

С.М. Золотов¹, Л.В. Трикоз², О.М. Пустовойтова¹, С.М. Камчатна², Є.Ф. Орел²

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

²Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна

ОСОБЛИВОСТІ ОПТИМІЗАЦІЇ ВЛАСТИВОСТЕЙ КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ АКРИЛОВИХ МОНОМЕРІВ

Розглянуто особливості оптимізації властивостей композитних матеріалів на основі акрилових мономерів. Встановлено, оптимальний температурний режим для досягнення максимальної міцності акрилового композиту, довговічність адгезійного з'єднання в різних умовах експлуатації. Досліджено вплив модифікаторів на міцнісні характеристики акрилового композиту.

Ключові слова: акрилові композити, модифікація, метилметакрилат, міцність, температура, затвердіння, ремонт.

Постановка проблеми

Експлуатація будівель та споруд в Україні потребує нових вимог до будівельних матеріалів. Інтенсивне навантаження на інфраструктуру, спричинене зростанням економічної активності та урбанізацією, у поєднанні з ризиком надзвичайних ситуацій призводить до необхідності швидкого та ефективного відновлення пошкоджень. Традиційні будівельні матеріали часто не в змозі забезпечити необхідний рівень довговічності та стійкості до агресивних впливів довкілля.

Одним із перспективних рішень цієї проблеми є широке застосування композитних матеріалів, зокрема на основі акрилових полімерів, таких як метилметакрилат (ММА). Полімерні композиційні матеріали (ПКМ) на основі ММА відзначаються унікальним поєднанням високої міцності, жорсткості, стійкості до хімічного впливу та вологи, а також здатністю швидко набирати міцність. Ці властивості роблять їх незамінними при проведенні ремонтних та відновлювальних робіт в умовах обмежених термінів та високих вимог до якості.

Особливо актуальним застосування композитних матеріалів є у випадках, коли необхідно відновити пошкоджені конструкції промислового обладнання, які піддаються впливу корозії та інших агресивних факторів. Композитні матеріали на основі ММА дозволяють ефективно вирішити ці проблеми завдяки своїй адгезії до різних поверхонь та здатності формувати монолітне покриття.

Використання вітчизняних композитних матеріалів дозволяє підвищити енергоефективність будівель та споруд, а також забезпечити довготривалу експлуатацію об'єктів інфраструктури.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Дослідження технологічних властивостей акрилових сполучних та їх модифікованих композитів є актуальним завданням сучасної науки. Ряд вчених, таких як С.В. Клемент'єв, В.Ф. Степанова, А. В. Бучкін, М. С. Золотов та інші, присвятили свої роботи вивченню властивостей та застосування полімерних композиційних матеріалів (ПКМ) на основі метилметакрилату (ММА). Незважаючи на значну кількість досліджень в цій галузі, питання вибору оптимальних композиційних матеріалів для конкретних умов експлуатації залишається відкритим.

Особливий інтерес представляють роботи В.Ф. Степанова, К.Ф. Гаркуша, М. С. Золотова та їхніх колег, присвячені вивченню дослідженню властивостей полімерів. Однак, існуюча наукова база в цій області все ще потребує подальшого розвитку.

Аналіз сучасних наукових публікацій свідчить про те, що основним напрямком досліджень є розробка конструкційних композиційних матеріалів на основі акрилових сполучних з регульованими характеристиками. При цьому особлива увага приділяється забезпеченню високої швидкості набору міцності, комплексу механічних та фізико-хімічних властивостей, а також здатності матеріалів зберігати свої експлуатаційні характеристики в широкому діапазоні температур.

Таким чином, актуальність дослідження полягає в необхідності розробки нових, високотехнологічних композиційних матеріалів, які б дозволили ефективно вирішувати проблеми, пов'язані з ремонтом та відновленням конструкцій в різних галузях промисловості та будівництва.

Поглиблене вивчення технології застосування та фізико-механічних властивостей композитів є ключовим завданням для забезпечення їх ефективного використання в різних галузях промисловості

та будівництва.

Особливу увагу приділено дослідженню впливу різних наповнювачів на характеристики полімерної матриці. Вивчення змін молекулярної маси, щільності упаковки макромолекул та інших параметрів дозволяє оптимізувати склад композитів та досягти бажаних властивостей. Крім того, розробляються нові склади та технології застосування композитів для виконання спеціальних видів робіт, таких як ремонт конструкцій, створення захисних покриттів тощо.

Одним з невирішених питань є вплив температури на швидкість набору в'язкості та формування фізико-механічних властивостей полімерних композиційних матеріалів (ПКМ). Недостатньо вивченим залишається також питання про можливості підвищення та спрямованого регулювання експлуатаційних характеристик ПКМ при несприятливих умовах затвердіння, таких як низькі температури або висока вологість.

Для подальшого розвитку цієї галузі необхідно дослідити вплив інших факторів, таких як тип акрилового полімера, вид і кількість наповнювача, умови затвердіння, на властивості композитів; більш детально вивчити процеси, що відбуваються при формуванні композитів; розробити математичні моделі, які дозволять прогнозувати властивості композитів в залежності від складу та умов обробки.

Вирішення цих завдань дозволить створити нове покоління композиційних матеріалів з покращеними характеристиками, що знайдуть широке застосування в різних галузях будівництва [1-2].

Питання модифікації акрилових композицій є одним з ключових у сучасних дослідженнях матеріалів. Використання різних модифікаторів, таких як пасивні (нереакційноздатні) та реакційноздатні домішки, наповнювачів та структуруючих компонентів, дозволяє значно розширити спектр властивостей композитів та адаптувати їх до конкретних умов застосування.

Особливо актуальним є питання модифікації акрилових композицій для забезпечення їхньої ефективної роботи в екстремальних умовах, таких як низькі температури, висока вологість або наявність агресивних середовищ. Модифікація дозволяє не лише підвищити міцність та довговічність матеріалів, але й забезпечити їхню швидку полімеризацію, що є критично важливим для проведення ремонтних робіт в умовах обмеженого часу.

Одним з найважливіших факторів, що впливають на властивості акрилових композитів, є температура. Швидкість набору міцності, кінцеві міцнісні характеристики та інші властивості композитів значною мірою залежать від температури затвердіння.

Традиційно при дослідженні міцнісних характеристик композитів використовувалися однакові для різних температур відрізки часу затвердіння. Однак, такі підходи не дозволяли повністю оцінити

вплив температури на кінетику процесу затвердіння та формування структури матеріалу.

Сучасні дослідження показали, що міцність композитів є функцією часу та температури затвердіння. Були розроблені аналітичні моделі, які дозволяють описати зміну міцності композитів у широкому діапазоні температур. Однак, ці моделі, як правило, мають приватний характер і не враховують специфіку різних типів акрилових полімерів.

Для ефективного застосування полімерних композиційних матеріалів, зокрема на основі метилметакрилату (ММА), у ремонтно-відновлювальних роботах, необхідне виконання ряду вимог. Однією з найважливіших є здатність матеріалів швидко затверджувати без підведення зовнішнього тепла. Це дозволяє скоротити тривалість ремонтних робіт.

Подальший розвиток досліджень в галузі акрилових композитів спрямований на створення модифікаторів з заданими властивостями, які дозволять поліпшити характеристики композитів в конкретних умовах застосування; розробку оптимальних співвідношень компонентів композитів для забезпечення необхідних властивостей; розробку універсальних математичних моделей, які дозволять прогнозувати властивості композитів в залежності від складу та умов затвердіння; пошук нових областей застосування акрилових композитів.

Отже, акрилові композити є перспективними матеріалами з широким спектром застосування. Завдяки своїм високим міцнісним характеристикам, стійкості до агресивних середовищ та можливості швидкого затвердіння, вони знаходять все більше застосування в різних галузях промисловості. Однак, для повної реалізації потенціалу цих матеріалів необхідні подальші дослідження в області їх модифікації та оптимізації властивостей [3].

Для запуску та контролю процесу полімеризації метилметакрилату (ММА) з метою отримання полімерних композиційних матеріалів (ПКМ) з необхідними властивостями широко застосовуються бінарні окисно-відновні системи. Ці системи складаються з двох компонентів: ініціатора полімеризації та прискорювача.

Ініціатор полімеризації – це речовина, яка під дією тепла або світла розпадається на вільні радикали. Ці радикали, в свою чергу, ініціюють ланцюгову реакцію полімеризації мономерів ММА.

Прискорювач розпаду ініціатора – це речовина, яка прискорює розпад ініціатора на вільні радикали, що дозволяє знизити температуру полімеризації та збільшити швидкість процесу.

Однією з найпоширеніших бінарних систем є комбінація пероксиду бензоїлу (ПБ) та диметиланіліну (ДМА). При взаємодії цих речовин утворюються бензоатні радикали, які є активними центрами полімеризації. Ця система дозволяє досягти високої

швидкості полімеризації при відносно низьких температурах і забезпечує хорошу гомогенність отриманого полімеру.

Мета дослідження

Багато органічних сумішей здатні утворювати композити, які тверднуть навіть при низьких температурах (нижче 0°C). Однак, швидкість набору міцності таких матеріалів часто недостатня для швидких ремонтних робіт.

Серед усіх органічних сумішей, акрилові компаунди демонструють найвищу швидкість набору міцності в широкому діапазоні температур. Це пояснюється низькою енергією активації процесу полімеризації акрилових мономерів, яка запускається за допомогою спеціальних ініціаторів. Завдяки цій особливості, акрилові композити можуть твердіти навіть при низьких температурах і в короткий час набирають високу міцність [4-6].

Проте, незважаючи на очевидні переваги, існує ряд питань, які потребують подальшого дослідження – це вплив температури на швидкість набору міцності та інші властивості акрилових композитів, вплив зміни співвідношення компонентів композиту (полімер, наповнювач, ініціатор) на його властивості, дослідження процесу затвердіння акрилових композитів на молекулярному рівні.

Визначення відповідей на ці питання дозволить підібрати оптимальне співвідношення компонентів для отримання матеріалу з необхідними властивостями, контролювати швидкість набору міцності композиту шляхом зміни температури та складу, застосовувати акрилові композити в більш широкому діапазоні температурних умов. Глибоке розуміння процесів, що відбуваються при затвердінні акрилових композитів, є необхідною умовою для їх ефективного використання в різних галузях промисловості та будівництва [7-10].

Мета дослідження полягає у комплексному вивченні властивостей композиційних матеріалів на основі метилметакрилату (ММА) з метою їх ефективного застосування.

Завдання дослідження:

- визначення оптимального температурного режиму для досягнення максимальної міцності композиту в найкоротші терміни (1,5-2 години).
- дослідження впливу різних наповнювачів та інших компонентів на міцність, довговічність та інші властивості матеріалу.
- виявлення ефективних способів модифікації ММА з метою збільшення міцності композиту.
- дослідження довговічності адгезійного з'єднання в різних умовах експлуатації.
- порівняння властивостей розроблених композитів з існуючими матеріалами.

Результати дослідження дозволять розробити

нові, більш ефективні композиційні матеріали для ремонтних робіт, що знайдуть широке застосування в будівництві, промисловості та інших галузях.

Викладення основного матеріалу

Об'єктом дослідження був метилметакрилат, стабілізований дифенілолпропаном. Високонаповнені полімерні композити матеріали (ПКМ) на основі метилметакрилату є інженерними матеріалами, що складаються з акрилового полімеру, наповнювачів та інших добавок.

Для поліпшення характеристик композитів та забезпечення необхідної життєздатності до складу були додані модифікаторів: метакрилова кислота (МАК), пероксид бензоїлу (ПБ), диметиланілін (ДМА).

Для наповнення композитів використовували кварцовий пісок – мінеральний матеріал з розміром зерен близько 0,2 мм, що містить не менше 98% діоксиду кремнію та має насипну густину 1,53 кг/дм³.

Для ініціювання процесу затвердіння акрилової смоли застосовували окисно-відновну систему, що складається з пероксиду бензоїлу та диметиланіліну. В ході експерименту було отримано результати які показують, як змінюється міцність композиту залежно від кількості цих ініціаторів.

Для дослідження фізико-механічних характеристик ПКМ на основі базових акрилових полімерів, таких як міцність на стиск та на вигин, були виготовлені відповідні експериментальні зразки (рис. 1 а, б).



а



б

Рис. 1. Експериментальні зразки високонаповнених ПКМ для випробувань на міцність на стиск (а) та вигин (б)

Для оцінки адгезійних властивостей полімерних композиційних матеріалів на основі акрилового композиту були виготовлені комбіновані зразки (рис. 2).



Рис. 2. Комбіновані зразки для оцінки адгезійних властивостей високонаповнених ПКМ на основі акрилового композиту

Досліджено[11], що структура та властивості полімерних матеріалів на основі поліакрилатів визначаються їх хімічним складом. Спосіб, яким молекули полімеру взаємодіють між собою, впливає на властивості матеріалу. Додавання різних модифікаторів призводить до зміни структури полімеру, що, в свою чергу, змінює його фізичні властивості, включаючи поведінку при контакті з іншими матеріалами.

В результаті дослідження отримано кількісний опис процесу набору міцності високонаповненими ПКМ на основі ММА при різному вмісті компонентів ініціюючої системи пероксид бензоїлу (ПБ) та диметиланілін.

Було доведено, що шляхом зміни співвідношення пероксиду бензоїлу (ПБ) та диметиланіліну (ДМА) можна значно прискорити процес набору міцності композитів, особливо при низьких температурах. В результаті досліджень були визначені оптимальні концентрації ПБ та ДМА, які дозволяють досягти необхідної міцності (40 МПа) в найкоротші терміни.

За результатами дослідження встановлено, що за будь-якого вмісту диметиланіліну для полімерного матеріалу на основі ММА характерна екстремальна залежність (з максимумом) граничної міцності на вигін ($\sigma_{\text{виг}}$, МПа) від вмісту пероксиду бензоїлу (мас. %).

Результати дослідження граничної міцності ПКМ на основі метилметакрилату та метакрилової кислоти (1–25 мас. %) на стиск показані на рис. 3.

Дослідження впливу вмісту пероксиду бензоїлу (мас.%) та температури затвердіння на граничну міцність на стиск σ_{∞} (МПа) при різній температурі твердіння показано на рис. 4.

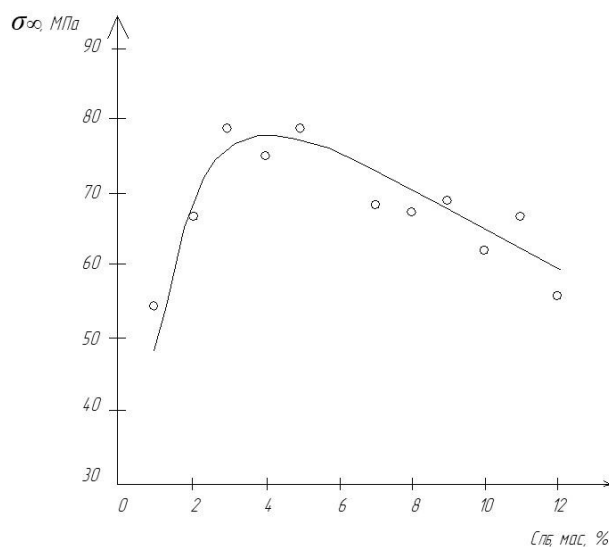


Рис. 3. Залежність граничної міцності ПКМ на основі ММА на стиск σ_{∞} (МПа) від вмісту пероксиду бензоїлу (мас. %) на прикладі диметиланіліну - 2,5 мас. %

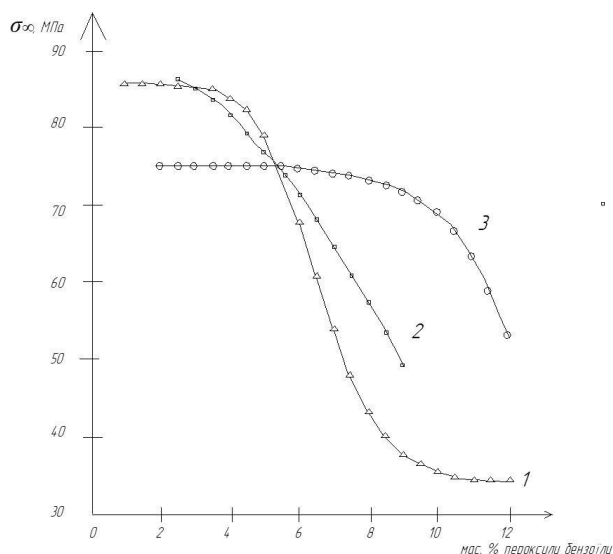


Рис. 4. Вплив вмісту пероксиду бензоїлу (мас.%) та температури затвердіння на граничну міцність на стиск σ_{∞} (МПа). Температура твердіння: 1 - 20 °C; 2 - +4 °C; 3 - 0 °C

Дослідження результатів затвердіння ПКМ на основі ММА у присутності бінарної окиснювально-відновної системи пероксид бензоїлу (ПБ) - диметиланілін (ДМА) при низьких позитивних температурах (близько до 0 °C) дозволяє прогнозувати набір міцності при різних змістах компонентів системи, що ініціює.

Встановлено, що при різних температурах затвердіння максимально міцні полімерні композиційні матеріали можуть бути отримані при використанні невеликих кількостей ПБ (2-4 мас. %) та ДМА (2,5 мас. %). Показано, що зниження температури

затвердіння веде до істотного збільшення часу втра-ти плинності та досягнення мінімальної експлуатаційної міцності на вигін (40 МПа).

Для оцінки того, як різні модифікатори впливають на рухливість молекулярних ланцюгів у полімерних матеріалах, було застосовано метод лінійної дилатометрії. Цей метод дозволяє визначити температуру склування (T_c) – температуру, при якій полімер переходить зі склуватого стану в гумоподібний. Зниження температури склування свідчить про збільшення рухливості сегментів полімерних ланцюгів, тобто вони стають більш рухливими та гнучкими. Це важливий параметр, оскільки він впливає на багато властивостей полімеру, таких як міцність, жорсткість, еластичність тощо.

Досліджено процес затвердіння полімерних матриць на основі метилметакрилату (ММА) за участю ініціюючої системи, що складається з пероксиду бензоїлу (ПБ) і диметиланіліну (ДМА). Ця система використовується для ініціювання полімеризації, тобто перетворення рідкого мономера на твердий полімер. Залежно від співвідношення компонентів цієї системи та температури затвердіння можна отримати полімерні матеріали з різними властивостями. Було встановлено, що оптимальний вміст ПБ та ДМА для досягнення максимальної міцності при різних температурах затвердіння становить близько 2–4 % та 2,5 %, відповідно. Зниження температури затвердіння призводить до збільшення часу, необхідного для досягнення максимальної міцності, що пояснюється уповільненням процесу полімеризації при низьких температурах.

Отримані результати дозволяють зробити висновок про те, що існує тісний взаємозв'язок між рухливістю макромолекул у полімері та його кінцевими властивостями. Так, збільшення рухливості ланцюгів, яке досягається за рахунок зниження температури склування або введення певних модифікаторів, може призводити до підвищення міцності, еластичності або інших бажаних властивостей. З іншого боку, надмірна рухливість може призвести до зниження міцності та жорсткості матеріалу.

Серед досліджених модифікаторів найбільш

ефективним для підвищення міцності зчеплення з субстратом виявилася метакрилова кислота. Введення цього модифікатора в полімерну матрицю призводить до значного підвищення температури склування, що свідчить про збільшення жорсткості полімеру. Цей ефект пояснюється утворенням міцних водневих зв'язків між молекулами метакрилової кислоти та іншими компонентами полімерної матриці.

Формування міцних зв'язків відіграє ключову роль у підвищенні адгезії. Молекули метакрилової кислоти, що містять карбоксильні групи, здатні утворювати водневі зв'язки не тільки між собою, але й з гідроксильними групами поверхні субстрату, наприклад, бетону. Це призводить до створення міцного хімічного зв'язку між полімерним покриттям та підкладкою, що значно підвищує адгезію.

Однак, залежність адгезії від концентрації метакрилової кислоти має максимум. При збільшенні вмісту метакрилової кислоти понад оптимальне значення (близько 10 мас.%) спостерігається зниження адгезії. Це пояснюється кількома факторами. По-перше, надмірна кількість метакрилової кислоти може призвести до утворення надмірної кількості водневих зв'язків між молекулами модифікатора, що може знизити їх здатність до взаємодії з поверхнею субстрату. По-друге, збільшення концентрації метакрилової кислоти може призвести до підвищення в'язкості полімерної композиції, що ускладнює змочування поверхні субстрату і, як наслідок, знижує адгезію. Крім того, надмірна кількість зв'язків може призвести до утворення більш жорсткої полімерної матриці, що може збільшити внутрішні напруження в шарі покриття і, таким чином, знизити адгезію.

Додавання метакрилової кислоти також впливає на швидкість затвердіння полімерної композиції. Збільшення концентрації метакрилової кислоти призводить до скорочення часу досягнення максимальної міцності. Це пояснюється тим, що карбоксильні групи метакрилової кислоти можуть каталізувати процес полімеризації

Експериментальні данні стосовно часу набору припустимої міцності ПКМ на основі ММА наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Характеристики процесу набору міцності ПКМ на основі ММА

Вміст компонентів ініціюючої системи, мас. %		Значення показників при температурах отвердження, °С								
		+20			+4			0		
ПБ	ДМА	σ^{I_r} МПа	σ МПа	T_{40} МПа	σ^{I_r} МПа	σ МПа	T_{40} МПа	σ^{I_r} МПа	σ МПа	T_{40} МПа
2.5	1.1	-	85,4	107	-	86,4	155,	-	75,2	1100
3.0	1.6	-	85,2	89	-	85,0	280	-	75,1	350
3,5	1.8	-	84,7	76	-	83,4	107	-	75,1	230
4.0	2.4	-	83,8	66	-	81,5	80	-	75,1	117

Продовження табл. 1

5.0 3	3.3	50,2	78,9	54	-	77,0	76	26,7	75,0	65
6.0	4,3	43,0	67,9	57	-	71,3	85	34,2	74,8	67
7.0	5,4	25,4	53,6	126	-	64,6	290	20,7	74,4	113

Примітка
 σ_{1r} (МПа) – міцність на стиск через 1 годину після змішування компонентів;
 T_{40} (хв) - час досягнення мінімальної експлуатаційної міцності, що дорівнює 40 МПа

Випробування на розтяг при розколюванні адгезійного контакту «ПКМ – субстрат» проводилось на комбінованих зразках (рис. 5).

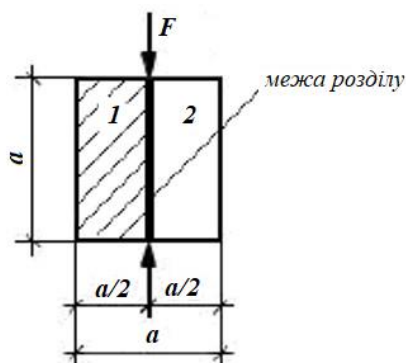


Рис. 5. Схема випробувань на розтяг при розколюванні адгезійного контакту ПКМ – субстрат: 1 – субстрат; 2 – високонаповнений ПКМ; а – довжина ребра зразка; F – прикладане зусилля

Дослідження показали, що додавання модифікатора МАК призводить до утворення більш щільної полімерної структури. На початкових етапах полімеризації в присутності МАК процес відбувається повільніше, але потім різко прискорюється, особливо під час утворення гелю. Вивчення процесу формування покриття з акрилових полімерів на бетонній поверхні показало, що адгезійні властивості покриття залежать від структури, яка утворюється під час полімеризації. Ця структура, в свою чергу, залежить від умов полімеризації, властивостей підкладки.

Результати дослідження впливу вмісту функціоналізованих акрилатів $C_{фА}$ (мас.%) на міцність зчеплення R (МПа) ПКМ із субстратом при кімнатній температурі ($\approx 20^{\circ}C$) показані на рис. 6.

Отримані результати дослідження показали, що введення метакрилової кислоти в полімерну матрицю призводить до значного підвищення міцності зчеплення з різними поверхнями. Це пояснюється тим, що молекули метакрилової кислоти здатні утворювати міцні водневі зв'язки як між собою, так і з молекулами інших речовин, зокрема, з поверхнею субстрату.

Встановлено також що, метакрилова кислота впливає на швидкість затвердіння полімерної композиції. Збільшення концентрації метакрилової кис-

лоти призводить до скорочення часу затвердіння. Це пояснюється тим, що карбоксильні групи метакрилової кислоти можуть каталізувати процес полімеризації. Введення метакрилової кислоти у кількості 7-15 мас.% дозволяє в 1,7-3,0 разів підвищити міцність зчеплення ПКМ з цементобетонною підкладкою і більш ніж 2,5 рази довговічність адгезійного контакту. Попереднє розчинення ПБ у сполучному підвищує міцність зчеплення на 20% при низькотемпературному затвердінні та на 45% при нормальних умовах.

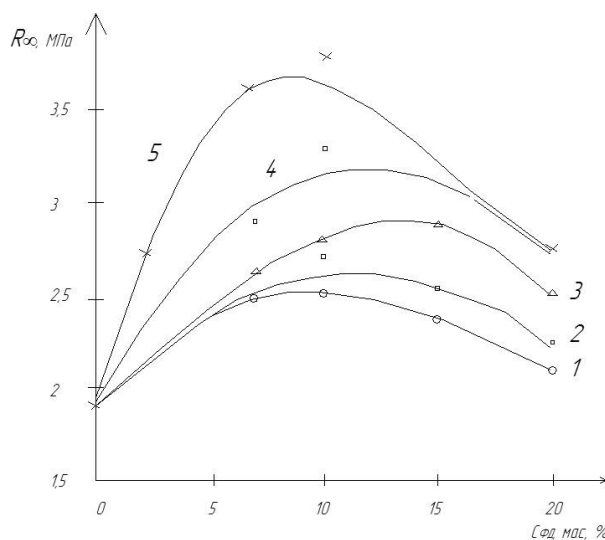


Рис. 6. Вплив вмісту функціоналізованих акрилатів $C_{фА}$ (мас. %) на міцність зчеплення R(МПа) ПКМ із субстратом: 1 – діметакриловий ефір триетиленгліколю (ТГМ-3); 2 – гліцидилметакрилат (ГМА); 3 – метакрилокси-пропіл-триметоксисилан (МПТМС); 4 – гідроксипропіл-метакрилат (ДПМА); 5 – метакрилова кислота (МАК)

Висновки

Було проведено дослідження процесів формування високонаповнених полімерних композиційних матеріалів на основі метилметакрилату та мінеральних наповнювачів (ступінь наповнення 50 мас.ч. %), отриманих в результаті полімеризації при звичайній температурі ($20^{\circ}C$) за компаундною технологією. Оптимізація складу ініціюючої системи та застосування акрилових мономерних модифікаторів дозволила отримати матеріали з підвищеними механічними характеристиками.

Аналіз залежності міцності композиту від кількості модифікатора МАК вказав на існування оптимальної концентрації, при якій молекули полімеру максимально щільно упаковуються на поверхні наповнювача. Така структура забезпечує ефективне передавання навантажень і, як наслідок, підвищення міцності матеріалу на 50% (з 1,8 до 2,7 МПа при вмісті модифікатора 10 мас. ч.).

В результаті проведених досліджень отримані композитні матеріали з високим вмістом наповнювача, які швидко затверджують при звичайній температурі (20°C), з підвищеними характеристиками міцності. Результати дослідження свідчать про перспективність використання таких матеріалів у різних галузях промисловості, ці матеріали можуть бути ефективно використані в будівництві для склеювання бетонних конструкційних елементів.

Література

- Achilias, D.S. PMMA/organomodified montmorillonite nanocomposites prepared by in situ bulk polymerization / D.S. Achilias, A.K. Nikolaidis, G.P. Karayannidis // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. – 2010. – V.102, Is. 2. – P.451-460
- Zanotto, A. Macro-micro relationship in nanostructured functional composites / A. Zanotto, A. Spinella, G. Nasillo, E.Caponetti, A. S. Luyt // *eXPRESS Polymer Letters*. – 2012. – V. 6, № 5. – P. 410–416.
- Annala, M. The effect of MWCNTs on molar mass in situ polymerization of styrene and methyl methacrylate / M. Annala, M. Lahelin, J. Seppälä // *European Polymer Journal*. – 2012. – V. 48. – P. 1516–1524.
- Золотов С.М. Комп'ютерне моделювання роботи клейових з'єднань сталі та бетону при дії характерних руйнуючих зусиль / Збірник наукових праць. / П.М. Фірсов, Мохамад Обейд Науковий вісник будівництва. Том 100 № 2 - Харківський національний університет будівництва та архітектури - 2020 р. 210-218 с.
- Li W., Mao Z., Xu G., Hong J., Chang H., Zhao H., Liu Z.: The microstructure evolution of cement paste modified by cationic asphalt emulsion. *Advances in Cement Research*, 33, 10, 2021, 436-446, DOI: 10.1680/jadcr.19.00164
- Трикоз Л. В., Камчатна С. М., Пустовойтова О. М. Вплив виду та кількості наповнювача на деформативні властивості акрилового композиційного матеріалу для ремонту бетонних конструкцій. *Вісник ОДАБА*. Зб. наук. праць. 2019. Вип. 74. С. 122-128. URL: <http://dx.doi.org/10.31650/2415-377X-2019-74-122-128>.
- Shekarchi W. A., Pudleiner D. K., Alotaibi N. K., Ghannoum W. M., Jirsa J. O. Carbon Fiber-Reinforced Polymer Spike Anchor Design Recommendations. *Structural Journal*. 2020. Vol. 117. Is. 6. P. 171-182. URL: <https://doi.org/10.14359/51728065>.
- Feng P., Zhang P., Meng X., Ye L. Mechanical Analysis of Stress Distribution in a Carbon Fiber-Reinforced Polymer Rod Bonding Anchor. *Polymers*. 2014. Vol. 6. Is. 4. P. 1129–1143. URL: <https://doi.org/10.3390/polym6041129>.
- Shi J., Wang X., Wu Z., Zhu Z. Effects of radial stress at anchor zone on tensile properties of basalt fiber-reinforced polymer tendons. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2015. Vol. 34. Is. 23. P. 1937–1949. URL: <http://dx.doi.org/10.1177/0731684415606857>.
- Singer G., Sinn G., Lichtenegger H.C., Veigel S., Zecchini M., Wan-Wendner R. 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*. 2019. Vol. 79. P. 106035. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.polymertesting.2019.106035>.
- Золотов С. М. Термореактивні 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.

References

- Achilias, D.S. PMMA/organomodified montmorillonite nanocomposites prepared by in situ bulk polymerization / D.S. Achilias, A.K. Nikolaidis, G.P. Karayannidis // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. – 2010. – V.102, Is. 2. – P.451-460
- Zanotto, A. Macro-micro relationship in nanostructured functional composites / A. Zanotto, A. Spinella, G. Nasillo, E.Caponetti, A. S. Luyt // *eXPRESS Polymer Letters*. – 2012. – V. 6, № 5. – P. 410–416.
- Annala, M. The effect of MWCNTs on molar mass in situ polymerization of styrene and methyl methacrylate / M. Annala, M. Lahelin, J. Seppälä // *European Polymer Journal*. – 2012. – V. 48. – P. 1516–1524.
- Zolotov S.M. Kompiuterne modeliuвання roboty klejovykh ziednan stalі ta betonu pry dii kharakternykh ruiniuichykh zusyly / Zbirnyk naukovykh prats. / P.M. Firsov, Mokhamad Obeid Naukovyi visnyk budivnytstva. Tom 100 № 2 - - Kharkivskiy natsionalnyi universytet budivnytstva ta arkhitektury - 2020 r. 210-218 s.
- Li W., Mao Z., Xu G., Hong J., Chang H., Zhao H., Liu Z.: The microstructure evolution of cement paste modified by cationic asphalt emulsion. *Advances in Cement Research*, 33, 10, 2021, 436-446, DOI: 10.1680/jadcr.19.00164
- Trykoz L. V., Kamchatna S. M., Pustovoitova O. M. Vplyv vydu ta kilkosti napovniuvacha na deformatyvni vlastyvoli akrylovoho kompozytsiinoho materialu dlia remontu betonnykh konstruksii. *Visnyk ODABA. Zb. nauk. prats*. 2019. Vyp. 74. S. 122-128. URL: <http://dx.doi.org/10.31650/2415-377X-2019-74-122-128>.
- Shekarchi W. A., Pudleiner D. K., Alotaibi N. K., Ghannoum W. M., Jirsa J. O. Carbon Fiber-Reinforced Polymer Spike Anchor Design Recommendations. *Structural Journal*. 2020. Vol. 117. Is. 6. P. 171-182. URL: <https://doi.org/10.14359/51728065>.
- Feng P., Zhang P., Meng X., Ye L. Mechanical Analysis of Stress Distribution in a Carbon Fiber-Reinforced Polymer Rod Bonding Anchor. *Polymers*. 2014. Vol. 6. Is. 4. P. 1129–1143. URL: <https://doi.org/10.3390/polym6041129>.
- Shi J., Wang X., Wu Z., Zhu Z. Effects of radial stress at anchor zone on tensile properties of basalt fiber-reinforced polymer tendons. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2015. Vol. 34. Is. 23. P. 1937–1949. URL: <http://dx.doi.org/10.1177/0731684415606857>.
- Singer G., Sinn G., Lichtenegger H.C., Veigel S., Zecchini M., Wan-Wendner R. 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*. 2019. Vol. 79. P. 106035. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.polymertesting.2019.106035>.
- Zolotov S. M. Termoreaktyvni smoly kholodnoho zatverdinnia dlia vidnovlennia ta rekonstruksii promyslovykh i tsyvilnykh budivel : monohrafiya / S. M. Zolotov, O. M. Pustovoitova, P. M. Firsov ; Kharkiv. nats. un-t misk. hosp-va im. O. M. Beketova. – Kharkiv : KhNUMH im. O. M. Beketova, 2019. – 184 s.

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: ТРИКОЗ Людмила Вікторівна
доктор технічних наук, професор, професор кафедри будівельних матеріалів, конструкцій та споруд
Український державний університет залізничного транспорту
E-mail – lvtrikoz@ukr.net
ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8531-7546>

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 – kamchatna.s.m@gmail.com
ID ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5711-4146>

Автор: ОРЕЛ Євген Федорович
кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри вишукувань та проектування шляхів сполучення, геодезії та землеустрою
Український державний університет залізничного транспорту
E-mail – orel_fisherman@ukr.net
ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6261-1558>

FEATURES FOR OPTIMISING THE PROPERTIES OF COMPOSITE MATERIALS BASED ON ACRYLIC MONOMERS

S. Zolotov¹, L. Trykoz², O. Pustovoitova¹, S. Kamchatna², Ye. Orel²

¹O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Ukraine

²Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine

Further development of research in the field of acrylic composites is aimed at creating modifiers with specified properties that will improve the characteristics of composites in specific application conditions; developing optimal ratios of composite components to ensure the required properties; developing universal mathematical models that will predict the properties of composites depending on the composition and curing conditions; searching for new applications for acrylic composites, such as industrial and civil engineering.

Among all organic compounds, acrylic compounds demonstrate the highest rate of strength gain over a wide temperature range. This is due to the low activation energy of the polymerisation process of acrylic monomers, which is triggered by special initiators. Due to this feature, acrylic composites can cure even at low temperatures and gain high strength in a short time.

However, despite the obvious advantages, there are a number of questions that require further research: how does the rate of strength gain and other properties of acrylic composites change at different temperatures? How does changing the ratio of composite components (pliable, filler, initiator) affect its properties? How does the curing process of acrylic composites work at the molecular level?

Determining the answers to these questions will make it possible to select the optimal ratio of components to obtain a material with the required properties, control the rate of strength gain of the composite by changing the temperature and composition, and use acrylic composites in a wider range of temperature conditions.

Thus, a deep understanding of the processes that occur during the curing of acrylic composites is a prerequisite for their effective use in various industries and construction.

The aim of the study is to comprehensively study the properties of composite materials based on methyl methacrylate (MMA) for the purpose of their effective use.

Research objectives: determination of the optimal temperature regime to achieve maximum composite strength in the shortest possible time (1.5-2 hours). Study the effect of various fillers and other components on the strength, durability and other properties of the material. Identification of effective ways to modify MMA to increase the strength of the composite. Development of methods for controlling the rate of strength gain to ensure optimal operation. Assessment of the durability of the adhesive bond under various operating conditions. Comparison of the properties of the developed composites with existing materials.

The results of the study will make it possible to develop new, more efficient composite materials for repair work that will be widely used in construction, industry and other sectors.

Keywords: acrylic composites, modification, methyl methacrylate, strength, temperature, curing, repair.