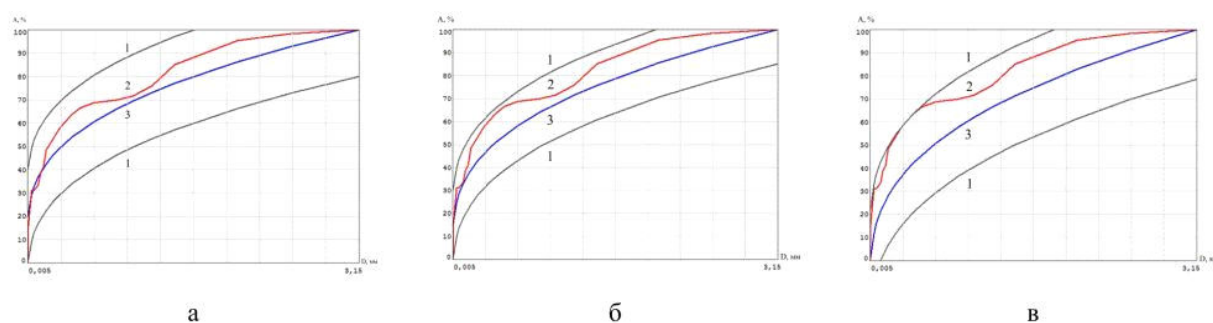


Рис. 2. Відхилення ΔA (криві 1) реального (крива 2) гранулометричного складу полідисперсного кремній карбїду від еталонного (крива 3) при різних значеннях коефіцієнтів в формулі Функа-Дингера:

(а) $\Delta A=20,0\%$ при $n=0,37$, $\alpha=0,20$; (б) $\Delta A=15,0\%$ при $n=0,37$, $\alpha=0,15$; (в) $\Delta A=21,4\%$ при $n=0,37$, $\alpha=0,00$

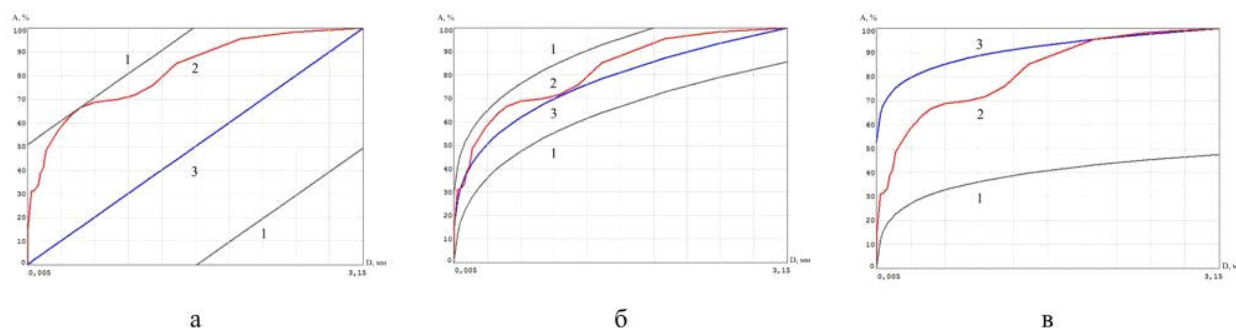
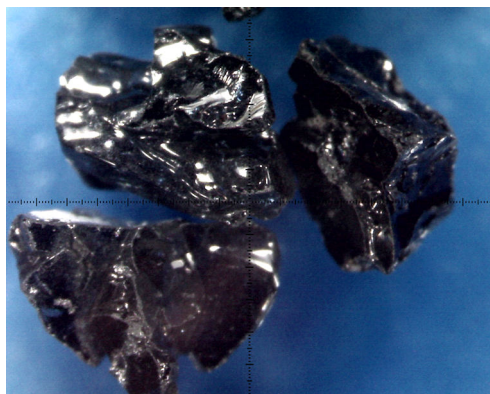


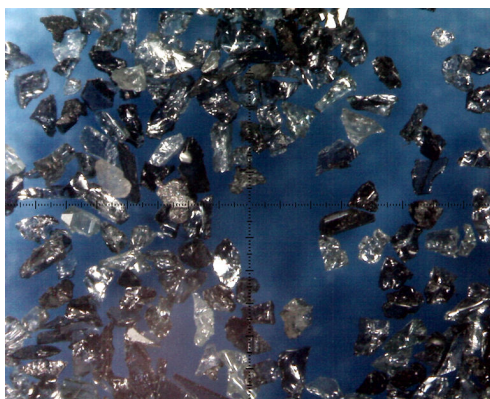
Рис. 3. Відхилення ΔA (криві 1) реального (крива 2) гранулометричного складу полідисперсного кремній карбїду від еталонного (крива 3) при різних значеннях коефіцієнтів в формулі Гуммеля: (а) $\Delta A=50,6\%$ при $m=1,0$; (б) $\Delta A=14,5\%$ при $m=0,3$; (в) $\Delta A=52,5\%$ при $m=0,1$



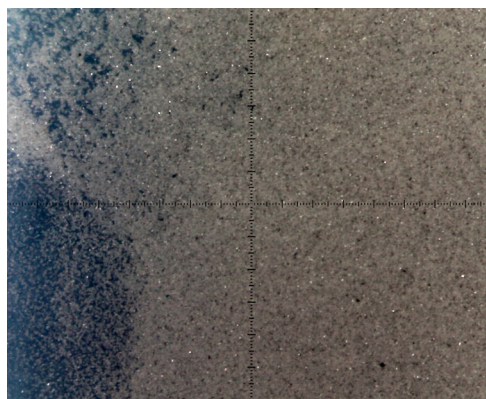
а



б



в



г

Рис. 4. Форма частинок ($\times 100$) кремній карбїду промислових фракцій за даними оптичної мікроскопії:
(а) – F14; (б) – F40; (в) – F90; (г) – F1000

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Vakhrushev V.A., Haghi A.K.* Composite materials engineering: modeling and technology. – Apple Academic Press, 2019. – 236 p.
2. *Herman M.F.* Encyclopedia of polymer science and technology. – Wiley, 2004. – 3005 p.
3. *Дубровський С.С., Реброва С.В.* Використання сучасних технологій при виготовленні та ремонті елементів конструкцій гірничо-збагачувального обладнання // Вісн. Криворізького нац. ун-ту. – 2019. – Вип. 48. – С.79-83.
4. *Improving wear resistance of epoxy/SiC composite using a modified apparatus / Nassar A., Salem M., El-Batanony I., Nassar E.* // Polym. Polym. Compos. – 2021. – Vol.29. – P.S389-S399.
5. *An investigation on mechanical properties of SiC reinforced epoxy composite synthesized at room temperature / Moharana B.R., Biswal D.K., Maiti A., Pattanaik A.* // Mater. Today Proc. – 2022. – Vol.59. – No. 3-4. – P.1852-1857.
6. *Полоз О.Ю., Ващенко Ю.М., Ебіч Ю.Р.* Поведінка модифікованих розбавниками зносостійких епоксидних композицій в умовах контактної-динамічного навантаження і газоабразивного зношування // J. Chem. Technol. – 2024. – Т.32. – № 2. – С.343-350.
7. *Особенности міжфазної взаємодії в епоксидних композитах, наповнених силіцій карбїдом / Полоз О.Ю., Штомпель В.І., Бурмістров К.С., Ебіч Ю.Р.* // Питання хімії та хім. технол. – 2020. – № 1. – С.39-46.
8. *Полімерні суміші та композити.* Монографія / Євдокименко Н.М., Бурмістр М.В., Ващенко Ю.М., Котов Ю.Л. – Дніпропетровськ: УДХТУ, 2003. – 223 с.
9. *Базюк Л.В., Свідерський В.П.* Вплив типу і форми наповнювачів на теплофізичні властивості композитів на основі політетрафторетилену і ароматичного поліаміду // Вісн. Прикарпатського нац. ун-ту. Сер. Хім. – 2008. – Вип. 5. – С.47-53.
10. *Дворкін Л.Й., Дворкін О.Л.* Проектування складів бетонів: Монографія. – Рівне: НУВГП, 2015. – 353 с.
11. *Оптимизация состава шихты магнезиальных пропантов методами математического моделирования / Шаяхметова Р., Малдыбаев Г., Осипов П. и др.* // Промышл. Казахстана. – 2020. – № 3(11). – С.56-58.
12. *Патент на корисну модель № 155450* Україна, МПК C04B 35/565, C08K 3/00, C04B 24/00, B22D 41/02.

Спосіб одержання шихти для зносостійкого футерувального складу // Полоз О.Ю., Кущенко С.М., Ліпницький С.Г. — № u202304404; заявл. 18.09.2023; опубл. 28.02.2024. — Бюл. № 9. — 4 с.

13. Полоз О.Ю., Ебич Ю.Р. Поведінка зносостійких епоксидних композицій в умовах контактної-динамічного навантаження // Проблеми тертя та зношування. — 2021. — № 2(91). — С.46-52.

Надійшла до редакції 23.02.2024

MODELING THE PACKING DENSITY OF POLYDISPERSE SILICON CARBIDE PARTICLES IN WEAR-RESISTANT EPOXY COMPOSITES

O.Yu. Poloz *, Yu.M. Vashchenko, Yu.R. Ebich,
N.M. Yevdokimenko, Yu.V. Havryliuk

Ukrainian State University of Science and Technologies,
Dnipro, Ukraine

* e-mail: ua.apolo@gmail.com

The development of competitive, wear-resistant polymeric materials that satisfy modern demands for quality, efficiency, and operational reliability remains a critical challenge in polymer materials science. One promising approach is to achieve a dense packing of polydisperse filler particles with high Mohs hardness within epoxy composites. This study applies and compares the most common computational methods used for modeling the packing density of polydisperse silicon carbide particles in wear-resistant epoxy composites to identify the most effective model. Optical microscopy and sieve analysis were performed on four industrial silicon carbide fractions (F1000, F90, F40, and F14), and packing densities were calculated using reference curves based on the equations of Bolomey, Hummel, Fuller, and Funk-Dinger. We systematically evaluated how the coefficients in these reference curve formulae influence the simulated packing densities. Among the methods tested, the Funk-Dinger model, which explicitly accounts for particle shape, exhibited the closest match to the experimental granulometric distribution, with a minimum deviation of 15%.

Keywords: polydisperse silicon carbide; sieve analysis; granulometric composition; particle packing density; modeling of dense packing of filler particles.

REFERENCES

1. Vakhrushev AV, Haghi AK. *Composite materials engineering: modeling and technology (1st edition)*. Apple Academic Press; 2019. 236 p. doi: 10.1201/9780429242762.
2. Herman MF. *Encyclopedia of polymer science and technology*. Wiley; 2004. 3005 p.
3. Dubrovskiy SS, Rebrova SV. Vykorystannya suchasnykh tekhnolohii pry vyhotovlenni ta remonti elementiv konstruktiv hirnycho-zbahachuval'noho obladnannya [Using modern technologies in the manufacture and repair of structural elements of mining and processing equipment]. *Visnyk Kryvoriz'koho Natsional'noho Universytetu*. 2019; 48: 79-83. (in Ukrainian). doi: 10.31721/2306-5451-2019-1-48-79-83.
4. Nassar A, Salem M, El-Batanony I, Nassar E. Improving wear resistance of epoxy/SiC composite using a modified apparatus. *Polym Polym Compos*. 2021; 29: S389-S399. doi: 10.1177/09673911211002731.

5. Moharana BR, Biswal DK, Maiti A, Pattanaik A. An investigation on mechanical properties of SiC reinforced epoxy composite synthesized at room temperature. *Mater Today Proc*. 2022; 59: 1852-1857. doi: 10.1016/j.matpr.2022.04.588.

6. Poloz AYU, Vaschenko YUN, Ebich YUR. Povedinka modyfikovanykh rozbavnykamy znosostiyykh epoksydnykh kompozytsiy v umovakh kontaktno-dynamichnoho navantazhennya i hazoabrazyvnoho znoshuvannya [Behavior of wear-resistant epoxy compositions modified by diluents under contact-dynamic loading and gas-abrasive wear]. *J Chem Technol*. 2024; 32(2): 343-350. (in Ukrainian). doi: 10.15421/jchemtech.v32i2.293333.

7. Poloz OYu, Stoppel VI, Burmistrov KS, Ebich YUR. Osoblyvosti mizhfaznoyi vzayemodiyi v epoksydnykh kompozytakh, napovnenykh sylitsiy karbidom [Features of interfacial interaction in epoxy composites filled with silicon carbide]. *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*. 2020; (1): 39-45. (in Ukrainian). doi: 10.32434/0321-4095-2020-128-1-39-46.

8. Evdokimenko NM, Burmistr MV, Vashchenko YUM, Kotov YUL. *Polimerni sumishshi ta kompozyty* [Polymer mixtures and composites]. Dnipropetrovsk: UDKhTU; 2003. 223 p. (in Ukrainian).

9. Bazyuk LV, Sviderskyi VP. Vplyv typu i formy napovnyuvachiv na teplofizychni vlastyvy kompozytiv na osnovi politetraforetylenu i aromatychnoho poliamidu [Influence of the type and shape of fillers on the thermophysical properties of composites based on polytetrafluoroethylene and aromatic polyamide]. *Visnyk Prykarpats'koho Natsional'noho Universytetu Seriya Khimiya*. 2008; 5: 47-53. (in Ukrainian).

10. Dvorkin LY, Dvorkin OL. *Proektuvannya skladiv betoniv* [Design of concrete warehouses]. Rivne: NUVGP; 2015. 353 p. (in Ukrainian).

11. Shayakhmetova R, Maldybaev G, Osipov P, Mukhametzhanova A, Stepanenko A, Baizhanova A. Optimizatsiya sostava shikhty magnezial'nykh proppantov metodami matematicheskogo modelirovaniya [Optimization of the composition of the magnesite proppants batch using mathematical modeling methods]. *Promyshlennost' Kazakhstana*. 2020; 3(11): 56-58. (in Russian).

12. Poloz OYu, Kushchenko SM, Lipitsky SG, inventors; LTD «New Technologies», assignee. *Sposib oderzhannya shykhty dlya znosostiyykoho futeruval'noho skladu* [Method for obtaining a charge for a wear-resistant lining composition]. Ukraine patent UA 155450. 2024 Feb 28. (in Ukrainian).

13. Poloz OYu, Ebich YUR. Povedinka znosostiyykh epoksydnykh kompozytsiy v umovakh kontaktno-dynamichnoho navantazhennya [Behavior of wear-resistant epoxy compositions in conditions of contact-dynamic loading]. *Probl Frict Wear*. 2021; 2(91): 46-52. (in Ukrainian). doi: 10.18372/0370-2197.2(91).15528.