

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 624.19/.2-049.32:624.016

Л. В. ТРИКОЗ^{1*}, О. С. ЗІНЧЕНКО²

^{1*} Кафедра будівельних матеріалів, конструкцій та споруд,
Український державний університет залізничного транспорту,
пл. Феєрбаха, 7, Харків, Україна, 61050, тел. +38 (057) 730 10 68,
ел. пошта lvtrikoz@ukr.net, ORCID 0000-0002-8531-7546

² Кафедра будівельних матеріалів, конструкцій та споруд,
Український державний університет залізничного транспорту,
пл. Феєрбаха, 7, Харків, Україна, 61050, тел. +38 (057) 730 10 68,
ел. пошта rotatosrumba@gmail.com, ORCID 0009-0000-3858-8258

РОЗРОБКА ПОЛІМЕРНИХ НАПОВНЕНИХ КОМПОЗИЦІЙ ДЛЯ РЕМОНТУ ШТУЧНИХ СПОРУД ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

Мета. Дослідження залежності міцності при вигині та стиску полімерних матеріалів від вмісту наповнювача, визначення оптимальної кількості наповнювача, розробка та застосування складу для ремонту штучних бетонних споруд. **Методика.** Міцність наповненого полімерного композиційного матеріалу визначали шляхом випробування зразків на стиск і вигин зразків-балочок розмірами 40×40×160 мм з побудовою графічних залежностей при різній кількості наповнювача у 50, 100, 150 та 200 масових часток від загального об'єму композиції. Як наповнювач використано фракцію з розмірами частинок менше 0,14 мм, отриману в результаті подрібнення відходів залізничних залізобетонних шпал. **Результати.** Встановлено, що залежності міцності при вигині і стиску мають нелінійний характер при збільшенні кількості наповнювача у композиції. Найбільшу міцність як при вигині та і при стиску демонструють зразки, які містять 100 мас. част. рециркульованого дрібного наповнювача – 28,5 МПа і 114,0 МПа, відповідно, що порівняно з міцністю чистого полімеру (30,0 МПа і 100,5 МПа). Збільшення частки відходів подрібнення бетону в полімерній композиції до 200 мас. част. призвело до зниження міцності полімерного розчину на стиск у 7 разів, а міцності при вигині вдвічі. **Наукова новизна.** Отримані залежності розкривають механізм утворення структури в наповнених композиціях, де як наповнювач використовуються рециклінгові відходи подрібнених бетонних конструкцій. Чим менший розмір частинок наповнювача, тим більша їхня питома поверхня і тим значніша їхня роль у формуванні поверхні міжфазної взаємодії. Зі збільшенням кількості частинок наповнювача зростає пористість матеріалу, у тому числі за рахунок пористості самого вторинного заповнювача, що призводить до зниження його міцності та здатності до пружної оборотної деформації. Отримані залежності дають підґрунтя для створення розрахункових моделей визначення складів полімер-композиційних наповнених матеріалів з урахуванням granulометричного складу наповнювачів. **Практична значимість.** Використання як наповнювачів подрібнених відходів зруйнованих бетонних конструкцій забезпечить повторне використання та утилізацію таких відходів. Уведення до складу полімерних композиційних матеріалів дрібного наповнювача знизить вартість таких матеріалів для проведення ремонтних робіт та відновлення об'єктів інфраструктури, підвищить довговічність відремонтованих конструкцій, зменшить міжремонтні терміни.

Ключові слова: наповнений полімерний композиційний матеріал; міцність; поліметилметакрилат; наповнювач; рециклінг

Вступ

Композиційні матеріали, створені на основі наповнених полімерів, є одним із найпоширеніших і доступних способів захисту та ремонту різних конструкцій і споруд, таких як труби, тунелі, естакади, мости. Ці споруди піддаються впливу руйнівних зовнішніх факторів: циклічного зволоження і висихання, заморожування і

відтавання, а також агресивного середовища, включаючи ґрунтові води, кислотні дощі, паливні матеріали. Найкраще для ремонту і проведення гідроізоляційних робіт підходять полімерні покриття, які підвищують надійність і міцність гідроізоляційного шару та мають високу стійкість до корозії. Основною перевагою таких покриттів є їхня еластичність – здатність витримувати змінні навантаження без крихкого

руйнування, хоча міцність полімерних покриттів може бути порівняно невеликою. Для підвищення міцності і зниження вартості покриттів у полімерну матрицю додають наповнювачі. Вони не лише знижують витрати дорогих зв'язуючих компонентів, але й значно впливають на властивості композитів. Залежно від типу, дисперсності та кількості наповнювача можуть змінюватися модуль пружності, міцність, реологічні та декоративні властивості композитів, їхня тепло- та електропровідність, стійкість до абразивного зносу, а також опір кліматичним і агресивним факторам. При цьому покращення одних характеристик матеріалу може супроводжуватися погіршенням інших. Ефект від введення наповнювача залежить також від типу полімерного зв'язуючого, що дозволяє підбирати склади композицій для забезпечення необхідного балансу властивостей відповідно до умов експлуатації.

У будівництві широко використовуються мінеральні дисперсні наповнювачі, які відзначаються низькою вартістю та великими обсягами виробництва, такі як крейда, діатоміт, базальт, каолін, зола-виношення, мікрокремнезем та мелений пісок. Зміна властивостей композиційного матеріалу при додаванні наповнювача відбувається нелінійно і часто має екстремальний характер, що обумовлено двоякістю процесів структуроутворення. З одного боку, присутність наповнювача змінює структуру полімерної матриці між дисперсними частинками, що сприяє переходу до більш міцного плівкового стану. З іншого боку, формується просторовий каркас з частинок наповнювача і плівкової фази матриці. Проте, додавання наповнювача може призвести до зниження міцності композиційного матеріалу через можливі дефекти, зокрема недостатнє змочування поверхні частинок наповнювача полімером, наявність внутрішніх напружень, обумовлених різницею в модулях пружності та коефіцієнтах лінійного термічного розширення між матрицею та наповнювачем, а також утворення пор через дефіцит зв'язуючого. Зі збільшенням сумарної питомої поверхні наповнювача обидва процеси активізуються, і існує оптимальне значення цієї величини, при якому міцність композиту досягає максимуму. Таким чином, характеристики композиційного матеріалу визначаються переважанням одного з протилежних процесів, інтен-

сивність яких залежить від ступеня наповнення, фракційного складу та морфології поверхні наповнювача. На сьогодні відсутні дослідження, що стосуються властивостей полімерних композиційних матеріалів, де в якості наповнювача використовується дрібна фракція відходів бетону. Утилізація таких відходів є на теперішній час актуальною проблемою.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Поруч із кондиційними наповнювачами для будівельних матеріалів, які є подрібненими гірськими породами, значна увага приділяється використанню відходів промисловості, наприклад хвостів збагачення залізних руд гірничозбагачувальних комбінатів (Нетеса, М. І., Краснюк, Нетеса, А. М., & Нікіфорова, 2021). Ці дослідження показали, що ефективність використання цементу можна підвищити, застосовуючи місцеві вторинні продукти промисловості в бетоні. Зокрема, додавання відходів збагачення залізних руд ГЗК як дрібнозернистої добавки в бетон дозволяє досягти необхідної низької міцності бетону при значно меншій витраті цементу, за умови раціонального зернового складу компонентів бетонної суміші. Досягнення ефективних результатів за рахунок раціонально підбраного гранулометричного складу наповнювачів було виконано в роботі Трикоз, Зінченко, & Никитинський (2024), в якій було визначено математичну залежність між середніми розмірами частинок піску та наповнювача для досягнення максимальної щільності та міцності бетону при різній кількості шарів структурних елементів на мезоструктурному рівні. Однак подібних досліджень, що стосуються встановленню таких саме закономірностей для полімерних наповнених композиційних матеріалів, наразі небагато. Одну з таких робіт авторів присвячено дослідженню міцності і деформативних характеристик полімеркомпозиційних матеріалів на основі поліметиметакрилату з наповненням кварцовим піском (Трыкоз, Kamchatna, Zinchenko, Pustovoitova, & Borodin, 2024). Було встановлено, що із збільшенням кількості піску фракцій 0,315 мм і 0,63 мм міцність композиційного матеріалу зменшується. Найбільшу міцність виявлено для зразків, наповнених піском фракції 0,14 мм у кількості 150 масових частин по відношенню до кількості полімеру. Оптимальне співвідношення напо-

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

внювача і полімеру досягається тоді, коли товщина акрилової полімерної плівки достатня для покриття всієї поверхні частинок, але не достатня для збільшення деформацій повзучості.

При проведенні ремонтних робіт загально-відомо, що зчеплення свіжого бетону зі старим досить слабе. Це основна причина появи полімерів у ремонтних матеріалах як відповідь на вимогу забезпечення високого рівня адгезії. Полімери окремо або в композиції з наповнювачами використовуються для того, щоб створити захисний шар на сталевій арматурі, створити зчепний шар для покращення адгезії ремонтного матеріалу до основи (Онищенко, Гаркуша, М. В., Федоренко, & Гаркуша, І. Ю., 2024), заповнити тріщини або раковини в бетонних конструкціях, створити захисний шар на бетоні, щоб обмежити або перекрити доступ агресивного середовища до споруди (Trykoz, Kamchatnaya, Pustovoitova, Atynian, & Saiapin, 2019), з'єднати частини конструкції між собою (Abokifa, & Moustafa, 2021). Обмеженням може бути відносно висока усадка при твердінні, а також деякі відмінності між властивостями відремонтаного бетону та ремонтного матеріалу – зокрема високе теплове розширення, повзучість, іноді обмежений термічний опір і стійкість до старіння. Тому ключовим питанням є вибір полімерних матеріалів для ремонту та захисту за принципом сумісності. Завдяки синергетичній дії полімерів у бетоні їх вплив на властивості продукту значно вищий, ніж можна було б вирахувати з його масової частки. Розпізнавання та використання синергетичних ефектів – результатів взаємодії полімерів з іншими компонентами бетону – є основним напрямком дослідження та раціоналізації використання полімерів у бетоні. При вмісті полімеру 5 % від маси цементу полімер здатний утворювати безперервну сітку і виступати в якості спільного сполучного разом з портландцементом (Czapieski, 2018). Слід зазначити, що умови затвердіння композиційних матеріалів мають значний вплив на них. Полімерні та цементні в'язучі вимагають різних і навіть протилежних умов твердіння для отримання належного рівня експлуатаційних властивостей: вологі умови для гідратації портландцементу та сухі умови для створення полімерної плівки та реакцій твердіння синтетичних смол. Тому багато робіт присвячено дослідженню взаємодій ланцюгів

полімеру з поверхнею наповнювачів.

Метою дослідження Sakr, & Bassuoni (2021) було вивчення ефективності полімерних нанокомпозитів для поверхневої обробки бетону, що піддається посиленому впливу агресивного середовища та низьких температур. Силан і метилметакрилат використовувалися як базові смоли, в яких частинки наноглини і нанокремнезему змішувалися в різних концентраціях (0,5 і 10 %). Результати показали, що силанові нанокомпозити були ефективні для поліпшення бар'єрних властивостей бетону, тим самим зменшуючи дію солі та утворення соляно-морозних відкладень для міцного бетону. Метилметакрилатові нанокомпозити, особливо при дозуванні 5 %, виявилися ефективними в опорі бетону проникненню соляного розчину, проте вони не витримали впливу соляно-морозної дії. У роботі Su, He, T., He, Z., Yu, & Wang (2024) показано, що взаємодія між полімерами та цементом призводить до утворення взаємопроникної сітчастої структури, яка підвищує щільність матеріалів на цементній основі та підвищує їх гідроізоляційні властивості, довговічність та механічну міцність. При цьому карбоксильна група акрилатного полімеру реагує з продуктом гідратації цементу, підвищуючи когезію матеріалів на основі цементу та зміцнюючи структуру матеріалів зсередини, таким чином покращуючи їх ефективність. Однак, у процесі гідратації цементу полімери перешкоджають реакції гідратації, що призводить до зниження міцності, у той же час полімери значно покращують міцність на вигин і довговічність. Naseem, Shamsaei, Sagoe-Crentsil, & Duan (2023) досліджували вплив полімерного зв'язуючого на кінетику гідратації цементу. Методами інфрачервоної спектроскопії та рентгенофазового аналізу підтверджено утворення металоорганічного продукту $\text{Ca}(\text{CH}_3\text{COO})_2$, гідросилікатного гелю C-S-H , нижчу концентрацію $\text{Ca}(\text{OH})_2$ і менший ступінь орієнтації портландиту $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Більш цілісна мікроструктура значно покращила загальні інженерні характеристики композиту. Вимірювання міцності на розрив виявило 19 % і 16 % підвищення через 7 і 28 днів. Дослідження впливу полібутилакрилату на якісний склад продуктів новоутворень цементу, виконане Li, Mao, & Deng (2023) демонструє, що додавання полімеру пригнічує ранню гідратацію C_3S і C_3A і також має силь-

ніший інгібуючий ефект на гідратацію C_3A . Крім того, він перешкоджає утворенню продуктів гідратації, таких як портландит і карбонат кальцію. Також автори спостерігали збільшення пористості зразків до 36 % із збільшенням кількості полібутилакрилату від 1 % до 2 % і відповідно зменшення майже вдвічі міцності при стиску і вигині. Це пояснюється тим, що коли полімери додаються до цементного розчину, їх молекулярна маса є більшою, а сили міжмолекулярної взаємодії сильнішими, що змушує полімери взаємодіяти з частинками цементу та утворювати певні агрегати. Ці агрегати можуть бути погано дисперговані в розчині, що призводить до слабшого зв'язку між частинками цементу та утворення більшої кількості пор і дефектів, а отже до збільшення пористості цементного розчину. Ці результати свідчать про те, що авторам не вдалося підібрати раціональний склад полімерно-цементної суміші, хоча їх дослідження впливу на процеси гідратації заслуговують на увагу.

Протилежні результати були отримані Shi, Вu, & Ma (2024), які отримали збільшення міцності зв'язку на розтяг та вигин ремонтного розчину із стирол-акриловою емульсією при її концентрації 40 % в 1,38 та 1,34 рази. Інфрачервона спектроскопія та рентгенофазовий аналіз показують, що карбоксильні групи в стирол-акриловій емульсії та іони Ca^{2+} , що утворюються при гідратації цементу, утворюють комплекси Ca^{2+} -карбоксил. Електронно-мікроскопічні знімки показують, що полімер може змінювати розподіл та розмір кристалів на межі зв'язку та значно зменшувати товщину межі зв'язку, однак не може змінювати тип продуктів гідратації на границі частинок. Аналіз взаємодії карбонатних і алюмосилікатних наповнювачів з поліакриловою кислотою і стирол-акриловим полімером, проведений Караваєвим та ін. (2019) з використанням ІЧ-спектроскопії, показав таке: процеси хімічної взаємодії можливі за участю зв'язків $C=O$, $C=C$, $Si-H$ та OH -груп, що дозволяє прогнозувати утворення поверхневого шару з молекул метилсиліконату на частинках наповнювача, який забезпечує гідрофобізацію останніх. Аналіз вищенаведених літературних джерел показав, що існують широкі перспективи створення композиційних наповнених полімерних матеріалів, в яких за рахунок раціонально підбраного складу суміші і забезпечення

хімічної взаємодії на поверхні наповнювача можливо створення міцних і довговічних ремонтних матеріалів з використанням відходів руйнування бетону. Саме на вибір раціонального дозування компонентів ремонтної суміші буде спрямоване дане дослідження.

Мета роботи

Метою даної роботи є дослідження залежності міцності при вигині та стиску полімерних матеріалів від вмісту наповнювача. А саме, дослідити міцність на стиск та вигин полімерів з різною кількістю наповнювача, визначити оптимальну кількість та тип наповнювача, а також розробити склад для ремонту штучних бетонних споруд.

Матеріали та методи дослідження

До складу наповненого полімерного композиційного матеріалу входить мономер метилметакрилат як зв'язуюче та дрібна фракція бетонних відходів з розмірами частинок менше 0,14 мм після подрібнення залізничних шпал (рис. 1).



Рис. 1. Фото рециклінгового наповнювача

Зразки композиційних матеріалів були виготовлені шляхом змішування рідкого метилметакрилату з порошковим каталізатором і наповнювачем. Кількість дрібної фракції наповнювача коливалася від 50 до 200 масових частин в загальному об'ємі суміші, яка складалася із 100 мас.част. рідкого компонента і 100 мас.част. порошкового компонента. Такий склад суміші і діапазон вмісту наповнювача було обрано для порівняння результатів з попереднім дослідженням (Trykoz, Kamchatna, Zinchenko, Pustovoitova, & Borodin, 2024), де як наповнювач використовувався пісок мелений кварцовий. Міцність наповненого полімерного композиційного матеріалу визначали шляхом випробування зразків на стиск і вигин зразків-

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

балочок розмірами 40×40×160 мм (рис. 2).



Рис. 2. Фото зразків наповнених композиційних матеріалів

Результати досліджень

Було виявлено, що на міцність композиційного матеріалу частка наповнювача впливає таким чином (рис. 3).

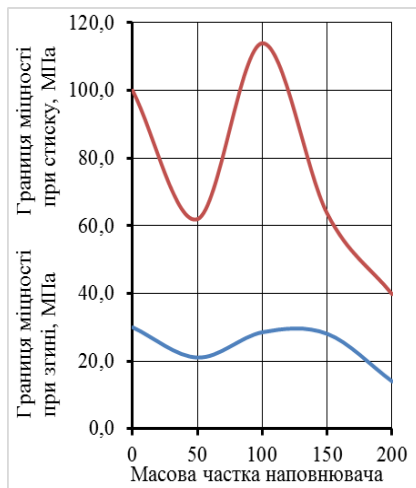


Рис. 3. Залежність міцності акрилового наповненого матеріалу від кількості наповнювача

При заповненні полімеру дрібними відходами бетону розміром менше 0,14 мм в кількості 50 та 200 мас.ч. границя міцності при стиску становить 62,0 МПа і 39,8 МПа, а границя міцності при згині – 21,0 МПа і 14,0 МПа, відповідно. Найбільшу міцність як при вигині та і при стиску демонструють зразки, які містять 100 мас.част. дрібного наповнювача – 28,5 МПа і 114,0 МПа, відповідно, що порівняно з міцністю чистого полімеру (30,0 МПа і 100,5 МПа). Попередні дослідження авторів (Trykoz, Kamchatna, Zinchenko, Pustovoitova, & Borodin, 2024) наповнених композицій піском фракцією з розмірами частинок більше 0,14 мм кількістю 150 мас.част. показали міцність при стиску 90,7 МПа та при згині 44,97 МПа. Отже, підтверджено попереднє припущення авторів, що гранулометричний склад наповнювача впливає на

міцність полімерного композиту таким саме чином, як і на міцність матеріалів на неорганічних в'язучих – розмір частинок найбільш представницької фракції впливає на величину прошарку між ними, при якій досягається найбільш щільна і міцна структура (Трикоз, Зінченко, & Никитинський, 2024).

Наукова новизна та практична значимість

Результати досліджень демонструють важливість структурування композиції наповнювачем. Неорганічний наповнювач може ініціювати полімеризацію завдяки активним центрам на його поверхні, які виступають як центри полімеризації та сприяють формуванню безперервного тривимірного полімерного каркасу. Крім цього відбувається формування хімічних зв'язків між функціональними групами полімеру і наповнювача, як описано в дослідженнях (Shi, Bu, & Ma, 2024; Naseem, Shamsaei, Sagoe-Crentsil, & Duan, 2023; Li, Mao, & Deng, 2023; Караваєв та ін. (2019). Оптимальне співвідношення наповнювача і полімеру повинно забезпечувати достатню товщину акрилової плівки для повного змочування поверхні частинок, при цьому не збільшуючи деформацію повзучості. Суттєве зниження міцності відбувається через надмірну кількість наповнювача, що призводить до недостатнього об'єму полімеру. Це зменшує змочуваність і порушує структурну цілісність. Збільшення частки відходів подрібнення бетону в полімерній композиції до 200 мас.част. призвело до зниження міцності полімерного розчину на стиск у 7 разів. Невелика кількість наповнювача збільшує товщину шару полімеру в прошарку між частинками, в якому сили когезії виявляються менше розтягувального напруження, що і призводить до зменшення міцності. Таким чином, залежність міцності композиційного матеріалу від частки наповнювача в ній має нелінійний характер, що добре узгоджується із загальними принципами структуроутворення в композиційних матеріалах.

Розроблена полімер-наповнена суміш з оптимальною кількістю дрібної фракції відходів бетону була застосована для ремонту пошкоджених опор мосту. Технологія ремонту була розроблена з урахуванням вимог МР В.2.3-37641918-888 (2017), Р В.2.3-37641918-934 (2023) і містила такі основні операції: очищення і підготовка поверхні, нанесення ґрунтового

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

розчину, приготування і нанесення ремонтного розчину, штикування і притискання опалубкою, зняття опалубки, контроль якості неруйнівними методами. Фото ділянок до і після проведення ремонтних робіт наведено на рис. 4. Контроль якості виконаних робіт проводили з викорис-

танням електронного склерометра Онікс-2.5 (рис. 5). Значення показників для усіх відремонтованих тріщин знаходилися в межах 10,9...12,2 МПа, що можна вважати еквівалентним класу міцності важкого бетону С8/10.



Рис. 4. Фото частин опори мосту до (а) і після (б) ремонту



Рис. 5. Контроль якості виконаних робіт

Висновки

Дослідження показало, що кількість наповнювача має значний вплив на міцнісні властивості композитів на основі поліметилметакрилату. Найбільшу міцність (114 МПа при стиску та 28,5 МПа при вигині) показав зразок з оптимальним наповненням 100 мас.част. дрібної фракції відходів подрібнення бетону. Відхилення від цієї кількості призводить до зниження міцності композицій, що зумовлено порушенням оптимального співвідношення між площею поверхні частинок наповнювача і кількістю полімеру, достатнього для адсорбції. Крім того, при низькому вмісті наповнювача пошкодження відбувається переважно в еластичній полімерній сітці, тоді як при високому вмісті наповнювача деформація і пошкодження спочатку локалізуються в еластичній полімерній сітці, а потім локалізуються поблизу границі розділу фаз наповнювач-полімер. Зі збільшенням вмісту наповнювача з'являється межа текучості, а загальна деформація зростає.

Практичне значення цього дослідження полягає в можливості використання наповнених полімерних композитів у відновлювальних ремонтних роботах, в яких традиційні дорогі цементні або мелені природні заповнювачі замінюються дешевшими відходами зруйнованих бетонних конструкцій, зменшуючи площу для їх накопичення та викиди вуглецю, пов'язані з виробництвом цементу та піску. Подальші дослідження будуть спрямовані на встановлення математичних залежностей міцності наповнених полімер-композиційних матеріалів від гранулометричного складу наповнювачів для створення основ проектування складів таких матеріалів для використання в ремонтно-відновлювальних роботах. Крім того, планується проведення довготривалого моніторингу відремонтованих ділянок для оцінки їх експлуатаційної стійкості.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Abokifa, M., & Moustafa, M. A., (2021). Experimental behavior of poly methyl methacrylate polymer concrete for bridge deck bulb tee girders longitudinal field joints. *Construction and Building Materials*, 270, 121840. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121840>
- Czarnecki, L. (2018). Polymer-Concrete Composites for the repair of concrete structures. *MATEC Web of*

- Conferences*, 199, 01006. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201819901006>
- Li, S., Mao, Z., & Deng, M. (2023). Preparation of Butyl Acrylate Copolymer Emulsion and Its Regulation Effect on Cement Hydration. *Materials*, 16, 2887. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma16072887>
- Naseem, Z., Shamsaei, E., Sagoe-Crentsil, K., & Duan, W. (2023). Microstructural and polymer film interaction mechanisms: Insights of GO-reinforced polymer-modified cement composites. *Journal of Building Engineering*, 80, 107962. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.107962>
- Sakr, M. R., & Bassuoni, M. T. (2021). Silane and methyl-methacrylate based nanocomposites as coatings for concrete exposed to salt solutions and cyclic environments. *Cement and Concrete Composites*, 115, 103841. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103841>
- Shi, C., Bu, K., & Ma, C. (2024). Effects of styrene-acrylic emulsion on bond performance and interface microstructure of repair mortar of ternary cementitious system. *Journal of Applied Polymer Science*, 141(16), 55263. DOI: <https://doi.org/10.1002/app.55263>
- Su, F., He, T., He, Z., Yu, Q., & Wang, H. (2024). Mechanism of Acrylate Emulsion-Modified Cement-Based Materials. *Molecules*, 29, 1260. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules29061260>
- Trykoz, L., Kamchatnaya, S., Pustovoitova, O., Atynian, A., & Saiapin, O. (2019). Effective Waterproofing of Railway Culvert Pipes. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 14(4), 473-483. DOI: <https://doi.org/10.7250/bjrbe.2019-14.453>
- Trykoz, L. V., Kamchatna, S. M., Zinchenko, O. S., Pustovoitova, O. M., & Borodin, D. Y. (2024). Study of strength and strains of composite materials based on filled polymers. *Сучасне будівництво та архітектура*, 8, 72-79. DOI: <http://dx.doi.org/10.31650/2786-6696-2024-8-72-79>
- Караваєв, Т. А., Осика, В. А., Комаха, В. О., et al. (2019). Процеси хімічної взаємодії в системі мінеральний наповнювач-модифікатор-плівкоутворювач. *Питання хімії та хімічної технології*, 6, 83-91. DOI: <http://dx.doi.org/10.32434/0321-4095-2019-127-6-83-91>
- МР В.2.3-37641918-888:2017 (2017). *Методичні рекомендації з відновлення залізобетонних конструкцій мостів і труб методом ін'єкційного просочування полімерними розчинами*. Київ: ДП «ДерждорНД».
- Нетеса, М. І., Краснюк, А. В., Нетеса, А. М., & Нікіфорова, Н. А. (2021). Оптимізація складів бетонів із вторинними продуктами промисловості. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 19, 51-61.
- Онищенко, А. М., Гаркуша, М. В., Федоренко, О. В.,

- & Гаркуша, І. Ю. (2024). Застосування гідроізоляційних систем на основі метилметакрилатної смоли на транспортних спорудах. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 25, 74-86.
- Р В.2.3-37641918-934:2023 (2023). *Рекомендації з улаштування гідроізоляційних систем на основі метилметакрилатної смоли на транспортних спорудах*. Київ: ДП «УкрНДНЦ».
- Трикоз, Л. В., Зінченко, О. С., & Никитинський, А. В. (2024). Визначення міцнісних та структурних характеристик цементно-піщаних розчинів з використанням рециклінгових наповнювачів. *Науковий вісник будівництва*, 111, 72-79.

L. V. TRYKOZ^{1*}, O. S. ZINCHENKO²

^{1*}Department of Building Materials, Constructions and Structures, Ukrainian State University of Railway Transport, 7, Feuerbach Sq., Kharkiv, Ukraine, 61050, tel. +38 (057) 730 10 68, e-mail lvtrikoz@ukr.net, ORCID 0000-0002-8531-7546

²Department of Building Materials, Constructions and Structures, Ukrainian State University of Railway Transport, 7, Feuerbach Sq., Kharkiv, Ukraine, 61050, tel. +38 (057) 730 10 68, e-mail potatosrumba@gmail.com, ORCID 0009-0000-3858-8258

STUDY OF STRENGTH AND STRAINS OF COMPOSITE MATERIALS BASED ON FILLED POLYMERS

Purpose. The article aims the study of the impact the filler content on the bending and compressive strength of polymer materials, determination of the optimal amount of filler, design and application of the composition for the repair of concrete infrastructure objects. **Methodology.** The strength of the filled polymer composite material was determined by testing the beam samples with dimensions of 40 mm × 40 mm × 160 mm for compression and bending. The graphic dependencies between strength and different amounts of filler in 50, 100, 150 and 200 mass parts from the total volume of the composition were found. As a filler, the fraction with particle size less than 0.14 mm, obtained as a result of grinding waste of railway reinforced concrete sleepers, was used. **Findings.** It was established that the dependences of strength during bending and compression have a non-linear character when the amount of filler in the composition increases. The biggest strength both in bending and in compression is demonstrated by samples containing 100 parts by mass of recycled fine filler – 28.5 MPa and 114.0 MPa, respectively, which is compared to the strength of pure polymer (30.0 MPa and 100.5 MPa). Increasing the share of concrete grinding waste in the polymer composition to 200 wt. parts led to a 7-fold decrease in the compressive strength of the polymer solution, and a 2-fold decrease in the bending strength. **Originality.** The obtained dependencies reveal the mechanism of structure formation in filled compositions, where recycled waste from crushed concrete structures is used as a filler. The smaller the size of the filler particles, the greater their specific surface area and the greater their role in the formation of the interfacial interaction surface. When the number of filler particles increases, the porosity of the material increases too, including due to the porosity of the recycle aggregate itself. It leads to a decrease in its strength and ability to elastic reversible deformation. The resulting dependencies provide a basis for creating calculation models to determine the compositions of polymer composite filled materials considering the aggregate grading of filler. **Practical value.** The use of crushed waste from destroyed concrete structures as fillers will ensure the reuse and disposal of such waste. The introduction of fine filler into the composition of polymer composite materials will reduce the cost of such materials for repair work and restoration of infrastructure facilities, increase the durability of repaired structures, and reduce the time between repairs.

Keywords: filled polymer composite material; strength; polymethyl methacrylate; filler; recycling

REFERENCES

- Abokifa, M., & Moustafa, M. A., (2021). Experimental behavior of poly methyl methacrylate polymer concrete for bridge deck bulb tee girders longitudinal field joints. *Construction and Building Materials*, 270, 121840. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121840>(in English)
- Czarnecki, L. (2018). Polymer-Concrete Composites for the repair of concrete structures. *MATEC Web of Conferences*, 199, 01006. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201819901006>(in English)
- Li, S., Mao, Z., & Deng, M. (2023). Preparation of Butyl Acrylate Copolymer Emulsion and Its Regulation Effect on Cement Hydration. *Materials*, 16, 2887. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma16072887>(in English)
- Naseem, Z., Shamsaei, E., Sagoe-Crentsil, K., & Duan, W. (2023). Microstructural and polymer film interaction

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

- mechanisms: Insights of GO-reinforced polymer-modified cement composites. *Journal of Building Engineering*, 80, 107962. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.107962>(in English)
- Sakr, M. R., & Bassuoni, M. T. (2021). Silane and methyl-methacrylate based nanocomposites as coatings for concrete exposed to salt solutions and cyclic environments. *Cement and Concrete Composites*, 115, 103841. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103841>(in English)
- Shi, C., Bu, K., & Ma, C. (2024). Effects of styrene–acrylic emulsion on bond performance and interface microstructure of repair mortar of ternary cementitious system. *Journal of Applied Polymer Science*, 141(16), 55263. DOI: <https://doi.org/10.1002/app.55263>(in English)
- Su, F., He, T., He, Z., Yu, Q., & Wang, H. (2024). Mechanism of Acrylate Emulsion-Modified Cement-Based Materials. *Molecules*, 29, 1260. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules29061260>(in English)
- Trykoz, L., Kamchatnaya, S., Pustovoitova, O., Atynian, A., & Saiapin, O. (2019). Effective Waterproofing of Railway Culvert Pipes. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 14(4), 473-483. DOI: <https://doi.org/10.7250/bjrbe.2019-14.453>(in English)
- Trykoz, L. V., Kamchatna, S. M., Zinchenko, O. S., Pustovoitova, O. M., & Borodin, D. Y. (2024). Study of strength and strains of composite materials based on filled polymers. *Сучасне будівництво та архітектура*, 8, 72-79. DOI: <http://dx.doi.org/10.31650/2786-6696-2024-8-72-79>(in English)
- Karavaiev, T. A., Osyka, V. A., Komakha, V. O., et al. (2019). Protsepy khimichnoi vzaiemodii v systemi mineralnyi napovniuvach-modyfikator-plivkoutvoriuvach. *Pytannia khimii ta khimichnoi tekhnolohii*, 6, 83-91. DOI: <http://dx.doi.org/10.32434/0321-4095-2019-127-6-83-91>(in English)
- MR V.2.3-37641918-888:2017 (2017). *Metodychni rekomendatsii z vidnovlennia zalizobetonnykh konstruksii mostiv i trub metodom iniektsiinoho prosochuvannia polimernymy rozchynamy*. Kyiv: DP «DerzhdorNDI». (in Ukrainian)
- Netesa, M. I., Krasniuk, A. V., Netesa, A. M., & Nikiforova, N. A. (2021). Optyimizatsiia skladiv betoniv iz vtorynnymy produktamy promyslovosti. *Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka*, 19, 51-61. (in Ukrainian)
- Onyshchenko, A. M., Harkusha, M. V., Fedorenko, O. V., & Harkusha, I. Yu. (2024). Zastosuvannia hidroizoliatsiinykh system na osnovi metylmetakrylatnoi smoly na transportnykh sporudakh. *Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka*, 25, 74-86. (in Ukrainian)
- R V.2.3-37641918-934:2023 (2023). *Rekomendatsii z ulashtuvannia hidroizoliatsiinykh system na osnovi metylmetakrylatnoi smoly na transportnykh sporudakh*. Kyiv: DP «UkrNDNTs». (in Ukrainian)
- Trykoz, L. V., Zinchenko, O. S., & Nyktynskyi, A. V. (2024). Vyznachennia mitsnisnykh ta strukturnykh kharakterystyk tsementno-pishchanykh rozchyniv z vykorystanniam retsyklinhovykh napovniuvachiv. *Naukovyi visnyk budivnytstva*, 111, 72-79. (in Ukrainian)

Надійшла до редколегії 14.10.2024.

Прийнята до друку 05.11.2024.