

БУДІВНИЦТВО ТА ЦИВІЛЬНА ІНЖЕНЕРІЯ

УДК 691.32:519.24

DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2025.110.0.113

МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ СТРУКТУРНИХ ЕЛЕМЕНТІВ
НА ВЛАСТИВОСТІ МІКРОСТРУКТУРИ ДЕКОРАТИВНОГО БЕТОНУ

Довгань О. Д.

Одеська державна академія будівництва та архітектури

Анотація. Декоративні бетони у виробках складної геометричної форми реагують на весь сукупний вплив факторів навколишнього середовища. Синергетична дія внутрішніх і зовнішніх чинників призводить до значного погіршення властивостей архітектурних виробів. З метою забезпечення довговічності й експлуатаційної надійності матеріалу декоративних елементів виникає необхідність покращення властивостей мікроструктури бетону. У роботі зазначено, що поліпшити властивості цементного каменю можна способом зниження початкової пошкодженості мікроструктури декоративного бетону.

Ключові слова: декоративний бетон, мікроструктура, пошкодженість, склофібра, експериментально-статистична модель.

Вступ

Декоративний бетон (ДБ) належить до групи спеціальних бетонів. До нього висуваються жорсткі вимоги за призначенням – він має володіти покращеними естетичними й експлуатаційними властивостями. Відповідно до українського стандарту [1] ДБ виготовляють на основі білого чи кольорового цементів, він здійснює функцію оздоблювального матеріалу. Отже, базовим компонентом у приготуванні декоративних сумішей, призначених для формоутворення з них архітектурних виробів (елементів, деталей тощо), є білий портландцемент.

Для забезпечення вимог з отримання елементів складної геометричної форми з певною архітектурно-виразною структурою та кольоровою однорідністю лицьової поверхні виробничі процеси вимагають використання легкоукладальних сумішей з високою водотримувальною здатністю. Інтегральна структура виробів на початковому етапі структуроутворення матеріалу в формах має бути організована так, щоб вона дозволила отримання кінцевих продуктів із комплексом нормованих показників [2], зокрема сприяла збереженню функціональних властивостей композита в період експлуатації архітектурних деталей. Відомо, що сформована структура матеріалу на рівні виробів [3] складається з однорідно-неоднорідних за складом кластерних агрегатів на всіх рівнях структурної неоднорідності бетону. Через багатоманітний якісно-кількісний склад структурних агрегатів, різну будову, а отже, й різні фізико-механічні властивості сили зчеплення між

дискретними складовими (частками, підструктурами) матеріалу можуть змінюватися в десятки разів. Визначальним фактором в отриманні оптимальних структур, спроможних протистояти негативному впливу об'ємних деформацій під час процесу структуроутворення композита, є комплексне забезпечення надійних структурних зв'язків на границі розділу між складовими бетону.

Для встановлення якісних і кількісних структурних зв'язків в одиниці об'єму матеріалу можна використовувати такий структурний параметр, як пошкодженість будівельного композита. Терміном «пошкодженість» визначають загальну кількість несущільностей або мікродефектів (порів, капілярів, тріщин тощо), наявних в об'ємі матеріалу. Через те, що мікроструктура бетону є важливим елементом у формуванні інтегральної структури виробів, у цій роботі наведено результати досліджень пошкодженості різних складів цементного каменю, наповненого органомінеральними добавками різного виду.

Аналіз публікацій

Аналітичний огляд літератури щодо цементних композитів демонструє, що для зниження пошкодженості матричного матеріалу декоративного бетону варто використовувати дискретні волокна різного походження та геометрії. Однак ступінь ефективності фібри в дисперсно-армованих композитах залежить від взаємодії волокон з тонкодисперсними частками матеріалу, щільності в'язучого каменю в зоні контакту та мікрооб'єму поверхні розподілу, зокрема

від розподілення та об'ємної частки волокон у цементному тісті. Для отримання щільної матриці з поліпшеними параметрами структурних агрегатів необхідно щільно упаковувати дисперсні та лінійні частки в об'ємі матричного композита.

Одним із ключових факторів компактного укладання часток дисперсно-армованої фази є співрозмірність вихідних складових цементної матриці [4–6]. За належного розосередженню всіх дискретних часток під час приготування та ущільнення композиції із подальшим заповненням проміжків між всіма частками вискодисперсних продуктів гідратації цементу можна покращити структурні зв'язки між кластерними агрегатами, зокрема отримати більш однорідну міжфазну перехідну зону зі значно меншою кількістю несучільностей в мікрооб'ємі матеріалу на границях розділу «фібра-матриця». Водночас армування цементного каменю лінійними частками збільшує кількість границь розподілу в матриці бетону. Так само напруження, що виникають під впливом внутрішніх і зовнішніх факторів, передаються через поверхні розділу від матриці до волокон і навпаки. Отже, ця область є досить чутливою до порушення структурних зв'язків і виникнення в ній локальних пошкоджень, наприклад у виді тріщин.

Для ефективного управління структурними зв'язками на межі розділу «фібра-матриця» рекомендується використовувати органо-мінеральні добавки. У роботах [7–14] зазначено, що органічні добавки, впливаючи на міжфазні взаємодії, суттєво змінюють властивості поверхонь розділу, а модифікація перехідної зони завдяки мікронаповнювачам і продуктам пуцоланової реакції дозволяє зменшити дефектність мікрооб'єму та забезпечити кращу міцність з'єднання фібри з матрицею. На думку авторів [15, 16], застосування добавок в армованому складі композита покращує однорідність розподілу лінійних часток у цементному тісті. А втім тип і розмір перехідної зони теж залежать від типу дискретної арматури [6]. Все це дозволяє стверджувати, що для максимального використання потенційних можливостей фібри матрицю необхідно армувати моноволокнами, які здатні здійснювати свою функцію в організації структурних агрегатів, набувати різної конфігурації у період формування поверхонь розділу, утворювати «рівнозначний зв'язок» із дискретними складовими композита.

«Рівнозначним» у роботі називають зв'язок, де всі складові матриці взаємодіють на рівних умовах, забезпечуючи рівномірну передачу напружень від однієї частки до іншої в об'ємі матеріалу. Варто зазначити, що наведені в роботах результати попередніх наших експериментів [6, 15, 16] доводять, що наявність фібри в різних складах дисперсних систем покращує зв'язки між підструктурами композита.

Таким чином, проведений аналіз наукових праць показує, що для отримання надійних структурних зв'язків між дискретними складовими мікроструктури матриця композита потребує модифікації й армування вискодисперсними добавками різного виду.

Мета та завдання дослідження

Метою дослідження є поліпшення властивостей декоративного бетону завдяки направленій зміні початкової пошкодженості мікроструктури через цілеспрямоване використання органо-мінеральних добавок і дискретних волокон певної геометрії.

Для досягнення поставленої мети необхідно: дослідити властивості різних складів матриці декоративного бетону, від яких залежить довговічність й естетична виразність архітектурних виробів; порівняти статистичні визначення показників складів цементного каменю та проаналізувати залежність структурно-механічних параметрів від величини пошкодженості мікроструктури декоративного бетону; за допомогою експериментально-статистичних моделей визначити закономірності впливу двох груп рецептурних факторів на властивості мікроструктури декоративного бетону.

Матеріали та методи дослідження

Для комплексного дослідження структурних параметрів різних складів цементного каменю застосовано метод експериментально-статистичного моделювання. Експеримент здійснювався за симетричним ненасиченим планом другого порядку. В експерименті змінювалися дозування 4-ох рецептурних факторів X_i . Перехід від натурних X_i до нормалізованих перемінних $|x_i| \leq 1$ здійснено за типовими формулами [17]. Для визначення функції кожного чинника в управлінні впливу на властивості композитів, а також залежно від типу дії перемінних на цементну матрицю, їх об'єднано в дві групи.

До першої групи належать фактори *модифікації цементної системи*: тонкомелений

цеоліт на рівнях $x_1 (Z) = 4 \pm 4 \%$; полікарбоксилатний суперпластифікатор на рівнях $x_2 (MF) = 0.3 \pm 0.15 \%$. Цеоліт додавали замість частини білого портландцементу, а полікарбоксилат від маси в'язучої речовини.

До другої групи належать *параметри дискретного армування*: кількість лугостійких скляних волокон довжиною 3 і 12 мм $x_3 (F3) = x_4 (F12) = 0.015 \pm 0.015 \%$, які дозувались від маси в'язучого тіста.

Чотирифакторні математичні моделі будувались за середніми числовими значеннями властивостей композита на основі 25-ти точкового плану експерименту [15]. В одній точці плану досліджувався еталонний склад (#16, $x_1 = x_2 = x_3 = x_4 = -1$) з низьким рівнем пластифікації цементного тіста, а в інших – збиралась інформація щодо індивідуальної та сумісної дії складових в'язучої системи. У цьому випадку шкали факторів x_1, x_3 і x_4 орієнтовані так, щоб їхній нижній рівень ($x_{1,3,4} = -1$) відповідав композиціям без цеолітового наповнювача та дискретних волокон ($X_{1,3,4} = 0 \%$).

Передумовою проведення досліджень було приготування цементного тіста з однаковою розтічністю ($\varnothing_p \approx 300$ мм). Склади 25-ти композицій виготовлялись з різним водоцементним співвідношенням (В/Ц). На початку дослідження властивостей матеріалу зразки протягом 28 діб витримувались у приміщенні за температури 23 ± 2 °С і відносної вологості атмосферного повітря $60 \pm 10 \%$.

Середня густина (ρ , кгс/м³), границя міцності на розтягування за згинання (f_{ctfm} , МПа) і динамічний модуль пружності (E , ГПа) визначались способом випробування зразків-призм розміром $40 \times 40 \times 160$ мм, відповідно до вимог стандартів України. З метою отримання достовірної інформації про структурні параметри в цьому дослідженні пошкодженість цементного каменю визначалася двома способами на одних і тих самих половинках зразків-балочок, які попередньо пройшли випробування на f_{ctfm} .

За кожним складом досліджувалось по 4 зразки-балочки та їхні половинки. Під час кількісного аналізу величини пошкодженості цементного каменю коефіцієнт пошкодженості дорівнював K_D .

Організація за такою схемою вимірювань фізико-механічних характеристик на зразках з фіксованим номером дозволить розглянути співвідношення між величинами показників, визначити взаємозв'язки та проаналізувати

ступінь взаємодії волокон з матрицею, яка впливає на властивості композитів.

Визначення пошкодженості $K_{D,1}$ за першим способом здійснювалося згідно з методикою, наведеною в [2, 3]. Метод передбачає оброблення водним розчином таніну бокових граней кожної половинки зразка, виявлення сітки тріщин і внутрішніх поверхонь розподілу (несуцільностей), фотографування й опрацювання (масштабування, окреслення тощо) бокових граней зразка в програмі AutoCAD (США). На окремій грані кожної половинки (рис. 1) за допомогою інструментів програми фіксувалась сумарна довжина несуцільностей (ΣL_i , мм) та площі їхніх граней (S_i , мм²), величини яких співвідносяться одна з одною.

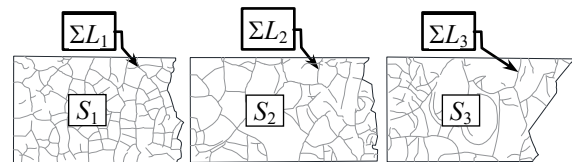


Рис. 1. Алгоритм визначення пошкодженості композиту за першим способом

Отже, за цією методикою спочатку визначаються коефіцієнти пошкодженості для бокових граней $K_{D,1}$, $K_{D,2}$ і $K_{D,3}$ (1), а надалі за отриманими результатами обчислюється середнє значення $K_{D,1}$ для однієї половинки зразка (2). Варто зазначити, що чим менша величина коефіцієнта $K_{D,1}$, тим кращий структурний зв'язок між кластерними агрегатами матеріалу

$$K_{D,1} = \frac{\Sigma L_1}{S_1}, K_{D,2} = \frac{\Sigma L_2}{S_2}, K_{D,3} = \frac{\Sigma L_3}{S_3}; \quad (1)$$

$$K_{D,4} = \frac{K_{D,1} + K_{D,2} + K_{D,3}}{3}. \quad (2)$$

Розрахунок величини пошкодженості $K_{D,II}$ за другим способом (рис. 2) здійснювалось відповідно до розробленої методики, що наведена в [18]. В її основі застосування цифрових комп'ютерних технологій для сканування, створення та оброблення половинок зразків-балочок з метою визначення рівня пошкодженості $K_{D,II}$ (3) об'єму досліджуваного композита мікроскопічними дефектами. За кожною половиною зразка обчислювалась площа його основи (S_o , мм²), яка дорівнює площі поверхні його розлому (S_p , мм²). Чим більше значення $K_{D,II}$, тим більш щільна та міцна структура композита



Рис. 2. Алгоритм визначення пошкодженості композита за другим способом

Вимірювання S_0 і S_p здійснювалося за допомогою інструментів програми SolidWorks (США). Варто зазначити позитивні елементи другого способу, як порівняти з першим: швидкість отримання інформації за величиною структурного параметра; безрозмірність і точність визначення $K_{D,II}$; врахування всіх мікропошкоджень, наявних на поверхні розлому зразка; неопосередкованість обчислення $K_{D,II}$ за однією половинкою зразка; універсальність методики проведення дослідження, оскільки вона не залежить від типу композита та фактури лицьової поверхні досліджуваних зразків.

Результати натурного експерименту: статистичний аналіз даних, аналіз кореляційного зв'язку показників

Для визначення особливостей капілярно-пористої мікроструктури бетону доцільно спочатку здійснити статистичний аналіз показників складів цементного каменю. Це зумовлено тим, що середні значення властивостей не враховують характеристику однорідності матеріалу, яка пов'язана з диспергуванням лінійних часток у композиті. Показ-

ником для контролю якості матричного матеріалу є коефіцієнт варіації (v , %). Через те, що в кожній точці плану експерименту пошкодженість отримувалась на 4-ох зразках, які попередньо випробували на міцність у процесі згинання f_{ctfm} , одночасно розглянуто кореляційний зв'язок між одиничними значеннями параметрів. На рис. 3 наведена інформація аналізу варіації f_{ctfm} і K_D та кореляції між ними для двох складів композита. Для наочності на рис. 3, а і б наведено моделі зразків для визначення структурного параметра за двома способами ($K_{D,I}$ та $K_{D,II}$).

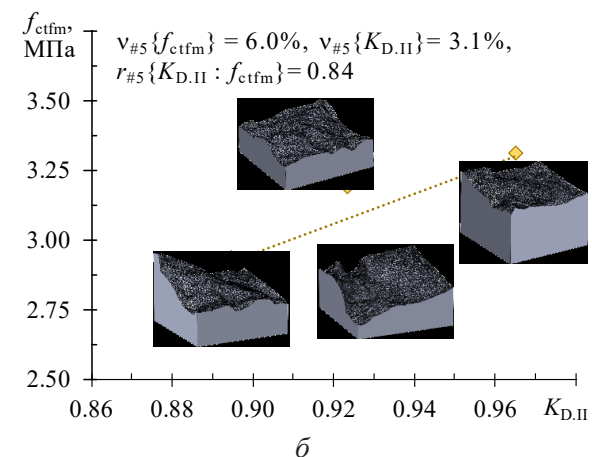
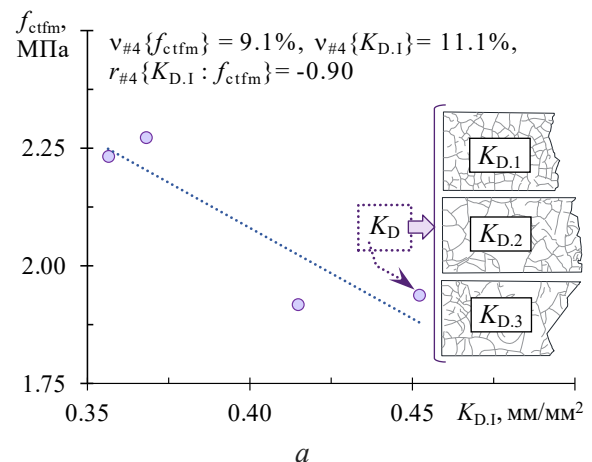


Рис. 3. Діаграми розсіювання одиничних показників міцності f_{ctfm} та коефіцієнта пошкодженості K_D для складів: (а) #4 ($x_1 = +1, x_2 = x_3 = x_4 = -1$); (б) #5 ($x_1 = x_2 = x_3 = x_4 = +1$)

Під час аналізу чисельних даних коефіцієнтів варіації міцності $v\{f_{ctfm}\}$ та пошкодженості $v\{K_D\}$ було визначено, що для 25-ти складів цементної матриці розкид f_{ctfm} знаходиться в межах від 2.5 до 18 %, а розсіяння значень $K_{D,II}$ змінюється в діапазоні від 1.1 до 7.4 %. Водночас визначено найбільший ступінь розкиду даних пошкодженості $v\{K_{D,I}\} \Rightarrow$ від 6.8 до 57.2 %, отриманої за першим

способом. У чотирьохармованих складах композита коефіцієнт варіації за міцністю знаходиться в межах від 13.5 до 18 %, а в 22-ох точках плану (за паралельних випробувань 4-х зразків у кожній точці) спостерігається значний розкид значень $K_{D,I}$. Зразки цементного каменю однакової форми, що виготовлені з одного складу матеріалу та збережені й випробувані в однакових умовах, мають у межах невеликої похибки визначатися «однаковою» пошкодженістю. Таку розбіжність даних параметра $K_{D,I}$ можна пояснити так: по-перше, на бокових гранях зразка враховується лише протяжність тріщин і внутрішніх поверхонь розділу, до уваги не беруться інші несучільності, наприклад пори чи пустоти; по-друге, пошкодженість визначається на певних ділянках зразка та не охоплює мікродфекти в об'ємі матеріалу;

по-третє, існують певна складність детального обрису мікродфектів на гранях, опосередкованість і ненадійність отримання даних тощо. Отже, коефіцієнт пошкодженості $K_{D,I}$, що отриманий 1-м способом, не дає змоги чітко інтерпретувати структурні особливості будови матеріалу. Однак середні значення коефіцієнта $K_{D,I}$ та міцності f_{ctfm} були співвіднесені один з одним, оскільки, як уже зазначалось в роботі, визначення параметрів здійснювалося на одних і тих самих зразках із фіксованим номером.

Відповідно до рис. 4, а, кореляція 25-ти пар показників є досить малою ($r = -0.26$), простежується взаємозалежність f_{ctfm} і $K_{D,I}$, що підтверджує вищенаведений висновок: числові дані параметра $K_{D,I}$ не можуть повною мірою відображати капілярно-пористу структуру матричного матеріалу.

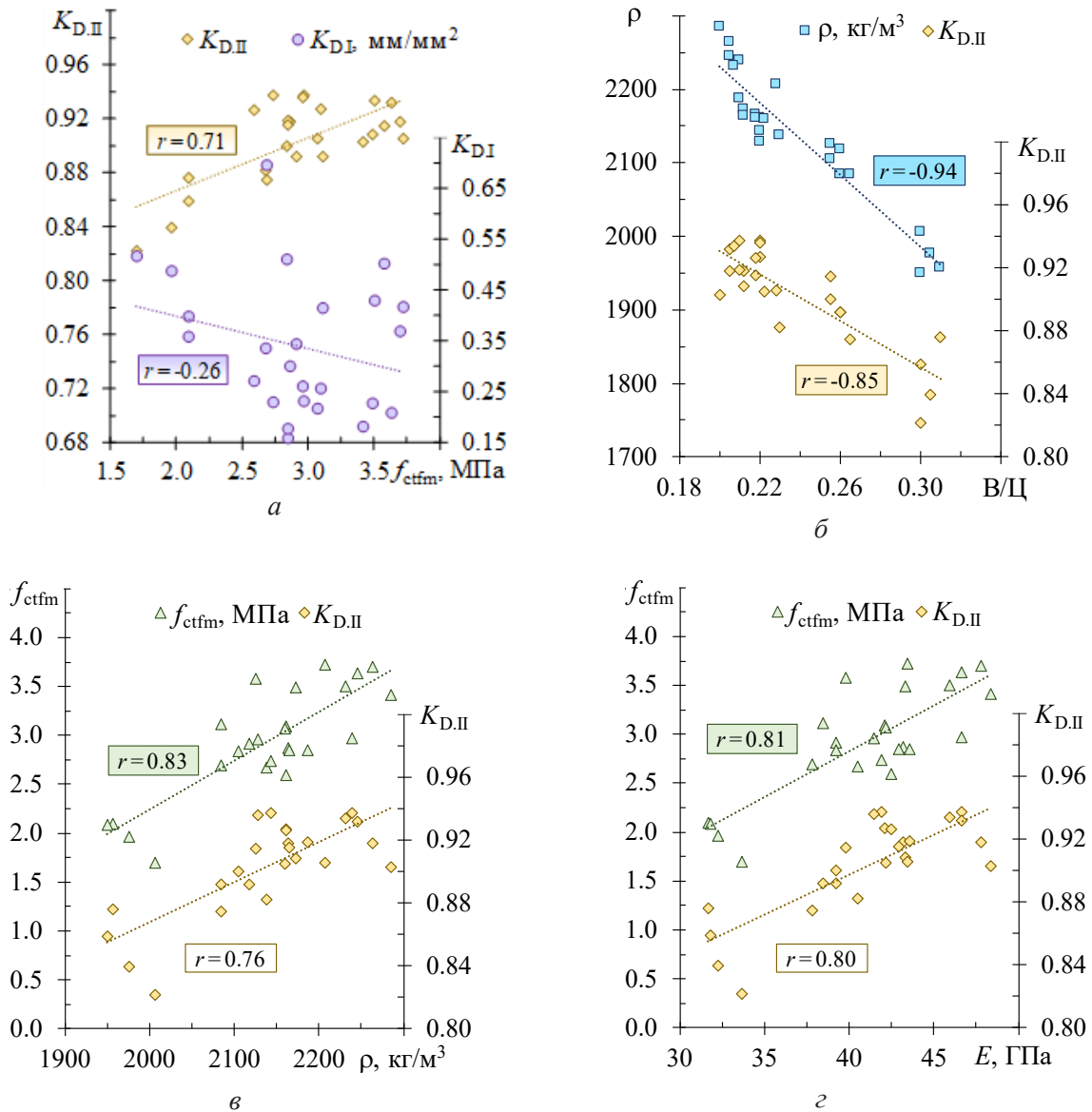


Рис. 4. Кореляційні поля середніх значень показників мікроструктури бетону: (а) f_{ctfm} і K_D ; (б) V/C і ρ , V/C і $K_{D,II}$; (в) ρ і f_{ctfm} , ρ і $K_{D,II}$; (г) E і f_{ctfm} , E і $K_{D,II}$

Зовсім інший процес відбувається за кореляційного аналізу середніх показників матриці з коефіцієнтом пошкодженості $K_{D,II}$, отриманого другим способом (рис. 4). Аналіз діаграм розсіювання демонструє значну кореляцію $K_{D,II}$ з показниками міцності f_{ctfm} (рис. 4, а), водоцементного співвідношення В/Ц (рис. 4, б), середньої густини ρ (рис. 4, в) і динамічного модуля пружності E (рис. 4, г) цементного композита. На пошкодженість мікроструктури, як позначено на рис. 4, б великий вплив здійснює В/Ц, що також відображається на щільності ρ і міцності, $r\{f_{ctfm}: W/C\} = -0.74$. Зниження мікродфектів різного виду в структурі матеріалу призводить до збільшення міцності, $r\{f_{ctfm}: K_{D,II}\} = 0.71$. Додатково розглянуто статистичний зв'язок $K_{D,II}$ і f_{ctfm} із динамічним модулем пружності E (рис. 4, г) та швидкістю проходження ультразвуку τ_m (км/с). Визначено наявність високої кореляції між критеріями $r\{\tau_m: f_{ctfm}\} = 0.80$ та $r\{\tau_m: K_{D,II}\} = 0.83$.

З огляду на те, що між структурними параметрами композита існує тісний кореляційний взаємозв'язок, можна через властивості проаналізувати якість структурних зв'язків між кластерними агрегатами в об'ємі матриці.

Завдяки визначеному факту [6], що фібра спроможна активно впливати на механізм початкового структуроутворення дисперсних систем (на різних рівнях структурної неоднорідності), важливо забезпечити оптимальний зв'язок лінійних часток з матричним матеріалом, адже відомо, що початково поганий контакт між дискретними складовими призводить до утворення слабких структурних зв'язків, пор та інших мікродфектів у структурі матеріалу.

Додавання до складу армованої матриці оптимальних дозувань полікарбоксилатної і пуцоланової добавок дозволяє не лише покращити механічний зв'язок фібри з дискретними складовими матриці, але й поліпшити однорідність якості композита (табл. 1).

Порівняльний аналіз параметрів складів з низьким #16 і високим #10 рівнями пластифікації (без пуцолани і фібри) вказує, що зростання міцності через неоднорідність складових структури пришвидшує утворення та розвиток мікродфектів. Однак це не стосується армованих складів #5 і #25, де варіація показників є значно нижчою.

Водночас на прикладі складу #15 доведено факт, що армування кластерних агрегатів збільшує структурне різноманіття матриці та

зміцнює структурні зв'язки між її дискретними складовими.

Таблиця 1 – Склади 5-и із 25 видів матричного композита та статистичний аналіз показників якості

Номер складу	Нормалізовані перемінні				Міцність		Пошкодженість	
	x_1	x_2	x_3	x_4	f_{ctfm} , МПа	v , %	$K_{D,II}$	v , %
#5	+1	+1	+1	+1	3.10	6.0	0.927	3.1
#10	-1	+1	-1	-1	3.41	11.5	0.903	6.2
#15	-1	-1	+1	+1	3.58	8.3	0.915	2.1
#16	-1	-1	-1	-1	2.84	7.2	0.900	3.9
#25	0	0	0	0	2.96	3.6	0.936	1.1

Таким чином, відповідно до інформації з аналізу натурних даних, доцільно з позицій моделювання показників проаналізувати більш детально вклад кожного рецептурного чинника в зниження пошкодженості цементної матриці на цьому етапі дослідження.

Моделювання властивостей мікроструктури бетону

Моделюються результати середніх показників 25-ти складів цементного каменю. Для міцності та пошкодженості побудовано нелінійні експериментально-статистичні моделі (ЕС-моделі) з 10 і 8 відмінними від нуля коефіцієнтами з похибками експерименту $s_e\{f_{ctfm}\} = 0.14$ МПа та $s_e\{K_{D,II}\} = 0.11$. У разі наявності 10% ризику в моделях властивостей Y не використовувались коефіцієнти, що не мають ніякого значення (табл. 2).

Таблиця 2 – Коефіцієнти ЕС-моделей для міцності f_{ctfm} та пошкодженості $K_{D,II}$ матриці

Y	f_{ctfm} (МПа)	$K_{D,II}$	Блок ЕС-моделі
b_0	3.01	0.918	
b_1	-0.391	-0.013	Фактори модифікації цементної системи (а)
b_2	+0.363	+0.024	
b_{11}	+0.210	-0.023	
b_{22}	0	-0.012	
b_{12}	+0.200	+0.012	Параметри дискретного армування (б)
b_3	+0.108	+0.003	
b_4	+0.055	0	
b_{33}	0	0	
b_{44}	-0.325	+0.015	Синергетичні ефекти рецептурних факторів (с)
b_{34}	+0.063	+0.005	
b_{13}	0	0	
b_{14}	-0.133	0	
b_{23}	0	0	
b_{24}	0	0	
Y_{min}	1.69	0.83	
Y_{max}	3.93	0.95	

Моделі (табл. 2) структуровано в три блоки: блок (а) містить коефіцієнти першої групи факторів x_1 і x_2 за середніх кількостях лінійних часток $x_{3,4} = 0$, блок (б) описує вплив факторів другої групи x_3 і x_4 за основних рівнів модифікувальних добавок $x_{1,2} = 0$, а блок (с) оцінює синергетичну дію факторів складу з блоків (а) і (б) на матричний матеріал.

Основними показниками моделей, що описують «повні» поля критеріїв, є їхні максимальні та мінімальні рівні (табл. 2). Порівняння показників дозволяє констатувати, що за різної чутливості f_{ctfm} і $K_{D,II}$ до дії рецептурних факторів (відносні перепади склали $\delta_{f_{ctfm}} = 2.33$ і $\delta_{K_{D,II}} = 1.15$) «повні» поля вирізняються дещо різним розташуванням точок екстремумів в областях факторного простору.

Для аналізу функції кожного фактора в формуванні рівнів властивостей поля моделей (табл. 2) у просторі можуть забезпечити опис всіх можливих локальних полів.

На рис. 5 наведено локальні поля структурних параметрів f_{ctfm} і $K_{D,II}$, отриманих в координатах двох груп градієнтних факторів, відповідно, $x_{1,2}$ and $x_{3,4}$.

Одночасно області цих полів трансформуються під впливом фіксованих рівнів змінювальних факторів у межах діапазонів їх варіювання ($-1 \leq x_{3,4} (x_{1,2}) \leq +1$). З метою порівняння локальних полів f_{ctfm} і $K_{D,II}$ за «контрастних» рівнів змінювальних факторів на двох факторних діаграмах наведено по дві поверхні. Зміна властивостей Y у межах області локальних полів визначалась абсолютним приростом (Δ_Y).

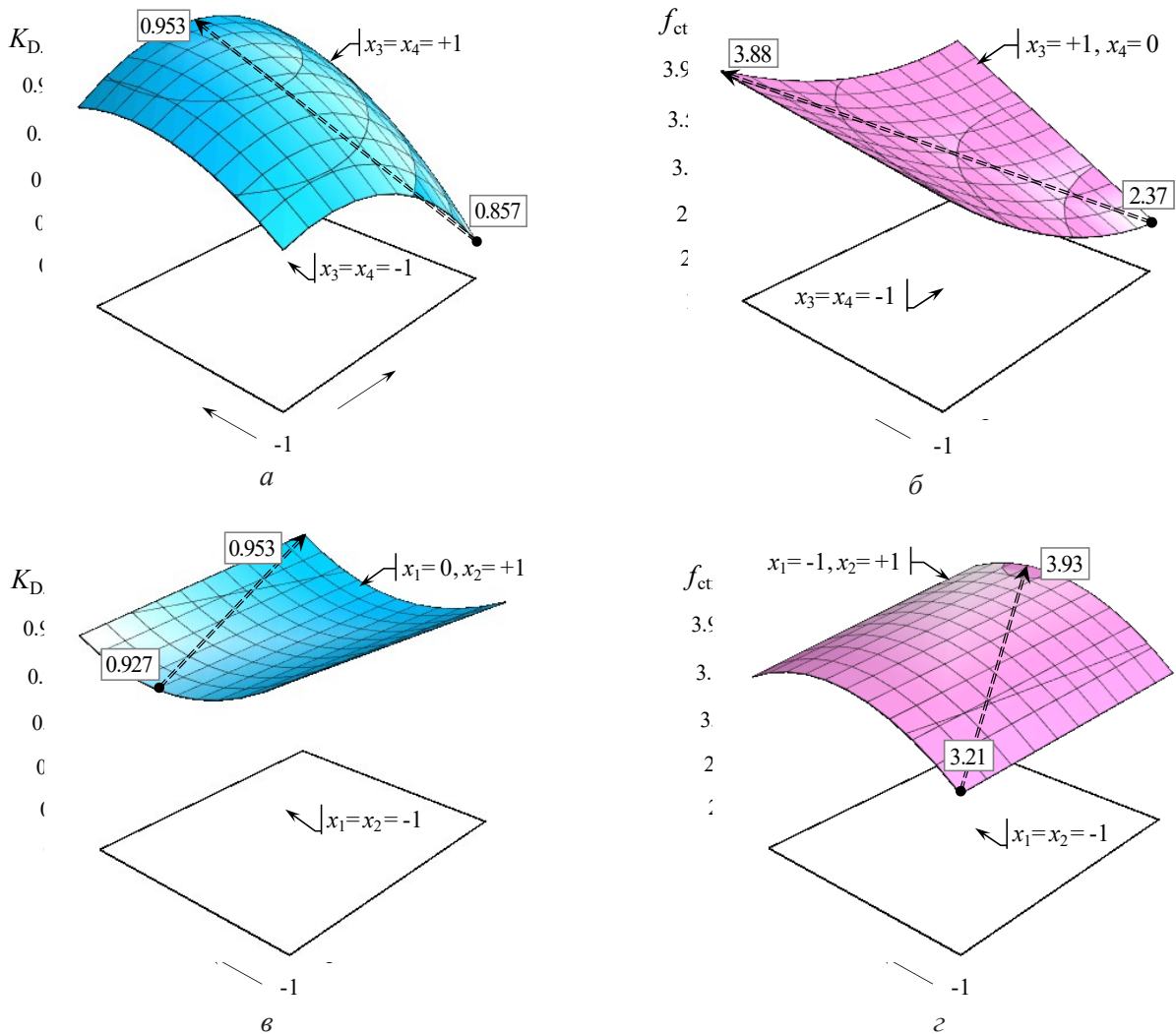


Рис. 5. Локальні поля властивостей цементного каменю при різних кількостях: дискретних волокон $x_{3,4}$ та модифікаторів матриці $x_{1,2}$ для $K_{D,II}$ (а і в) і f_{ctfm} (б і г)

Обговорення результатів моделювання показників мікроструктури бетону

Аналіз результатів моделювання підтверджує доцільність спільного використання органо-мінеральних добавок і дискретних волокон, рис. 5. Зміна дозування домішок і фібри надає змогу керувати пошкодженістю матриці та змінювати тип структурних зв'язків між кластерними агрегатами, що позначається на характеристиках щільності й міцності цементного каменю. Однак для досягнення рівноцінних результатів як за величиною пошкодженості, так і за міцністю на розтягування під час згинання виникає необхідність визначення раціональних дозувань факторів складу й оптимальних значень геометрії дискретних волокон.

Порівняння локальних полів (рис. 5, *a* і *b*) коефіцієнта пошкодженості та міцності гібридно-армованих (верхня поверхня) і неармованих ($x_3 = x_4 = -1$ або $F3 = F12 = 0\%$) складів матеріалу демонструє, що під час армування матриці дискретними волокнами вдається отримати композит з меншою кількістю несущальностей (на 0.7 %) та із суттєво міцнішими зв'язками між структурними агрегатами в об'ємі матеріалу.

Незалежно від рівня пластифікації цементного тіста й наповнення його цеолітом, міцність на розтягування під час згинання матриці, армованої максимальною ($x_3 = +1$) і середньою ($x_4 = 0$) кількостями фібри довжиною 3 і 12 мм, збільшується на 20 %. Це дозволяє стверджувати, що дискретні волокна є активними елементами початкових процесів структуроутворення матеріалу, навколо яких активно групуються частки високодисперсних зерен цементу й цеоліту. Загальновідомо, що на фактичну міцність будівельних композитів великий вплив здійснюють неоднорідність структури, тріщини та інші мікродефекти.

З огляду на розташування в області полів максимальних значень показників суперпластифікатор не лише активно редує В/Ц, збільшуючи середню густину, але й сприяє формуванню оптимальних зв'язків між дискретними складовими матриці. Внаслідок чого підвищується здатність поверхонь розділу кластерних агрегатів до сприйняття внутрішніх напружень і розсіювання об'ємних деформацій.

У цьому випадку спостерігається позитивна функція взаємодії факторів модифікації «цеоліту й суперпластифікатору» на рівнях $x_1 = 0$ і $x_2 = +1$ (або $Z = 4\%$ і $MF = 0.45\%$) в

створенні об'ємно-однорідної капілярно-пористої структури матричного композита (рис. 5, *a* і *b* локальні поля коефіцієнта пошкодженості $K_{D,II}$).

Через максимальну пластифікацію цементної композиції усувається негативний вплив високодисперсних пористих часток цеоліту та отримується структура матриці з меншою величиною пошкодженень, $K_{D,II}$ збільшується на 2.4 % (рис. 5, *a*).

Отже, формується мікроструктура з більшою кількістю структурних зв'язків між дискретними складовими композита та тоншою гомогенною пористістю. Варто зазначити, що технологічні дефекти (тріщини, крупні пори тощо) зменшують кількість контактів між частками матриці, вони є концентраторами внутрішніх напружень та впливають на зниження міцності композитів [19].

Аналіз діаграми $K_{D,II}$ (рис. 5, *b*) підтверджує, що синергетична дія модифікаторів ($x_1 = 0$, $x_2 = +1$) спільно з гібридною фіброю ($x_3 = x_4 = +1$) дозволяє знизити на 8.2 % дефектність структури матричного матеріалу. Однак за умови таких рівнів факторів не забезпечуються «найкращі» контакти матриці з дискретними волокнами.

Згідно з рис. 5, *c* (верхня поверхня), найбільша міцність $f_{ctfm} = 3.93$ МПа досягається на високо-пластифікованому складі без цеоліту з гібридним армуванням цементного каменю фіброю на рівнях $x_3 = +1$ і $x_4 = 0.4$ (вміст волокон довжиною 3 і 12 мм складає 1.02 кг/м³).

Висновки

1. Поліпшити властивості декоративного бетону можна завдяки зміні початкової пошкодженості мікроструктури через цілеспрямоване використання органо-мінеральних добавок і дискретних волокон певної геометрії.

2. Під час статистичного аналізу різних складів цементного каменю було визначено, що наявність лінійних часток покращує однорідність мікроструктури декоративного бетону. Виявлено кореляційні зв'язки середніх показників пошкодженості, визначеної за другим способом, з фізико-механічними властивостями матричного матеріалу. Однак для отримання рівноцінних результатів як за величиною пошкодженості, так і за міцністю на розтягування під час згинання виникає необхідність визначення раціональних дозувань факторів складу та оптимальних значень геометрії дискретних волокон.

3. Дослідженнями підтверджено, що середня густина, міцність на розтягування під час згинання та динамічний модуль пружності мікроструктури бетону значною мірою визначаються пошкодженістю, яка також залежить від початкового водо-цементного співвідношення суміші. Зміна вмісту модифікаторів матриці та фібри надає змогу керувати пошкодженістю та змінювати тип структурних зв'язків між дискретними складовими композита. На основі експериментів визначено, що використання цеоліту замість частини цементу та склофібри в комплексі з полікарбоксилатом сприяє зниженню пошкодженості мікроструктури бетону.

Література

1. ДСТУ Б А.1.1-59-95. Технологія важких бетонів та залізобетонних виробів. Бетонні, розчинні суміші та бетони. Терміни та визначення.
2. Суханов В., Вировой В., Коробко О. Структура матеріалу у структурі конструкції: монографія. Одеса: ОДАБА, 2022. 412 с.
3. Наукові дослідження: основи методології / В. Вировой та ін. Одеса: ОДАБА, 2024. 148 с.
4. Karadumpa C. S., Pancharathi R. K. Influence of Particle Packing Theories on Strength and Microstructure Properties of Composite Cement-Based Mortars. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2021. Vol. 33. Issue 10. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003848](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003848)
5. Balagopal V., Panicker Alekh S., Arathy M.S., Sandeep S., Pillai Sruthi K. Influence of fibers on the mechanical properties of cementitious composites – a review. *Materials Today: Proceedings*. 2022. Vol. 65. Part 2, P. 1846–1850. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.05.023>.
6. Роль дискретної арматури в організації мікроструктури декоративних композитів / О. Д. Довгань та ін. *Сучасне будівництво та архітектура*. 2024. Вип. 10. С. 69–81. <https://doi.org/10.31650/2786-6696-2024-10-69-81>
7. Jiwei Jia, Ali Zaoui, Sekkal W. Impact of polymer binders on the aggregation modes of two-pieces CSH composites. *Cement and Concrete Research*. 2025. Vol. 189. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2024.107779>.
8. Maria C. G. Juenger, Rafat Siddique. Recent advances in understanding the role of supplementary cementitious materials in concrete. *Cement and Concrete Research*. 2015. Vol. 78. 71–80. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.03.018>.
9. Plank J., Sakai E., Miao C.W., Yu C., Hong J. X. Chemical admixtures – Chemistry, applications and their impact on concrete microstructure and durability. *Cement and Concrete Research*. 2015. Vol. 78. Part A. Pp. 81–99. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.05.016>.
10. Metwally Ezzat, Xiaowen Xu, Khadija El Cheikh, Karel Lesage, Richard Hoogenboom, Geert De Schutter. Structure-property relationships for polycarboxylate ether superplasticizers by means of RAFT polymerization. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2019. Vol. 553. Pp. 788–797. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2019.06.088>
11. Nezerka V., Bily P., Hrbek V., Fládr J. Impact of silica fume, fly ash, and metakaolin on the thickness and strength of the ITZ in concrete. *Cement and Concrete Composites*. 2019. 103(3). DOI: [10.1016/j.cemconcomp.2019.05.012](https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.05.012)
12. Kai Wu, Huisheng Shi, Linglin Xu, Guang Ye, Geert De Schutter. Microstructural characterization of ITZ in blended cement concretes and its relation to transport properties. *Cement and Concrete Research*. 2016. Vol. 79. Pp. 243–256. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.09.018>
13. Banthia N., Majdzadeh F., Wu J., Bindiganavile V. Fiber synergy in Hybrid Fiber Reinforced Concrete in flexure and direct shear. *Cement and Concrete Composites*. 2014. Vol. 48. Pp. 91–97. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.10.018>
14. Shahid Manzoor a, S. Ganesh a, Peerzada Danish. Effect on properties of concrete by utilization of metakaolin and marble powder. *Materials Today: Proceedings*. 2022. Vol. 62. Pp. 6689–6694. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.718>.
15. Особливості організації мікроструктури декоративних композитів / О. Д. Довгань та ін. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*. 2024. Вип. 22. С. 43–56. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2024-12\(22\)-05](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2024-12(22)-05)
16. Довгань О. Д., Вировий В. М. Роль фібри в організації структури матеріалу на рівні архітектурних виробів. *Ресурсоекономічні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. 2025. Вип. 47. С. 89–99. <https://doi.org/10.31713/budres.v0i47.10>
17. Dovgan A. D., Vyrovoy V. M., Sukhanova S. V. Physical and mechanical properties of hybrid-reinforced decorative concrete. *IOP Conf. Series: materials Science and Engineering*, SSDCMS 2021. Vol. 1162. doi:10.1088/1757-899X/1162/1/012002.
18. Спосіб визначення пошкодженості бетону: пат. 129391 Україна. Опубл. 09.04.2025.
19. Dovgan A. D., Vyrovoy V. M., Dovgan P. M. Crack resistance of decorative composites. *IOP Conf. Series: materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 708. DOI: 10.1088/1757-899X/708/1/012084.

References

1. DSTU B A.1.1-59-95. Tekhnolohiia vazhkykh beto-niv ta zalizobetonnykh vyrobiv. Betonni, roz-chynni sumishi ta betony. Terminy ta vyznachennia.
2. Sukhanov, V., Vyrovoy, V., Korobko, O. (2022). Struktura materialu u strukturi konstruksii: mono-hrafiia. Odessa: ODABA. 412 s.
3. Vyrovoy, V., Korobko, O., Sukhanova, S., Sukhanov, V. (2024). Naukovi doslidzhennia: osnovy metodolohii. Odessa: ODABA. 148 s.

4. Karadumpa, C. S., Pancharathi, R. K. (2021). Influence of Particle Packing Theories on Strength and Microstructure Properties of Composite Cement-Based Mortars. *Journal of Materials in Civil Engineering*. Vol. 33. Issue 10. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003848](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003848)
5. Balagopal, V., Panicker Alekh, S., Arathy, M. S., Sandeep, S., Pillai Sruthi, K. (2022). Influence of fibers on the mechanical properties of cementitious composites – a review. *Materials Today: Proceedings*. Vol. 65. Part 2. P. 1846–1850. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.05.023>.
6. Dovhan, O. D., Vyrovoy, V. M., Dovhan, P. M., Makarova, S. S. (2024). Rol dyskretnoi armatury v orhanizatsii mikrostruktury dekoratyvnykh kompozytiv. Suchasne budivnytstvo ta arkhitektura. Vyp. 10. S. 69–81. <https://doi.org/10.31650/2786-6696-2024-10-69-81>
7. Jiwei Jia, Ali Zaoui, W. (2025). Sekkal, Impact of polymer binders on the aggregation modes of two-pieces CSH on composites. *Cement and Concrete Research*. Vol. 189. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2024.107779>.
8. Maria, C. G. (2015). Juenger, Rafat Siddique. Recent advances in understanding the role of supplementary cementitious materials in concrete. *Cement and Concrete Research*. Vol. 78. 71–80. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.03.018>.
9. Plank, J., Sakai, E., Miao, C.W., Yu, C., Hong, J. X. (2015). Chemical admixtures – Chemistry, applications and their impact on concrete microstructure and durability. *Cement and Concrete Research*. Vol. 78, Part A. Pp. 81–99. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.05.016>.
10. Metwally, E., Xiaowen, Xu, Khadija, El Cheikh, Karel, L., Hoogenboom, R., Geert De Schutter. (2019). Structure-property relationships for polycarboxylate ether superplasticizers by means of RAFT polymerization. *Journal of Colloid and Interface Science*. Vol. 553. Pp. 788–797. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2019.06.088>.
11. Nezerka, V., Bily, P., Hrbek, V., Fládr, J. (2019). Impact of silica fume, fly ash, and metakaolin on the thickness and strength of the ITZ in concrete. *Cement and Concrete Composites*. 103(3). DOI: [10.1016/j.cemconcomp.2019.05.012](https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.05.012)
12. Kai, Wu, Huisheng, Shi, Linglin, Xu, Guang, Ye, Geert De Schutter. (2016). Microstructural characterization of ITZ in blended cement concretes and its relation to transport properties. *Cement and Concrete Research*. Vol. 79. P. 243–256. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.09.018>.
13. Banthia, N., Majdzadeh, F., Wu, J., Bindiganavile, V. (2014). Fiber synergy in Hybrid Fiber Reinforced Concrete in flexure and direct shear. *Cement and Concrete Composites*. Vol. 48. P. 91–97. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.10.018>
14. Shahid Manzoor a, S. Ganesh a, Peerzada Danish. (2022). Effect on properties of concrete by utilization of metakaolin and marble powder. *Materials Today: Proceedings*. 2022. Vol. 62. Pp. 6689–6694. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.718>.
15. Dovhan, O. D., Vyrovoy, V. M., Liashenko, T. V., Dovhan, P. M. (2024). Osoblyvosti orhanizatsii mikrostruktury dekoratyvnykh kompozytiv. Suchasni tekhnolohii ta metody rozrakhunkiv u budivnytstvi. Vyp. 22. Pp. 43–56. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2024-12\(22\)-05](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2024-12(22)-05)
16. Dovhan, O. D., Vyrovoy, V. M. (2025). Rol fibry v orhanizatsii struktury materialu na rivni arkhitekturnykh vyrobiv. Resursoekonomni materialy, konstruktsii, budivli ta sporudy. Vyp. 47. S. 89–99. <https://doi.org/10.31713/budres.v0i47.10>
17. Dovgan, A. D., Vyrovoy, V. M., Sukhanova, S.V. (2021). Physical and mechanical properties of hybrid-reinforced decorative concrete. *IOP Conf. Series: materials Science and Engineering/ SSD-CMS*. Vol. 1162. doi:10.1088/1757-899X/1162/1/012002.
18. Sposib vyznachennia posh-kodzhenosti betonu: nat. 129391 Ukrainy. Opubl. 09.04.2025.
19. Dovgan, A. D., Vyrovoy, V. M., Dovgan, P. M. (2019). Crack resistance of decorative composites. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 708. DOI: 10.1088/1757-899X/708/1/012084.

Довгань Олександра Дмитрівна, к.т.н., доц., доцент кафедри процесів та апаратів в технології будівельних матеріалів, тел. +38(067)187-53-75, e-mail: aleks.dovhan@gmail.com
ORCID: 0000-0002-6140-3159,
Одеська державна академія будівництва та архітектури, вул. Дідріхсона 4, 65029, м. Одеса, Україна.

Modeling the influence of structural elements on the properties of the microstructure of decorative concrete

Abstract. Problem. *Decorative concretes in products of complex geometric shape react to all the combined influences of environmental factors. The synergistic action of internal and external factors leads to significant deterioration in the structural, mechanical, and aesthetic properties of the material of architectural products. It is known that the microstructure of concrete makes a significant contribution to the formation of the integral structure of products. There is a need to improve the properties of the concrete microstructure in order to ensure durability and operational reliability of the material of decorative elements. In particular, there is a need to obtain reliable structural connections at the interface between discrete components of the composite. The paper presents the results of studies of damage to cement stone. Damage is physically interpreted as the presence of various microdefects (cracks, pores, etc.) scattered in a volume of the composite in the mechanical aspect. Goal.* *The purpose of the study is to*

improve the properties of decorative concrete by directionally changing the initial damage to the microstructure by the targeted use of organo-mineral additives and discrete fibers of certain geometry. **Methodology.** Studies of the properties of 25 compositions of cement stone were carried out using the method of experimental and statistical modeling. The damage to the microstructure of concrete was evaluated in two ways in order to obtain reliable information on structural parameters in the work. For each composition, 4 samples were studied, which were previously tested for ultimate tensile strength at bending. The damage factor is used to quantify the damage. Mathematical models were built on average numerical values of concrete microstructure properties. **Results.** Analysis of statistical estimates of the composition of cement stone showed that the presence of linear particles improves the uniformity of the microstructure of decorative concrete. Correlation relationships of mean damage indices (determined by the second method) with physical and mechanical properties of the matrix material were revealed. However, it becomes necessary to determine rational dosages of recipe factors and optimal values of the geometry of discrete fibers in order to achieve equivalent results, both in terms of damage and tensile strength during bending. Studies have confirmed that the average density, tensile strength during bending, and the dynamic modulus of elasticity of the concrete microstructure are largely determined by the matrix damage. For its part, the amount of damage to the cement stone depends significantly on the initial water-cement ratio of the mixture. Changing

the content of matrix and fiber modifiers allows managing damage and changing the nature of structural connections between discrete components of the composite. **Originality.** Regularities of individual and joint influence of modifiers and discrete fibers on structural and mechanical properties of concrete microstructure are established. Based on the experiments, it was shown that the use of zeolite in exchange for a part of cement and glass fiber, in combination with polycarboxylate, helps to reduce the damage to the concrete microstructure. **Practical value.** The use of the second method to determine the damage to the microstructure of the composite is rational in the study and analysis of physical and mechanical parameters of the integral structure of architectural products. The obtained results on the damage factor will allow us to recommend certain measures to reduce the damage to the concrete microstructure in order to ensure artistic and aesthetic expressiveness, operational reliability, and technical and economic efficiency in architectural products. **Key words:** decorative concrete, microstructure, damage, glass fibre, experimental-statistical model.

Dovgan Alexandra, Ph.D., Assoc. Prof. Department of Processes and Devices in Construction Materials Technology, tel. +38(067)187-53-75, e-mail: aleks.dovhan@gmail.com, ORCID: 0000-0002-6140-3159 Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture, 4, Didrikhson str., Odesa, Ukraine, 65029.