

Особливості організації мікроструктури декоративних композитів

Features of microstructure organization decorative composites

Довгань О.Д., к.т.н., доцент, Вировой В.М., д.т.н., професор, Ляшенко Т.В., д.т.н., професор, Довгань П.М., к.т.н. (Одеська державна академія будівництва та архітектури, Одеса)

Dovgan O.D., PhD, Associate Professor, Vyrovoy V.M., D.Sc., Professor, Lyashenko T.V., D.Sc., Professor, Dovgan P.M., PhD (Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Odesa)

У статті пропонується для поліпшення і збереження функціональних властивостей декоративних виробів застосовувати багаторівневе армування структури цементних композитів. Зміцнення структури на всіх рівнях його неоднорідностей дозволить забезпечити необхідну стійкість виробам до впливу різних навантажень. Наведені результати дослідження структурних параметрів цементного каменю. Дослідження 25-ти різних за складом композицій проводилися з використанням методу експериментально-статистичного моделювання. Аналіз результатів натурного й обчислювального експериментів підтвердив, що дискретні волокна здатні приймати активну участь у фізико-механічних процесах структуроутворення цементних композитів.

The article proposes to use multi-level reinforcement of the structure of cement composites to improve and preserve the functional properties of decorative products. Strengthening the structure of the composite at all levels of its heterogeneities will provide the necessary resistance to various loads. The influence of discrete fibers of different lengths on the organization of the microstructure of dispersed systems was discussed earlier. The results of structural parameters of cement compositions presented in this paper are a continuation of previous studies.

To accurately describe the microstructure of the decorative composite and consider the relationships between its structural parameters, the method of experimental-statistical modeling was applied. Studies of 25 different compositions were carried out according to a 4-factor symmetrical plan. Processing of experimental data showed that the value of the water-cement ratio has a rather noticeable effect on the structural parameters of cement systems. A significant correlation between the indicators of cement systems has been identified. An analysis of the nature of damage to the surface of samples by cracks, internal surfaces of the section was carried out. It is confirmed that discrete fibers are able to actively participate in the processes of structural formation of building composites.

Analysis of the data has shown that by introducing fiber, the uniformity of scattering of microdefects, internal stresses, etc. can be improved. The influence of composition factors on the structural parameters of the stone was evaluated using mathematical models. Visualization of local fields of properties in the coordinates of recipe factors made it possible to analyze the individual and synergistic effects of the influence of two groups of components on the formation of structural parameters of cement systems. It is shown that with rational ratios of composition factors, the structure of the capillary-porous space of the composite improves. The change in the number of microdefects in the structure of the material should affect the mechanical properties of the cement stone. It is planned to analyze the results of the study of the structural strength of the cement system.

Ключові слова: декоративний композит, структура, фібра, полікарбоксилат, дисперсна система, кластер, цеоліт, експериментально-статистична модель.

Keywords: decorative composite, structure, fiber, polycarboxylate, dispersed system, cluster, zeolite, experimental-statistical model.

Вступ. Упродовж різних періодів для архітектурної виразності будівель і споруд, облаштування зон відпочинку застосовувались різноманітні види декоративних матеріалів і виробів (ДМВ). Серед широкого спектру ДМВ гідне місце посідає декоративний бетон (ДБ). Використання високопластичних властивостей ДБ на етапі його виготовлення дає можливість отримувати архітектурні деталі складної конфігурації та заданого естетичного виду за колірною палітрою, фактурою лицьової поверхні тощо. Проте на початковому етапі структуроутворення композиту (до 24 год.), під час процесу оздоблення деталей і під синергетичною дією всіх наявних погодних факторів на поверхні виробів можуть з'являтися різні дефекти, які значно погіршують зовнішній вигляд, знижують функціональну надійність цементного композиту і термін служби архітектурних елементів. Для поліпшення естетичних та експлуатаційних властивостей, на наш погляд, перспективним представляється застосування багаторівневого армування структури декоративного бетону. Зміцнення структури на всіх рівнях його неоднорідностей дозволить забезпечити необхідну стійкість виробам до впливу різних навантажень.

Для створення високоефективного композиту виробниками фібри пропонується великий асортимент дискретних волокон, різних за хімічним складом, геометрією й властивостями. Використання фібри в складі матеріалу виробів, як показав огляд вітчизняних і закордонних джерел, дозволяє певною мірою покращувати будову капілярно-пористої структури і підвищувати в'язкість руйнування бетону. Разом з цим, з метою отримання оптимальних показників армування структури цементних композитів при врахуванні методів формоутворення та оздоблення поверхні декоративних елементів, відкритим все ж залишається питання щодо сумісності фібри із дисперсною матрицею бетону. Ефективність будь-яких дискретних волокон

залежить першочергово від ступеня їх дисперсності (розподілення) в об'ємі композитів, від виходу їх на лицьову поверхню архітектурних виробів тощо.

Аналіз відомих досліджень і публікацій. Аналітичний огляд літературних джерел показав, що з метою отримання декоративного бетону з тривалим естетичним і функціональним потенціалом у виробках фахівцями рекомендується до складу цементних композитів одночасно вводити органо-мінеральні добавки різної природи й дії [1-5 тощо]. Разом з тим, основою для виготовлення ДБ служать білий або кольоровий цементи, які дозволяють композиту за призначенням виконувати функції оздоблювального матеріалу [2, 6]. Загальновізнано, що в досягненні оптимальної структури бетону на рівні виробів істотну роль відіграють агреговані (або кластерні, блокові) структури цементного каменю. Це зумовлено тим, що кластерні структури дисперсної матриці, через багатоманітність складу й будови, володіють різними рівнями властивостей і сил адгезійно-когезійних взаємозв'язків і формують різні величини градієнтів напружень в об'ємі будівельного композиту. Об'ємні деформації, що сформувалися під впливом фізико-хімічних процесів гідратації цементу та виникають під дією кліматичних навантажень, є головною причиною утворення несучільностей (пор, капілярів, тріщин тощо) в структурі матеріалу виробів. Водночас, залежно від напружено-деформованого стану структури композиту, параметри несучільностей динамічно змінюються в часі. В своїх публікаціях В.М. Вировой [7-8 та ін.] несучільності відносять до активних елементів структури, через те, що вони першочергово реагують на вплив усіх зовнішніх факторів, локалізуючи внутрішні напруження з концентрацією у вершинах тріщин. То ж для поліпшення стійкості міжкластерних поверхонь розділу до дії напружень і розвитку деформацій, до складу структурних блоків композиту матеріалознавцями [1-5, 7-15 та ін.] рекомендується вводити порошкоподібні та волокнисті наповнювачі різної природи й геометрії. При цьому важливим є упорядкувати кластерні структури таким чином, щоб вони мали здатність без зміни своїх параметрів сприймати і перерозподіляти деформації на поверхнях розділу. Створення упорядкованих структур внаслідок багаторівневого армування агрегатів дискретним волокном повинно збільшити в'язкість руйнування слабких міжфазних перехідних зон, через рівномірніше розсіювання енергії в об'ємі матеріалу. Разом з цим, вирішальним чинником у мікроармуванні структури є рівновеликий розподіл дискретних волокон в композиціях. Це зумовлено тим, що недостатнє диспергування фібри призводить до виникнення структурних дефектів у вигляді «фібрових грудкувань» та не забезпечує сприятливий розподіл несучільностей. Як відомо, великий вплив на функціональні властивості композиту здійснюють саме неоднорідність і будова капілярно-пористого простору його мікроструктури. Своєю чергою А. Bentur, D.D.L. Chung та ін. зазначають [12, 14-15], що розподіл волокон

в цементній матриці значно покращується за рахунок зменшення їх довжини та в присутності тонкодисперсних часток наповнювачів. За даними досліджень авторів праць, зокрема власних [12, 16-20], ефективності мікроармування матриці можна досягти завдяки використанню гібридних систем, що містять дискретну арматуру одного виду, але різних розмірів. Наприклад, діаметром від 5 до 100 мкм і критичної довжини, оскільки довжина фібри впливає на здатність до змішування і рівномірний розподіл в сумішах. На нашу думку, сумісність дискретних волокон і матриці можна визначити через розподілення дефектів (тріщин, внутрішніх поверхонь розділу), проявлених на поверхні зразків композиту, і, відповідно, коефіцієнт поверхневої пошкодженості. Вплив фібри різної довжини на організацію мікроструктури глиняних і полімерних композицій було розглянуто в статті [21]. Отримані результати на фізичних моделях цих систем дозволили встановити, що дискретні волокна здатні брати активну участь в організації кластерних структур різної природи. Використання фібри оптимальної геометрії забезпечує отримання композитів зі значно меншою кількістю дефектів і сприяє одноріднішому розсіюванню внутрішньої енергії в об'ємі матеріалу. Отже, з огляду на результати структурних параметрів в'язучих систем, які представлені в [19, 21], це надало підстави розпочати нові дослідження, а саме – цементної матриці декоративного бетону.

Метою роботи є направлена зміна структури декоративних композитів за рахунок управління процесами структуроутворення в'язучих систем шляхом раціонального використання наповнювачів і гібридного дискретного наповнення.

Матеріали та опис досліджень. Для точного опису мікроструктури декоративного композиту та розгляду взаємозв'язків між вихідними його параметрами застосовано метод експериментально-статистичного моделювання [22]. Аналіз інформації, накопиченої під час реалізації низки пошукових експериментів, дозволив визначити список основних діючих факторів складу матриці та межі їх варіювання. Рецептурні фактори X_i нормалізовані на трьох рівнях до $|x_i| \leq 1$ за типовими формулами [23].

З урахуванням визначених умов проведення натурного експерименту та аналізу характеристик планів другого порядку для побудови експериментально-статистичних моделей (ЕС-моделей), обрано 4-ох факторний симетричний план з 25-ти числом дослідів (або точок). Враховуючи різний характер впливу рецептурних складових на структуроутворення цементного каменю, фактори об'єднано у дві групи:

– «Модифікатори цементної системи» задавали кількість тонкомеленого цеоліту (Z) на рівнях 0, 4, 8 % (вводився взамін частини цементу від його маси) і суперпластифікатор на полікарбоксилатній основі (MF) – 0.15, 0.30, 0.45 % (від маси цементу);

– «Параметри дискретного армування» склали лугостійкі скловолокна довжинами 3 і 12 мм ($F3$ і $F12$) на рівнях 0, 0.015, 0.03 % (вводились від маси цементного тіста).

Графічне відображення точок плану експерименту представлено на діаграмі «квадрат на квадратах» (рис. 1), у якій несучий квадрат відповідає підсистемі 1-ої групи факторів x_1 і x_2 , а в 9-ти вузлових точках квадрату (центр, 4 кути і 4 середини сторін) розташовані перемінні x_3 і x_4 із підсистеми 2-ої групи факторів.

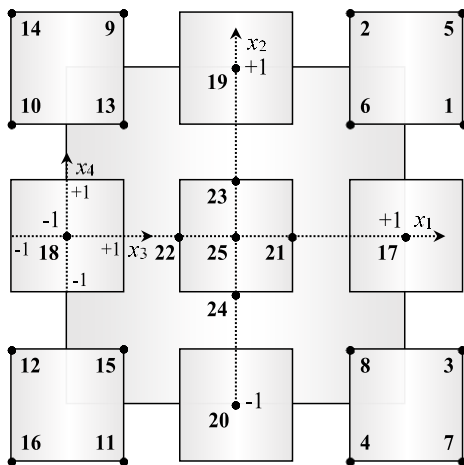


Рис. 1. План експерименту в 4-х вимірній області нормалізованих факторів складу цементного каменю

Склади 27-ми композицій виготовлялись на білому портландцементі з різним водо-цементним співвідношенням (В/Ц), при якому забезпечувалась однакова консистенція в'язучого тіста за розпливанням конуса. Середня густина (ρ , кг/см³), водопоглинання (W , % і г/см³) й коефіцієнт технологічної пошкодженості (K_D , мм/мм²) різних складів цементного каменю визначались шляхом випробування зразків-дисків розміром 100×10 мм. Перед дослідженням фізичних показників матриці зразки впродовж 28 днів витримувались у приміщенні при температурі 23±2 °С і відносній вологості атмосферного повітря 60±10 %. Легкоукладальність тіста, ρ і W_M каменю визначались відповідно до державних стандартів України, а K_D – за розробленою методикою В.М. Вирового (патент на винахід № 5735).

Аналіз результатів натурального експерименту. Дослідження 25-ти пластифікованих дисперсних систем виду «в'язуче – цеоліт», «в'язуче – фібра», «в'язуче – цеоліт – фібра» і «в'язуче – без наповнювачів» показали, що процес структуроутворення цементного каменю напряму залежить від

початкової концентрації полікарбосилату (MF) у водному середовищі. Залежно від якісно-кількісного наповнення в'язучих систем і рівня їх пластифікації, В/Ц композицій змінювалось у межах від 0.200 до 0.310, а середня густина каменю – від 1751 до 2271 кг/м^3 . Причому збільшення В/Ц, для забезпечення вимоги по рухомості тіста, призводить до зниження ρ у 1.3 рази. Між показниками спостерігається досить тісний зв'язок, кореляція склала $r = -0.84$. Разом з цим, підвищення дозування добавки MF від 0.15 до 0.45% особливо «позитивно» впливає на формування пористої структури композитів. Пошкодженість і водопоглинання зразків каменю знижуються в декілька разів, відповідно від 0.38 до 0.07 мм/мм^2 (K_D) та від 16 до 5% (або з 0.28 до 0.11 $\text{г/см}^3 \rightarrow W$). Отримується більш щільна за площею поверхні границя розділу дискретних складових цементного каменю. Правдивість заключення можна підтвердити аналізом співзалежностей поміж структурними параметрами композитів (рис. 2). Аналіз цих взаємозв'язків є важливим, оскільки критерії дозволяють виносити судження про будову капілярно-пористого простору дисперсних систем.

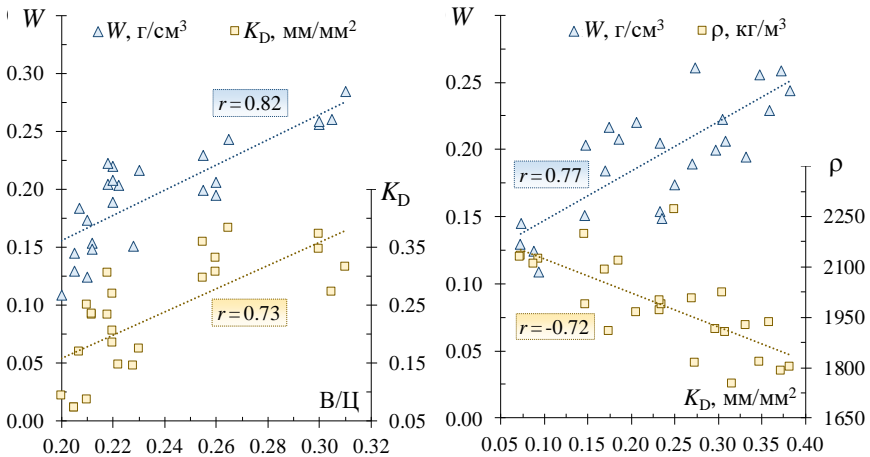


Рис. 2. Діаграми розсіювання експериментальних значень фізичних властивостей цементного каменю

Обробка експериментальних даних показала, що величина водоцементного співвідношення досить помітно позначається на фізичних параметрах в'язучих систем. Результати демонструють, що чим вище початкове В/Ц, тим більша капілярна пористість і тим менш щільною звісно є область межі розділу між структурними агрегатами. Зі зростанням В/Ц збільшується кількість несучільностей у вигляді відкритих пор, капілярів тощо в об'ємі каменю та відповідно підвищується його водопоглинання.

Аналіз значень коефіцієнтів парної кореляції вказує, що взаємозв'язок між критеріями наближається до детермінованого функціонального, $r\{B/\Pi;K_D\} = 0.73$, $r\{B/\Pi;W\} = 0.82$ і $r\{K_D;W\} = 0.77$. Водночас із зростанням кількості несущільностей середня густина знижується $r\{K_D;\rho\} = -0.72$. Очевидно, що чим більше мікрodefектів (капілярів, тріщин, пор тощо) у структурі, тим легший за масою матеріал. Отже, параметри K_D і ρ змінюються незалежно, але паралельно під час початкового процесу структуроутворення цементного каменю. В роботі додатково розглянута співзалежність між W і ρ . При цьому водопоглинання визначалось через 15 хв, далі – через 1 год. впродовж 6 год. та після 24 год. замочування зразків-дисків. Виявлено, що кореляції між характеристиками у всіх випадках знаходяться у межах $-0.85 \leq r \leq -1$. Таким чином, між фізичними властивостями різних в'язучих систем спостерігається суттєвий кореляційний зв'язок, що вказує на достовірність отриманих результатів.

Одночасно з дослідженням складів композиту на пошкодженість (K_D визначався після W) проводився візуальний аналіз розподілу мікрodefектів на поверхні зразків. Загальновідомо, що для структури цементного каменю значущим є однорідний розподіл як продуктів новоутворень, так і несущільностей за об'ємом зразків [24]. Як приклад, на рис. 3 представлено фото 4-х із 25-ти зразків різних за складом цементних систем.

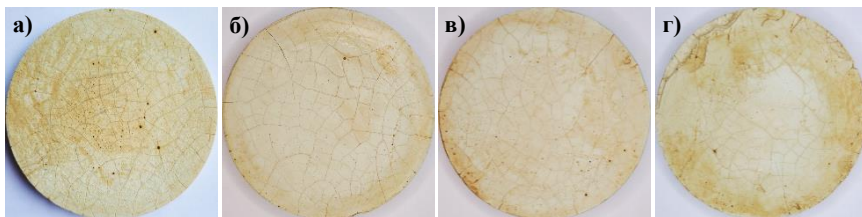


Рис. 3. Тріщини і внутрішні поверхні розділу на поверхні зразків

4-х складів цементного каменю: а) #4 $\Rightarrow K_D = 0.348 \text{ мм/мм}^2$;

б) #11 $\Rightarrow 0.308 \text{ мм/мм}^2$; в) #15 $\Rightarrow 0.297 \text{ мм/мм}^2$; г) #16 $\Rightarrow 0.359 \text{ мм/мм}^2$

Аналіз характеру пошкоджень композитів показав, що при різних числових значеннях K_D спостерігається неоднакова картина розподілення мікрodefектів за площею поверхні зразків-дисків. Величина параметру K_D напряму пов'язана зі здатністю сформованих структурних агрегатів сприймати і перерозподіляти напруження й об'ємні деформації, що виникають під час протікання різних процесів структуроутворення каменю. З рис. 3 можна побачити, що активними зонами накопичення пошкоджень є периферійні ділянки зразків-дисків. Причому найбільш помітно це спостерігається на контрольному складі #16 (рис. 3г). Кластерні структури каменю #16 характеризуються значною нерівномірністю розподілу

внутрішніх напружень. Безумовно, присутність високодисперсних цеоліту та фібри сприяє більш однорідному розсіюванню мікрodefектів (рис. 3а-в) в об'ємі композиту. До того ж, незалежно від рівня пластифікації дискретно-армованих композицій (без цеоліту), зберігається загальна картина характеру тріщиноутворення. При цьому утворюються структурні блоки різної природи (об'ємні, видовжені). Варто відмітити, що при максимальному рівні пластифікації цементного тіста з добавкою цеоліту (без фібри) рівномірність розподілення несучільностей дещо втрачається. Візуально-кількісний аналіз параметру K_D (рис. 3) добре стикується з експериментальними даними по W . У дискретно-армованих композитів складу #11 і #15 питома водопоглинання зразків-дисків (г/см^3), порівняно зі складом #16, нижче на 10 та 13%, відповідно. Підтверджується попередньо зроблений нами висновок, що дискретні волокна здатні активно приймати участь у процесах структурування будівельних композитів [21]. За рахунок введення гідрофільної фібри можна поліпшити однорідність розсіювання несучільностей, внутрішніх напружень і, зокрема, сприяти більш рівномірному розподілу продуктів новоутворень в об'ємі цементного каменю на початковому етапі становлення його структури. В роботі [21] ми показали, що лінійні частки можуть виступати активним осередком, навколо поверхні яких групуються дисперсні частки різного хімічного

$$Y = b_0 \left[\begin{array}{l} \pm b_{1x_1} \pm b_{11x_1^2} \pm b_{12x_1x_2} \\ \pm b_{2x_2} \pm b_{22x_2^2} \end{array} \right] \left[\begin{array}{l} \pm b_{13x_1x_3} \pm b_{13x_1x_3} \\ \pm b_{23x_2x_3} \pm b_{24x_2x_4} \end{array} \right] \left[\begin{array}{l} \pm b_{3x_3} \pm b_{33x_3^2} \pm b_{34x_3x_4} \\ \pm b_{4x_4} \pm b_{44x_4^2} \end{array} \right] \quad (1)$$

складу. Спостерігається співзалежність рівновеликих за розміром кластерних агрегатів і розподіленими мікрodefектами на поверхні зразків-дисків. Проте, як показано в цій роботі, властивості композитів значною мірою залежать від пошкоженості їх структури, що формується під впливом рецептурних компонентів в'язучих систем. Отже, аналіз надалі доцільно проводити із використанням експериментально-статистичних моделей.

Аналіз результатів математичного моделювання. За натурними даними експерименту для водопоглинання (W , г/см^3) і коефіцієнта пошкоженості (K_D , мм/мм^2) в програмі COMPEX (розроблена в ОДАБА під керівництвом В.А. Вознесенського) побудовано чотирьохфакторні квадратичні ЕС-моделі «повних» полів Y виду (1).

Нелінійна модель (1) структурована за групами складових композиту «Модифікатори цементної системи» і «Параметри дискретного армування». Блок (а) описує вплив на властивості Y органо-мінеральних

модифікаторів x_1 і x_2 . Блок (б) – вплив на Y дискретних скловолокон x_3 і x_4 . Блок (с) показує, як будуть трансформуватися локальні поля властивості за рахунок взаємозв'язку двох груп перемінних $x_1 \div x_4$.

З метою аналізу впливу окремо кожної групи факторів на формування структурних параметрів цементних систем виконано ряд обчислювальних експериментів [25]. Для їх реалізації з нелінійних ЕС-моделей (1) W та K_D отримувались 2-х факторні моделі виду (2) і (3).

$$Y = b_0 \pm b_1x_1 \pm b_{11}x_1^2 \pm b_{12}x_1x_2 \pm b_2x_2 \pm b_{22}x_2^2 \quad (2)$$

$$Y = b_0 \pm b_3x_3 \pm b_{33}x_3^2 \pm b_{34}x_3x_4 \pm b_4x_4 \pm b_{44}x_4^2 \quad (3)$$

Моделі описують локальні поля (рис. 4) в нормалізованих координатах факторів 1-ої групи x_1 і x_2 під впливом дискретних волокон $x_3 + x_4$ та навпаки, в координатах факторів x_3 і x_4 при синергетичній дії модифікаторів $x_1 + x_2$. Таким чином, на діаграмах критеріїв Y показано по 2 поверхні, які утворені неармованими ($x_3 = x_4 = -1$) і гібридно-армованими ($x_3 = x_4 = 0$) складами (рис. 4а, верхня і нижня поверхні) та складами з оптимальним дозуванням модифікаторів на двох рівнях $x_1 = x_2 = 0$ і $+1$ (рис. 4б, нижня поверхня). При цьому для порівняння ефекту модифікації до уваги приймалися композиції з мінімальним рівнем пластифікації та без цеоліту $x_1 = x_2 = -1$ (рис. 4б, верхня поверхня). Зміна властивостей W та K_D в межах локальних полів оцінювалась їх абсолютним приростом [23, 25].

Отримані результати моделювання параметрів капілярно-пористої структури цементного каменю дозволяють відмітити наступне.

Дискретні волокна є активними елементами фізико-механічних процесів структуроутворення цементних систем. Аналіз локальних полів структурних параметрів показує, що присутність фібри в складі композитів змінює будову капілярно-пористого простору (рис. 4а). Мінімальне водопоглинання W досягається на складах цементного каменю з високим рівнем пластифікації тіста без цеоліту. Причому \max і \min значення W гібридно-армованих систем на 6.5 і 7.8% менші, у порівнянні з неармованими (рис. 4а, нижня поверхня). Разом з тим, зміна W матеріалу залежить як від величини капілярної пористості, так і від середнього розміру капілярів $\bar{\lambda}$ та їх однорідності α . В роботі розглянуто лінійний зв'язок між показниками та виявлено суттєву кореляцію, $r\{W : \bar{\lambda}\} = 0.75$ і $r\{W : \alpha\} = -0.87$. До того ж простежується, що чим більша однорідність розмірів капілярів, тим менший їх середній розмір $r\{\alpha : \bar{\lambda}\} = -0.75$. Підтверджуються раніше зроблені висновки, що структура армованих

композицій пронизана тоншою капілярною сіткою [21] та характеризується мікропористістю [26].

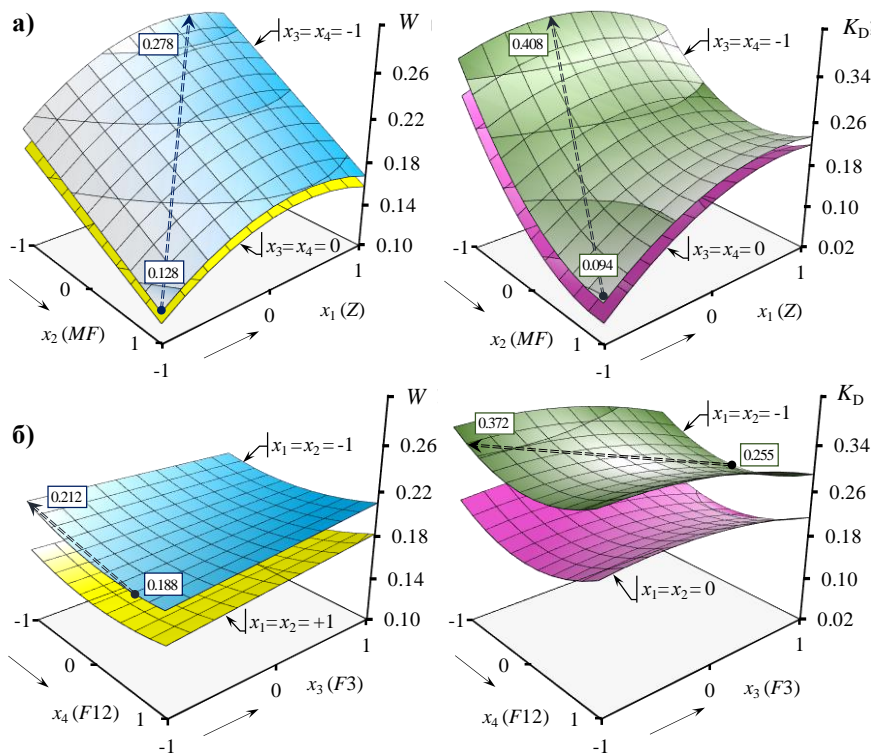


Рис. 4. Локальні поля властивостей складів цементного каменю в координатах факторів модифікації цементної системи (а) та параметрів дискретних волокон (б)

Безперечно, водопоглинання полікапілярних матеріалів залежить від величини пошкодженості. Візуалізація ізоповерхонь на діаграмі рис. 4а для K_D демонструє, що склади армованого цементного каменю ($x_3 = x_4 = 0$) характеризуються меншою пошкодженістю, \max і \min значення показника на 13 і 37% нижчі, у порівнянні з неармованими складами ($x_3 = x_4 = -1$). Отже, на початковому етапі структуро-утворення композитів формуються кластерні підструктури зі щільнішою упаковкою тонкодисперсних часток і покращеними міжчастковими силами зв'язку, завдяки раціональному В/Ц і високому ступеню розподілу фібри в об'ємі в'язучої системи. Водночас, слід відмітити позитивну роль цеоліту в формуванні структури дискретно-армованих композитів (рис. 4а, нижня поверхня). При заміні цементу

цеолітом Z в кількості 8% (або $x_1 = +1$), оптимальні показники $W \Rightarrow 0.158$ г/см³ і $K_D \Rightarrow 0.19$ мм/мм² досягаються на складах з різним рівнем пластифікації тіста, $x_2 = +1$ і $+0.4$ відповідно.

Аналіз зміни властивостей в координатах лінійних часток x_3 і x_4 показує, що ріст ефективності синергетичного впливу добавок ($x_1 + x_2$) значною мірою залежить від рівня модифікації структури цементного каменю. Порівняльний аналіз коефіцієнтів моделей та представлених на рис. 4б ізоповрхонь (верхня і нижня) для W та K_D дозволяє відмітити наступне. Мінімальне значення коефіцієнта пошкодженості композитів, як і водопоглинання, різко знижуються при підвищенні концентрації добавок в початковому складі дисперсної системи, від $x_1 = x_2 = -1$ до $x_1 = x_2 = 0$ та $+1$ (відповідно для K_D і W). Втім, для отримання найкращих ефектів по W вимагається вводити довгу фібру на рівні $x_4 = +0.4$, а для досягнення найбільш щільної структури із меншою кількістю несучільностей нагально потрібно цементну матрицю армувати коротким і довгим дискретним волокном на рівнях $x_3 = +1$ та $x_4 = 0$ (або 0.9 кг фібри на 1 м³ в'язучого тіста). При таких умовах співвідношень рецептурних факторів із в'язучим, W і K_D композитів зменшуються, відповідно на 17.6% і 33.5%.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Застосовування багаторівневого армування цементних композитів повинно підвищити стійкість міжкластерних поверхонь розділу до дії напружень й об'ємних деформацій під час структуроутворення матеріалу та гарантувати стабільність нормованих рівнів декоративно-експлуатаційних властивостей виробів у часі. Структурні параметри матриці декоративного композиту визначаються якісним і кількісним вмістом органо-мінеральних добавок і дискретних волокон. Чисельні дані властивостей підтверджують, що дискретні волокна здатні приймати активну участь у фізико-механічних процесах структуроутворення матеріалу. При раціональних співвідношеннях рецептурних факторів покращується будова капілярно-пористого простору в'язучих систем. Зміна кількості несучільностей в структурі декоративних композитів повинна відобразитися на механічних властивостях каменю. В наступній публікації планується представити результати дослідження структурної міцності дисперсних систем.

References

1. Architectural Precast Concrete / PCI Architectural Precast Concrete Manual Committee / Sidney Freedman Editor *et al.* 3th ed., 2007.
2. Pushkarova K.K., Honchar O.A., Mazur V.O. Osoblyvosti strukturoutvorennia biloho portlandsementu v prysutnosti karbonatnykh dobavok. Resursoekonomni materialy, konstruktshii, budivli ta sporudy. 2023. S. 57-69.
3. John Newman, Ban Seng Choo. *Advanced Concrete Technology Constituent Materials*. Oxford, UK: Butterworh-Heinemann (Elsevier). 2003.

4. Kosmatka, Steven H. *et al. Design and Control of Concrete Mixtures*. The guide to applications, methods, and materials. 14th ed., 2011.
5. Khymycheskye y myneralnye dobavky v beton / pod red. A.V. Usherova-Marshaka. Kharkov: Koloryt, 2005. 280s.
6. DSTU B A.1.1-59-95. Betonni, rozchynni sumishi ta betony. Terminy ta vyznachennia. Chynnyi z 01.07.1995. Kyiv: Derzhkommistobuduvannia Ukrainy.
7. Vyrovoy V.M., Korobko O.O., Sukhanova S.S., Sukhanov V.H. Naukovi doslidzhennia: osnovy metodolohii. Odesa: ODABA, 2024. 148s.
8. Sukhanov V.H., Vyrovoy V.M., Korobko O.A. Struktura materialu u strukturi konstruksii: monohrafiia. Odesa: ODABA, 2022. 412s.
9. Ramachandran V.S., Beaudoin James J. *Handbook of Analytical Techniques in Concrete Science and Technology*. William Andrew Publishing, LLC Norwich, New York, USA, 2001.
10. Mehta P., Paulo J.M. Monteiro. *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*. McGraw Hill Professional. 3th ed., 2006.
11. Lee S.F., Jacobsen S. Study of interfacial microstructure, fracture energy, compressive energy and debonding load of steel fiber-reinforced mortar. *Materials and Structures*, 2011. vol. 44. pp. 1451-1465.
12. Bentur A., Mindess S. *Fibre Reinforced Cementitious Composites*. London-New York: Taylor & Francis. 2th ed., 2007.
13. Maso J.C. *Interfacial Transition Zone in Concrete*. An Imprint of Chapman & Hall, 1996.
14. Chung D.D.L. *Composite materials. Engineering Materials and Processes*. Springer London Dordrecht Heidelberg New York. 2th ed., 2010.
15. Andrzej M. Brant *Cement-based composites: materials, mechanical properties, and performance*. Taylor & Francis, London and New York, 2009.
16. Markovic I. *High-Performance Hybrid-Fibre Concrete. Development and Utilisation*. Delf University Press, 2006.
17. di Prisco M., Plizzari G., Vandewalle L. Fibre reinforced concrete: new design perspectives. *Materials and Structures*, 2009. vol. 42. pp. 1261-1281.
18. Dovgan A.D., Vyrovoy V.M., Dovgan P.M. Crack resistance of decorative composites. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 708.
19. Dovgan A.D., Vyrovoy V.M. Structure formation of dispersed-reinforced building composites. *Bulletin of Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture*, 2021, no. 85, pp. 71-78.
20. Tahwia A.M., Mokhles M., Elemam W.E. Optimizing characteristics of high-performance concrete incorporating hybrid polypropylene fibers. *Innovative Infrastructure Solutions*, 2023, vol. 8:297.
21. Dovhan O.D., Vyrovoy V.M., Dovhan P.M., Makarova S.S. Rol dyskretnoi armatury v orhanizatsii mikrostruktury dekoratyvnykh kompozytiv. Suchasne budivnytstvo ta arkhitektura, 2024. – pryiniata redaktsiinoiu kolehiieiu do druku.

22. Voznesenskyi V., Liashenko T. ЭС-modelы в компиутерном материалovedenyyu. Материалы к 45-му mezhduнародному semynaru по modelyrovaniyu y optymyzatsyy kompozytov. Odessa: «Astropynt», 2006. 115s.
23. Voznesenskyi V.A., Liashenko T.V., Oharkov B.L. Chyslennyye metody resheniya stroytelno-tekhnolohychnykh zadach na ЭVM. Kyev: Vysshaya shkola, 1989. 328s.
24. Pashchenko A.A., Miasnykova E.A., Humen V.S. ta in. Teoryia tsementa. Kyiv: Budivelnik, 1991. 168s.
25. Liashenko T.V., Voznesenskyi V.A. Metodolohyia retsepturno-tekhnolohycheskykh polei v kompiuternom stroytelnom materialovedenyyu. Odessa: Astropynt, 2017. 168s.
26. Dovhan O.D., Vyrovyi V.M., Dovhan P.M. Vodopohlynannia, yak funktsiia skladiv dekoratyvnykh betoniv. Zb. nauk. pr. «Resursoekonomni materialy, konstruktsii, budivli ta sporudy». 2020. S. 148-160.

Література

1. Architectural Precast Concrete / PCI Architectural Precast Concrete Manual Committee / Sidney Freedman Editor *et al.* 3th ed., 2007.
2. Пушкарьова К.К., Гончар О.А., Мазур В.О. Особливості структуроутворення білого портландцементу в присутності карбонатних добавок. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. 2023. С. 57-69.
3. John Newman, Ban Seng Choo. *Advanced Concrete Technology Constituent Materials*. Oxford, UK: Butterworh-Heinemann (Elsevier). 2003.
4. Kosmatka, Steven H. *et al. Design and Control of Concrete Mixtures*. The guide to applications, methods, and materials. 14th ed., 2011.
5. Химические и минеральные добавки в бетон / под ред. А.В. Ушерова-Маршака. Харьков: Колорит, 2005. 280с.
6. ДСТУ Б А.1.1-59-95. Бетонні, розчинні суміші та бетони. Терміни та визначення. Чинний з 01.07.1995. Київ: Держкоммістобудування України.
7. Вировой В.М., Коробко О.О., Суханова С.С., Суханов В.Г. Наукові дослідження: основи методології. Одеса: ОДАБА, 2024. 148с.
8. Суханов В.Г., Вировой В.М., Коробко О.А. Структура матеріалу у структурі конструкції: монографія. Одеса: ОДАБА, 2022. 412с.
9. Ramachandran V.S., Beaudoin James J. *Handbook of Analytical Techniques in Concrete Science and Technology*. William Andrew Publishing, LLC Norwich, New York, USA, 2001.
10. Mehta P., Paulo J.M. Monteiro. *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*. McGraw Hill Professional. 3th ed., 2006.
11. Lee S.F., Jacobsen S. Study of interfacial microstructure, fracture energy, compressive energy and debonding load of steel fiber-reinforced mortar. *Materials and Structures*, 2011. vol. 44. pp. 1451-1465.

12. Bentur A., Mindess S. *Fibre Reinforced Cementitious Composites*. London-New York: Taylor & Francis. 2th ed., 2007.
13. Maso J.C. *Interfacial Transition Zone in Concrete*. An Imprint of Chapman & Hall, 1996.
14. Chung D.D.L. *Composite materials. Engineering Materials and Processes*. Springer London Dordrecht Heidelberg New York. 2th ed., 2010.
15. Andrzej M. Brant *Cement-based composites: materials, mechanical properties, and performance*. Taylor & Francis, London and New York, 2009.
16. Markovic I. *High-Performance Hybrid-Fibre Concrete. Development and Utilisation*. Delf University Press, 2006.
17. di Prisco M., Plizzari G., Vandewalle L. Fibre reinforced concrete: new design perspectives. *Materials and Structures*, 2009. vol. 42. pp. 1261-1281.
18. Dovgan A.D., Vyrovoy V.M., Dovgan P.M. Crack resistance of decorative composites. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 708.
19. Dovgan A.D., Vyrovoy V.M. Structure formation of dispersed-reinforced building composites. *Bulletin of Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture*, 2021, no. 85, pp. 71-78.
20. Tahwia A.M., Mokhles M., Elemam W.E. Optimizing characteristics of high-performance concrete incorporating hybrid polypropylene fibers. *Innovative Infrastructure Solutions*, 2023, vol. 8:297.
21. Довгань О.Д., Вировой В.М., Довгань П.М., Макарова С.С. Роль дискретної арматури в організації мікроструктури декоративних композитів. *Сучасне будівництво та архітектура*, 2024. – прийнята редакційною колегією до друку.
22. Вознесенский В., Ляшенко Т. ЭС-модели в компьютерном материаловедении. *Материалы к 45-му международному семинару по моделированию и оптимизации композитов*. Одесса: «Астропринт», 2006. 115с.
23. Вознесенский В.А., Ляшенко Т.В., Огарков Б.Л. Численные методы решения строительно-технологических задач на ЭВМ. Киев: Высшая школа, 1989. 328с.
24. Пашенко А.А., Мясникова Е.А., Гумен В.С. и др. Теория цемента. Київ: Будівельник, 1991. 168с.
25. Ляшенко Т.В., Вознесенский В.А. Методология рецептурно-технологических полей в компьютерном строительном материаловедении. Одесса: Астропринт, 2017. 168с.
26. Довгань О.Д., Вировий В.М., Довгань П.М. Водопоглинання, як функція складів декоративних бетонів. *Зб. наук. пр. «Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди»*. 2020. С. 148-160.