

С.М. Золотов¹, О.М. Пустовойтова¹, С.М. Камчатна², С.А. Савісько¹, Г.М. Литвинова¹

¹Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Україна

²Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна

МОДЕЛЮВАННЯ СТРУКТУРНИХ ПАРАМЕТРІВ КЛЕЙОВОЇ КОМПОЗИЦІЇ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЇЇ АДГЕЗІЙНОЇ МІЦНОСТІ

Розглянуто модель наповненої системи полімеру для аналізу взаємодії та зв'язку між її компонентами та властивостями адгезії. Встановлено, що форма зерен наповнювача суттєво впливає на властивості системи, зокрема міцність на зчеплення та водостійкість. Аналіз відстані між частинками наповнювача показав, що зменшення його об'ємної частки в композиції призводить до збільшення відстані між ними.

Ключові слова: полімерно-мінеральна композиція, адгезія, когезія, акриловий клей.

Постановка проблеми

Аналіз наявних теорій адгезії показує, що адгезія, яка є основною характеристикою матеріалів, що з'єднують, – це складне явище, пов'язане з хімічним складом і структурою адгезиву і підкладки, режимом формування адгезійного з'єднання, шириною шару сполучного, вологістю склеюваних поверхонь. У межах цього дослідження були розглянуті явища, пов'язані з межею розділу фаз, оскільки вона дає можливість оцінити взаємодії як у системі акриловий клей – субстрат, так і між дисперсним наповнювачем і полімерним сполучним у клейовій композиції.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Властивості полімерно-мінеральної композиції, їх зміна з часом внаслідок дії навколишнього середовища або введення інших компонентів до складу зазвичай розглядаються з погляду зміни властивостей гомополімеру, на основі якого створюється клейова композиція [1].

Як зазначено в попередніх дослідженнях, адгезійні явища в акрилових клеях – це результат прояву різних взаємодій різнорідних тіл окремо та в їх обсязі. Відомо [1–3], що адгезійна міцність сполук на акриловому клеї значною мірою залежить від когезійної міцності склеюваних тіл. Підтвердженням цього є й те, що адгезійна міцність сполуки часто перевищує когезійну міцність найменш міцного з тіл, що становлять систему адгезив – субстрат. Вона характеризується як величиною адгезії, так і типом порушення зв'язку між компонентами, тобто характером руйнації. Питання характеру руйнації становить теоретичний і практичний інтерес. З метою виявлення шляхів підвищення працездатності системи адгезив – субстрат досліджуються її слабкі ланки.

Одним з основних процесів, які визначають властивості наповненого полімеру [1], є адсорбційна

взаємодія, яка характеризує фізико-хімічні та фізико-механічні властивості не тільки затверділого, а й формувального полімеру. Це пояснюється виникненням складного граничного шару в присутності твердої поверхні наповнювача, відмінного за структурою та властивостями від полімеру в обсязі.

Адсорбційна взаємодія полімеру з твердою фазою наповнювача та домішок веде до зміни структури граничного шару, температури термодинамічних і структурних переходів, зменшує рухливість полімерних ланцюгів та елементів надмолекулярних структур, обмежує кількість конформацій, яку може прийняти ланцюгова молекула певного шару, та ін. Система впливу поверхневих сил поширюється на значні відстані від фазової межі, може мати товщину від декількох молекул до декількох мікрон, порушуючи щільність упаковки макромолекул як наслідок обмеження рухливості полімерних ланцюгів, і орієнтує дії наповнювача. Збільшення щільності упаковки макромолекул біля поверхні твердого тіла обумовлено орієнтовним впливом підкладки.

Взаємодія дотичних фаз визначається явищами на молекулярному рівні на поверхні і залежить від хімічного складу полімеру та наповнювачів, а також від ступеня організації молекул полімеру в надмолекулярних структурах. Завдяки взаємодії на молекулярному рівні можлива не тільки взаємодія окремих молекул, а й надмолекулярних структур.

Якщо полімерно-мінеральну композицію спрощено представити як ту, що складається з двох компонентів – наповнювача та зв'язуючого, то зміна їх властивостей буде відбуватися не тільки внаслідок зміни властивостей кожного компонента, але й унаслідок зміни властивостей адгезійних (граничних) шарів на поверхні наповнювача.

При подачі першої моделі наповнюваної композиції [4] виходять з того, що властивості наповнюваної композиції є наслідком змін властивостей

лише полімерного компонента в системі.

Мета статті

На прикладі моделі наповненої системи полімеру розглянути та обчислити взаємодію та зв'язок між її компонентами та її адгезивні властивості.

Викладення основного матеріалу

У наповнюваній композиції як двофазній системі вздовж межі розділу утворюється шар, властивості якого відрізняються від об'ємних властивостей наповнювача та зв'язуючого. Отже, у найпростішому випадку наповнена композиція буде складатися з трьох елементів: наповнювача з відомими об'ємними властивостями; інтерфейсного шару, властивості якого зазвичай невідомі; та зв'язуючого, об'ємні властивості якого можна вважати такими ж, як у полімерного зв'язуючого в моноблочі. Припущення, що властивості зв'язуючого постійні в об'ємі, є несправедливим, оскільки властивості композиції змінюються при зміні розміру моноліту зразка та умов його виготовлення. Крім того, слід припустити, що у відносно невеликій товщині між поверхнями частинок наповнювача властивості всієї композиції будуть відрізнятися від властивостей зразка. Однак це припущення абсолютно необхідно для ідентифікації властивостей інтерфейсного шару, а також впливу властивостей окремих елементів на властивості наповненого пластику. Інакше система стає невизначеною.

Реальна наповнена акрилова композиція є набагато складнішою за складом, ніж розглянута схема, але її завжди можна з достатньою мірою наближення звести до моделі, показаної на рис. 1. На відміну від реальної наповненої композиції, ми будемо називати її моделлю наповненої системи.

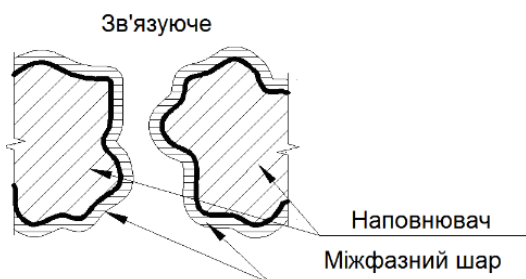


Рис. 1. Модель наповненої системи клейової композиції [1]

Полімерне зв'язуюче в наповненій композиції може бути багатокомпонентним, але оскільки його властивості можна визначити за відсутності використаного наповнювача, його можна представити в моделі наповненої системи як окремий однорідний елемент.

Реальна полімерна композиція має наповнювач,

який є неоднорідним (за природою речовини, розміром та формою). Кожна окрема частка такого наповнювача, яка враховується в моделі, також може вважатися однорідною за складом.

Наукове обґрунтування технологічних параметрів клейового матеріалу залежить від агрегованого стану, розміру, структурних параметрів дисперсних наповнювачів, фазової структури матеріалу та технологічних властивостей полімерного зв'язуючого.

Форма зерен наповнювача має особливо значний вплив на такі властивості, як рухливість, реологічні властивості, відшарування, захоплення повітря, міцність на злипання, усадки, міцність зчеплення з основами, водостійкість, стійкість до агресивних впливів тощо. Але форма частинок наповнювача може сильно варіювати і не може бути охарактеризована. Тому лише розмір частинок та їхня площа поверхні можуть бути основою для оцінки їх впливу на властивості системи наповнювач – полімерне зв'язуюче.

Зерна наповнювача оточуються полімерним зв'язуючим, що призводить до змін у його споживанні, оскільки це безпосередньо пов'язано з питомою площею поверхні наповнювача.

Питома площа поверхні (або, точніше, питома площа поверхні) – це площа поверхні агрегату, поділена на його масу ($\text{см}^2/\text{г}$):

$$S = \frac{\sum S_i}{\sum m_i}, \quad (1)$$

де $\sum S_i$ – сума площ поверхності зерен проби заповнювача, см^2 ;

$\sum m_i$ – сумарна маса зерен, тобто маса проби заповнювача, г.

Насправді це є мірою площі поверхні 1 г наповнювача, і вона визначає ступінь інтерфейсу наповнювач–полімер у матеріалі за умови, що частинки наповнювача повністю змочують полімер.

Зазвичай питома площа поверхні виражається в $\text{см}^2/\text{г}$ або $\text{м}^2/\text{г}$. У нашому випадку зручніше виражати її в $\text{см}^2/\text{см}^3$ або $\text{м}^2/\text{м}^3$, тобто як відношення площі зерна до об'єму, займаного агрегатом у заповненні. Питома площа поверхні залежить від форми зерен та їх розміру. Для вивчення впливу розміру зерна кварцового піску на міцнісні властивості акрилової клейової композиції використовувалися фракції 0,14 мм, 0,315 мм і 0,63 мм.

Залежність від форми зерен наповнювача можна простежити, порівнявши сферичні та кубічні зерна. Як зазначалося вище, кварцовий пісок має форму зерна, близьку до кубічної, тому для фундаментального розгляду клейової системи була прийнята спрощена схема заповнення зі сферичною формою наповнювача, а кубічна, яка найбільше відповідає реальній, буде використовуватися для розрахунку

питомої площі поверхні.

Розглянемо сферу і куб одного об'єму, так що сфера знаходиться всередині куба [1]. З рівності об'ємів (де d – діаметр сфери; a – ребро куба) випливає, що ребро куба буде дорівнювати $a = 0,806d$. Відповідно, площа поверхні куба $A_i = 6a^2 = 6(0,806d)^2 = 3,9d^2$, а поверхня сфери становить $3,14d^2$, тобто площа поверхні кубоподібних зерен на 24 % більша (табл. 1), тому можна стверджувати, що чим незграбніші зерна наповнювача, тим більша їхня питома площа поверхні.

Таблиця 1

Площа поверхні кварцового піску з кубічною формою зерна

Розмір зерна наповнювача, мм	0,14	0,315	0,63
Площа поверхні кварцового піску з кубічною формою зерна	0,08	0,39	1,54

Для непористих частинок наповнювача з кварцового піску питома площа поверхні наповнювача може бути обчислена за формулою:

$$S = \frac{K}{\rho_{icm}} \cdot \sum \frac{dw}{d}, \quad (2)$$

де $\rho_{icm} = 2,5 \text{ г/см}^3$ – для кварцового піску;

d – діаметр фракції піску, дорівнює 0,14 мм, 0,315 мм, 0,63 мм;

K – коефіцієнт, що враховує форму частинок,

для частинок призматичної форми дорівнює 12;

d_w – масова доля цієї фракції піску наповнювача.

На основі результатів розрахунків питомої поверхні кварцового наповнювача із зерном розміром 0,14 мм, 0,315 мм і 0,63 мм (табл. 2) можна стверджувати, що чим дрібніше зерно, тим більша питома поверхня і спостерігається лінійна залежність.

Таблиця 2

Питома площа поверхні кварцового піску

Розмір зерна наповнювача, мм	0,14	0,315	0,63
Питома площа поверхні кварцового піску ($\text{см}^2/\text{г}$)	34,29	15,24	7,62
Питома площа поверхні кварцового піску ($\text{см}^2/\text{см}^3$)	52,86	23,49	11,75

На практиці компоненти акрилової клейової композиції вимірюються у частках маси (грамах), тому оптимальні співвідношення зв'язуючого та наповнювача були встановлені у частках маси, що робить безнадійними спроби розрахувати об'ємні характеристики компонентів наповнюваної композиції через невідповідність між розрахунковими вимірами об'єму компонентів (см^3). Тому, з урахуванням коефіцієнта $k_{mo} = 0,65$, все ж таки можна перерахувати практично перевірені масові пропорції зв'язуючого та наповнювача на основі об'ємних вимірів для різних розмірів наповнювача. Дані, отримані в результаті перерахунку, наведені в табл. 3.

Таблиця 3

Взаємозв'язок масових та об'ємних часток зв'язуючого та наповнювача

Розмір зерна наповнювача, мм / Об'ємна частка наповнювача, см^3	0,14/97,5	0,315/195	0,63/260
Масова частка зв'язуючого, г / Масова частка наповнювача, г / Об'ємна частка зв'язуючого, см^3	200/150/130	200/300/130	200/400/130
Масова ($\omega_{зв}$) та об'ємна ($\varphi_{зв}$) частка зв'язуючого / Масова (ω_n) та об'ємна (φ_n) частка наповнювача	0,57/0,43	0,36/0,64	0,27/0,73

Результати свідчать про те, що в одному об'ємі і вазі містяться різні кількості матеріалу. Оскільки при монтажі технологічного обладнання на анкерних болтах і при роботі з'єднання старого бетону з новим, вимірювання компонентів акрилового клею в основному проводиться шляхом об'ємного вимірювання – об'ємних частин, а експериментальні дані проводяться на масових частках. Тому було важливо встановити співвідношення між масовою часткою та об'ємною часткою.

130 см^3 зв'язуючого містить 200 г, 150 г наповнювача розміром 0,14 мм займає 97,5 см^3 , 300 г наповнювача розміром 0,315 мм займає 195 см^3 , і 400 г наповнювача розміром 0,63 мм займає 260 см^3 .

Отримані дані дозволяють уточнити вираз (1) з

урахуванням впливу розміру наповнювача на зчеплення акрилового клею:

$$PE_{\kappa} = (PE_n + \frac{PE_{nmma} \pm PH_{mma}}{kPE_{зв}}) \cdot \frac{\varphi_n}{\varphi_{зв}}, \quad (3)$$

де PE_n – поверхнева енергія наповнювача (кварцу);
 PE_{nmma} – поверхнева енергія поліметилметакрилату;

PE_{mma} – поверхневий натяг метилметакрилату;
 kPE – відношення PE_{nmma} і PH_{mma} у зв'язуючому;

φ_n – об'ємна частка наповнювача;

$\varphi_{зв}$ – об'ємна частка зв'язуючого.

Результати обчислень поверхневої енергії та роботи зчеплення наведені в табл. 4.

Таблиця 4

Поверхнева енергія та робота зчеплення акрилового клею залежно від розміру наповнювача

Характеристики	Склад зв'язуючого № 2			Склад зв'язуючого № 3		
	Крупність наповнювача			Крупність наповнювача		
	0,14	0,315	0,63	0,14	0,315	0,63
Поверхнева енергія (PE_k)	415,52	396,28	319,33	417,42	398,95	320,8
Робота когезії (W_k)	831,04	792,56	638,66	834,84	796,84	641,6

Оскільки частка наповнювача зменшується зі збільшенням розміру частинок з 52,01 % для піску 0,14 мм до 45,47 %, SEC також зменшується. Це призводить до тієї ж тенденції для якості зчеплення і, відповідно, теоретичного зниження міцності на розрив акрилового клею в 1,3 рази.

Теоретично максимальна досягається якість зчеплення – кварцове зчеплення. Зчеплення акрилового клею характеризується комбінацією його компонентів. Оскільки воно нижче для зв'язуючого, ніж для наповнювача, для збільшення якості зчеплення акрилового клею необхідно мінімізувати кількість зв'язуючого.

Як описано вище, форму, розмір частинок, питому площу поверхні, розподіл розмірів частинок, пористість, співвідношення масових часток компонентів (φ_{ze} – об'ємна частка зв'язуючого та φ_n – об'ємна частка наповнювача) і максимальну об'ємну частку наповнювача (φ_m) дисперсних частинок можна використовувати як параметри дисперсної структури наповненої акрилової композиції [5].

Значення максимальної частки наповнювача – φ_m можна розрахувати для частинок правильної форми або експериментально визначити для будь-яких частинок, більших за 40 мкм [6]:

$$\varphi_m = \rho_{нас} / \rho_{іст} . \quad (4)$$

При насипній щільності наповнювача $\rho_{нас} = 1\,470 \text{ кг/м}^3$ і справжній щільності $\rho_{іст} = 2,5 \text{ г/см}^3$ для кварцового піску з розміром частинок 0,14 мм (φ_{m1}), що використовується в клейовій композиції, він буде становити 0,57 об'ємних часток, що, відповідно до $\varphi_{ze} - \varphi_n$ (0,57–0,43), дає можливість визначити відношення фракції φ_{m1} до об'ємної частки наповнювача фракцією 0,16 мм, тобто:

$$\frac{\varphi_{m1}}{\varphi_{n1}} = \frac{0,57}{0,43} = 1,367 . \quad (5)$$

Цей коефіцієнт дозволяє теоретично простежити зміну максимальної об'ємної частки наповнювача у разі зміни крупності зерна:

- для 0,14 мм – $\varphi_{m1} = 1,367 \cdot \varphi_{n1} = 1,367 \cdot 0,43 = 0,58$;
- для 0,315 мм – $\varphi_{m2} = 1,367 \cdot \varphi_{n2} = 1,367 \cdot 0,64 = 0,82$;
- для 0,63 мм – $\varphi_{m3} = 1,367 \cdot \varphi_{n3} = 1,367 \cdot 0,73 = 0,95$.

Із аналізу структури повторюваного елемента дисперсної структури з кубічним пакуванням частинок (рис. 2) випливає, що при $\varphi_n = \varphi_m$ частинки перебувають у контакті одна з одною, і склад полімеру, необхідного для отримання наповненого матеріалу, є однаковим:

$$\varphi_c = (1 - \varphi_m) . \quad (6)$$

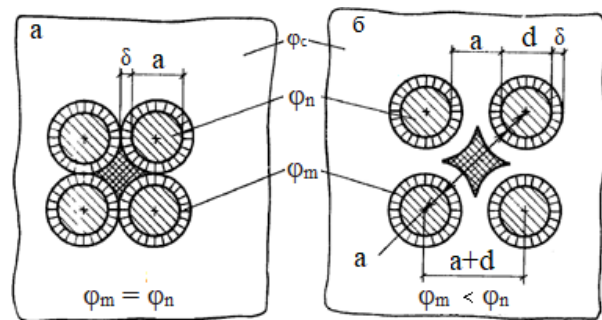


Рис. 2. Повторюваний елемент дисперсної структури клейового композиційного матеріалу з кубічною упаковкою частинок [1]

Коли $\varphi_m > \varphi_n$, дисперсні частинки знаходяться на певній середній відстані одна від одної (a), яка залежить від діаметра, щільності упаковки та складу дисперсної фази. У цьому випадку враховуються початкові параметри як наповнювача (розмір, форма та щільність упаковки), так і самої клейової композиції (співвідношення компонентів). Кількість полімеру визначається за виразом (7):

$$\varphi_c = (1 - \varphi_m) + (\varphi_m - \varphi_n) , \quad (7)$$

тобто, «відсушення» частинок наповнювача на відстань a досягається за рахунок об'ємної частки полі-

меру, рівної $\varphi_n = \varphi_m$. Середня відстань між дисперсними частинками є узагальненим структурним параметром, що враховує майже всі змінні, які можна розрахувати за виразом [7]:

$$a = d \left(\sqrt[3]{\frac{\varphi_m}{\varphi_n}} - 1 \right), \quad (8)$$

де d – діаметр частинки наповнювача;
 φ_n – об’ємна частка наповнювача в композиційному матеріалі.

Підставляючи до виразу (8) дані насипних частинок наповнювача різних розмірів, вказаних у табл. 2, ми визначили значення відстані між частинками наповнювача, яка є дисперсією частинок дисперсної фази в наповненій акриловій системі (рис. 2). Динаміка даних демонструє збільшення відстані між частинками наповнювача у випадку зменшення його об’ємної частки в акриловій композиції.

При переході від об’ємних відсотків до відсотків ваги, тобто зі збільшенням об’ємної частки наповнювача та зменшенням розміру його частинок, значення параметра a зменшується, а отже, деформованість та текучість адгезивного матеріалу зменшуються, а модуль пружності збільшується. При порівнянні характеристик наповненої полімерної композиції з $\varphi_n = const$ стає ясно, що узагальнений параметр a значно відрізняється для систем з різними розмірами часток. Аналогічно, a змінюється при використанні наповнювачів з однаковим d , але з різною щільністю упаковки, що характеризується значенням φ_n . Характеристики наповненої акрилової композиції з різним вмістом наповнювача при $\varphi_n = const$ неможливо порівняти, найправильніше порівнювати властивості при $a = const$, оскільки в цьому випадку значення a враховує зміну змінних параметрів d , φ_m і φ_n . Отже, параметр a є характеристикою геометричного опису дисперсної структури акрилової композиції.

Як видно на рис. 3 і 4, відстань між частинками наповнювача підтримується в діапазоні від 0,018 до 0,094 мкм при збереженні знайдених емпіричних співвідношень наповнювач–зв’язувач для різних розмірів наповнювачів, що забезпечує, з одного боку, оптимальні реологічні параметри наповненої акрилової системи. З іншого боку, оскільки наповнювач значно впливає на формування структури, у наповненому полімері важко пройти процеси релаксації.

У процесі отримання клейового з’єднання (шва) з мономерно-полімерної системи відбувається перехід від в’язкого до скляного стану. В результаті утворення клейової системи супроводжується зміною конформації ланцюгів внаслідок утворення адсорбційних зв’язків між макромолекулами і поверхнею наповнювача. Через ускладнення перебігу процесів релаксації при збільшенні концентрації або

зниженні температури виникають залишкові напруження, що є вкрай небажаним при отриманні клейових з’єднань будівельних конструкцій [1].

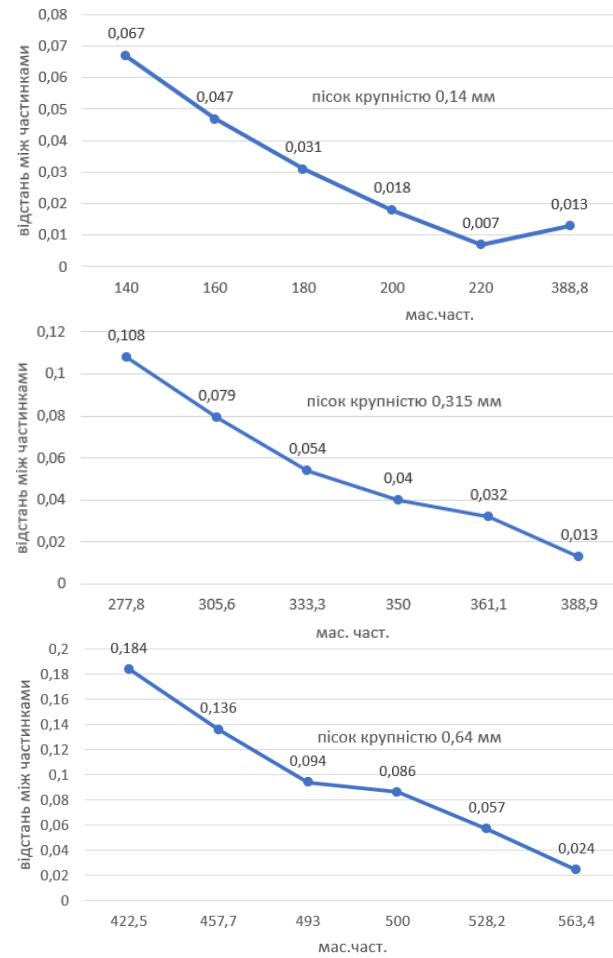


Рис. 3. Відстань між частинками (мкм) залежно від розміру зерна і обсягу наповнювача в системі

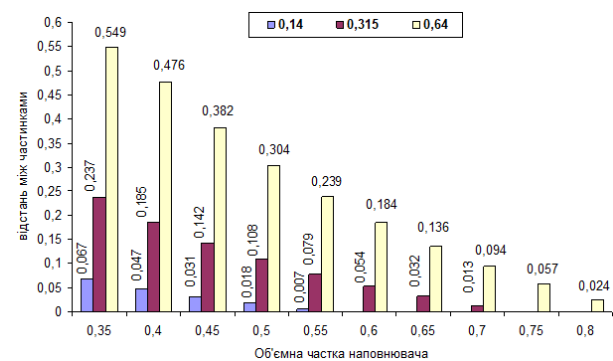


Рис. 4. Відстань між частинками наповнювача (мкм) залежно від розміру зерна і частки наповнювача в системі

Взаємодії на межі полімерної матриці – наповнювач є фундаментальними для вивчення міцності зчеплення композитних матеріалів, зокрема акрилових клеїв.

Коли дисперсні наповнювачі будь-якої природи

поєднуються зі зв'язуючим, відбувається процес адгезії через первинне змочування поверхні та подальше адсорбування. Отже, процеси, що відбуваються на межі між полімерними частинками наповнювача, впливають на пористість кінцевого матеріалу, а також на весь спектр його фізичних і механічних характеристик. Однак наразі неможливо виміряти (тобто кількісно визначити) кути змочування, термодинамічну роботу адгезії та міцність адгезії в системах полімерної матриці – наповнювача з частинками через відсутність відповідних методів вимірювання.

У таких системах процеси, що відбуваються на межі, опосередковано виводяться за змінами фізичних і механічних характеристик отриманих матеріалів.

Висновки

Найбільш об'єктивні висновки можна зробити після обробки частинок наповнювача, оскільки в цьому випадку все визначається зміною взаємодій на межі (властивості матриці в об'ємі практично не змінюються). В інших випадках (наприклад, у разі зміни температурних і тимчасових умов підготовки та випробування) змінюються не тільки поверхневі, але й об'ємні властивості матриці, і, відповідно, зазвичай неможливо зробити остаточні висновки про роль адгезії. Оскільки процеси адгезії є частиною міцності зчеплення клейкого матеріалу, то міцність адгезії (також називається міжфазною міцністю, міцністю на межі та міцністю зв'язку) є предметом постійних досліджень протягом декількох десятиліть [7–10].

Міцність адгезії є кількісним показником адгезії, тобто кількісним показником сил адгезії між полімерною матрицею та дисперсним наповнювачем як підкладкою. Тоді як кут змочування кромки характеризує процес утворення адгезійного зв'язку, міцність адгезії характеризує процес його руйнування.

У композитах міцність адгезії компонентів визначає ефективність передачі навантаження через межу. Саме тому інтерфейс можливо розглядати як третій компонент композиту, крім наповнювача та зв'язуючого. Якщо адгезії немає, то немає і полімерного композиту, і міцність матеріалу дорівнює міцності вільних частинок наповнювача.

При достатньо високій адгезії місцем початку руйнування буде або матриця, або наповнювач. Властивості такого композиту можуть не залежати від міцності на межі.

Знаючи межі «ідеального» регіону адгезії, можна відповісти на питання, до яких меж слід прагнути для поліпшення адгезії, але це вимагає практичного вимірювання міжфазної міцності між акриловою композицією та наповнювачем, що є складним. Внаслідок цього міцність композиту може бути монотонно зростаючою функцією міцності адгезії, але лише в обмеженому діапазоні значень. Збільшення адгезії може призвести до зниження міцності клей-

кого матеріалу, залежно від розміру частинок наповнювача та об'ємної частки наповнювача.

Міцність адгезії є кількісним показником сили зчеплення між полімерною матрицею та дисперсним наповнювачем. Міцність адгезії впливає на міцність композитного матеріалу. Ідеальна міцність адгезії залежить від розміру та об'ємної частки наповнювача. Надмірна міцність адгезії може призвести до зниження міцності клейкого матеріалу.

Література

1. Золотов С. М. Терморезактивні смоли холодного затвердіння для відновлення та реконструкції промислових і цивільних будівель : монографія / С. М. Золотов, О. М. Пустовойтова, П. М. Фірсов ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2019. – 184 с. – Режим доступу: <https://eprints.kname.edu.ua/53202/1/2017%20печ.1%20МН%20.pdf>, вільний (дата звернення: 05.03.2024).
2. Комп'ютерне моделювання роботи клейових з'єднань сталі та бетону при дії характерних руйнівних зусиль / П. М. Фірсов, С. М. Золотов, О. М. Пустовойтова, М. Обейд // Науковий вісник будівництва. – 2020. – Т. 100, № 2. – С. 210–218. – Режим доступу: <https://svc.kname.edu.ua/index.php/svc/article/view/311/309>, вільний (дата звернення: 05.03.2024).
3. The microstructure evolution of cement paste modified by cationic asphalt emulsion / W. Li, Z. Mao, G. Xu, J. Hong, H. Chang, H. Zhao, Z. Liu // Advances in Cement Research. – 2021. – Vol. 33, Issue 10. – P. 436–446. – DOI: [10.1680/jadcr.19.00164](https://doi.org/10.1680/jadcr.19.00164).
4. Трикоз Л. В. Вплив виду та кількості наповнювача на деформативні властивості акрилового композиційного матеріалу для ремонту бетонних конструкцій / Л. В. Трикоз, С. М. Камчатна, О. М. Пустовойтова // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. – 2019. – Вип. 74. – С. 122–128. – Режим доступу: <http://visnyk-odaba.org.ua/2019-74/16.pdf>, вільний (дата звернення: 05.03.2024).
5. Ромашико-Майстрок О. В. Моделювання зчеплення арматури з бетоном в залізобетонних елементах / О. В. Ромашико-Майстрок // Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту. – 2020. – Вип. 190. – С. 37–45. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Znpudazt_2020_190_6, вільний (дата звернення: 05.03.2024).
6. Contact Area and Shear Stress in Repeated Single-Asperity Sliding of Steel on Polymer / X.-Q. Pei, L. Lin, A. K. Schlarb, R. Bennowitz // Tribology Letters. – 2019. – Vol. 67. – Article 30. – DOI: [10.1007/s11249-019-1146-y](https://doi.org/10.1007/s11249-019-1146-y).
7. Carbon Fiber-Reinforced Polymer Spike Anchor Design Recommendations / W. A. Shekarchi, D. K. Pudleiner, N. K. Alotaibi, W. M. Ghannoum, J. O. Jirsa // Structural Journal. – 2020. – Vol. 117, Issue 6. – P. 171–182. – DOI: [10.14359/51728065](https://doi.org/10.14359/51728065).
8. Mechanical Analysis of Stress Distribution in a Carbon Fiber-Reinforced Polymer Rod Bonding Anchor / P. Feng, P. Zhang, X. Meng, L. Ye // Polymers. – 2014. – Vol. 6, Issue 4. – P. 1129–1143. – DOI: [10.3390/polym6041129](https://doi.org/10.3390/polym6041129).
9. Effects of radial stress at anchor zone on tensile properties of basalt fiber-reinforced polymer tendons / J. Shi, X. Wang, Z. Wu, Z. Zhu // Journal of Reinforced Plastics and Composites. – 2015. – Vol. 34, Issue 23. – P. 1937–1949. – DOI: [10.1177/0731684415606857](https://doi.org/10.1177/0731684415606857).
10. Evaluation of in-situ shrinkage and expansion properties of polymer composite materials for adhesive anchor systems

by a novel approach based on digital image correlation / G. Singer, G. Sinn, H. C. Lichtenegger, S. Veigel, M. Zecchini, R. Wan-Wendner // *Polymer Testing*. – 2019. – Vol. 79. – Article 106035. – DOI: [10.1016/j.polymertesting.2019.106035](https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2019.106035).

References

1. Zolotov, S. M., Pustovoitova, O. M., & Firsov, P. M. (2019). *Cold-curing thermosetting resins for the restoration and reconstruction of industrial and civil buildings: monograph*. O. M. Beketov NUUE. <https://eprints.kname.edu.ua/53202/1/2017%20печ.1%20МН%20.pdf> [in Ukrainian]
2. Firsov, P. M., Zolotov, S. M., Pustovoitova, O. M., & Obeid, M. (2020). Computer modeling of steel and concrete adhesive joint operation under the action of characteristical destruction forces. *Scientific Bulletin of Construction*, 100(2), 210–218. <https://svc.kname.edu.ua/index.php/svc/article/view/311/309> [in Ukrainian]
3. Li, W., Mao, Z., Xu, G., Hong, J., Chang, H., Zhao, H., & Liu, Z. (2021). The microstructure evolution of cement paste modified by cationic asphalt emulsion. *Advances in Cement Research*, 33(10), 436–446. <https://doi.org/10.1680/jadcr.19.00164>
4. Trykoz, L. V., Kamchatna, S. M., & Pustovoitova, O. M. (2019). Impact of filler type and quantity on deformation properties of acrylic composite material for repairing of concrete constructions. *Bulletin of Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture*, (74), 122–128. <http://visnyk-odaba.org.ua/2019-74/16.pdf> [in Ukrainian]
5. Romashko-Maistruk, O. V. (2020). Modeling of reinforcement-concrete adhesion in reinforced concrete elements. *Collection of scientific works of the Ukrainian State University of Railway Transport*, (190), 37–45. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Znpudazt_2020_190_6 [in Ukrainian]
6. Pei, X.-Q., Lin, L., Schlarb, A. K., & Bennowitz, R. (2019). Contact Area and Shear Stress in Repeated Single-Asperity Sliding of Steel on Polymer. *Tribology Letters*, 67, 30. <https://doi.org/10.1007/s11249-019-1146-y>
7. Shekarchi, W. A., Pudleiner, D. K., Alotaibi, N. K., Ghannoum, W. M., & Jirsa, J. O. (2020). Carbon Fiber-Reinforced Polymer Spike Anchor Design Recommendations. *Structural Journal*, 117(6), 171–182. <https://doi.org/10.14359/51728065>
8. Feng, P., Zhang, P., Meng, X., & Ye, L. (2014). Mechanical Analysis of Stress Distribution in a Carbon Fiber-Reinforced Polymer Rod Bonding Anchor. *Polymers*, 6(4), 1129–1143. <https://doi.org/10.3390/polym6041129>
9. Shi, J., Wang, X., Wu, Z., & Zhu, Z. (2015). Effects of radial stress at anchor zone on tensile properties of basalt fiber-reinforced polymer tendons. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 34(23), 1937–1949. <https://doi.org/10.1177/0731684415606857>
10. Singer, G., Sinn, G., Lichtenegger, H. C., Veigel, S., Zecchini, M., & Wan-Wendner, R. (2019). Evaluation of in-situ shrinkage and expansion properties of polymer composite materials for adhesive anchor systems by a novel approach based on digital image correlation. *Polymer Testing*, 79, 106035. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2019.106035>

Рецензент: д-р техн. наук, проф. С.В. Воронін, Український державний університет залізничного транспорту, Україна.

Автор: ЗОЛОТОВ Сергій Михайлович
кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри будівельних конструкцій
Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова
E-mail – bk@kname.edu.ua
ID ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3649-1871>

Автор: ПУСТОВОЙТОВА Оксана Михайлівна
кандидат технічних наук, доцент кафедри будівельних конструкцій
Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова
E-mail – oksana_pustov@ukr.net
ID ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-4774-6686>

Автор: КАМЧАТНА Світлана Миколаївна
кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри вищої математики та фізики
Український державний університет залізничного транспорту
E-mail – kamchatnayasn@gmail.com
ID ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5711-4146>

Автор: САВІСЬКО Сергій Анатолійович
аспірант кафедри будівельних конструкцій
Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова
E-mail – bk@kname.edu.ua

Автор: ЛИТВИНОВА Ганна Михайлівна
аспірант кафедри будівельних конструкцій
Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова
E-mail – bk@kname.edu.ua

**MODELLING THE STRUCTURAL PARAMETERS OF THE GLUE COMPOSITION
AND STUDYING ITS ADHESIVE STRENGTH**S. Zolotov¹, O. Pustovoitova¹, S. Kamchatna², S. Savisko¹, H. Lytvynova¹¹O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Ukraine²Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine

The study considers a model of a filled polymer system to analyse the interaction and relationship between its components and adhesive properties. A two-phase system occurs in the filler composition, which forms a layer at the interface with properties different from the bulk properties of the filler and the binder. The system consists of a filler, a boundary layer, and a binder, with their properties accounted for with the accuracy of the manufacturing conditions and the dimensions of the sample. We found that the filler grains shape significantly affects the properties of the system, such as bond strength and water resistance. Distance analysis between filler particles showed that a decrease in its volume fraction in the composition leads to an increased distance between them. We can draw the most objective conclusions after processing the filler particles since, in this case, everything depends on the change of interactions at the boundary (the properties of the matrix in the volume practically do not change). In other cases (for example, in the case of changing the temperature and time conditions of preparation and testing), not only the surface but also the volume properties of the matrix change, and, accordingly, it is usually impossible to conclude the role of adhesion. Its processes are part of the adhesion strength of the adhesive material, so the adhesion strength (also called interfacial strength, boundary strength, and bond strength) has been the subject of constant research for several decades. Adhesion strength is a quantitative indicator of adhesion, i.e., a quantitative indicator of the adhesion forces between the polymer matrix and the dispersed filler as a substrate. While the wetting angle of the edge characterises the process of formation of an adhesive bond, the strength of adhesion characterises the process of its destruction. Knowing the limits of the 'ideal' adhesion region can answer the question of what limits to aim for to improve adhesion, but this requires practical measurement of the interfacial strength between the acrylic composition and the filler, which is challenging. As a result, the strength of the composite can be a monotonically increasing function of the adhesion strength, but only in a limited range of values. An increase in adhesion can lead to a decrease in the strength of the adhesive material, depending on the size of the filler particles and the volume fraction of the filler. Adhesion strength is a quantitative indicator of the adhesion strength between the polymer matrix and the dispersed filler. The strength of adhesion affects the strength of the composite material. The ideal adhesion strength depends on the size and volume fraction of the filler. Excessive adhesion strength can lead to a decrease in the strength of the adhesive material.

Keywords: polymer-mineral composition, adhesion, cohesion, acrylic glue.