

Довгань О. Д., к.т.н., доцент (Одеська державна академія будівництва та архітектури, м. Одеса, aleks.dovhan@gmail.com)

ПОШКОДЖЕНІСТЬ ДИСПЕРСНО-АРМОВАНИХ ДЕКОРАТИВНИХ КОМПОЗИТІВ

Представлені результати дослідження пошкодженості, отримані при розробці декоративного бетону для архітектурних елементів. Необхідність поглибленого вивчення пошкодженості має вагомим значення для забезпечення довговічності та експлуатаційної надійності матеріалу архітектурних виробів. Дослідження пошкодженості 27-ми різних складів дрібнозернистого композиту проводилися з використанням методу експериментально-статистичного моделювання. Розглянуто питання впливу початкового складу композитів на величину технологічної пошкодженості та стійкості структури декоративних бетонів до розвитку мікродфектів під дією кліматичних навантажень. Експериментально підтверджено – якісний і кількісний склад високодисперсних наповнювачів при різній величині пластифікації сумішей та гранулометрії піску здійснюють вагомий вклад в зниження пошкодженості композиту, що в підсумку надає можливість зберегти художньо-естетичну виразність архітектурним виробам.

Ключові слова: декоративний бетон; пошкодженість; експериментально-статистична модель; дискретні волокна; цеоліт.

Вступ. Під час експлуатації декоративні бетони в архітектурних елементах будинків і споруд піддаються прихованій руйнації від несилового впливу різноманітних зовнішніх факторів. До кліматичних чинників, негативну дію котрих постійно сприймають елементи декору [1; 2], варто віднести різкі коливання температури, вплив вологи, градієнти температури й вологи за перетином виробів, атмосферні гази, морський (сольовий) й наземний (міський) пил тощо. Тож синергетичний вплив цих кліматичних навантажень може призводити до незворотних змін структури бетону і, відповідно, до погіршення декоративно-експлуатаційних характеристик архітектурних деталей. В роботах F. H. Wittmann, B. M. Вирового показано [3–5], що більшість комбінованих навантажень суттєво

пришвидшує розвиток наявних та утворення нових пошкоджень в бетоні. В механічному аспекті пошкодження матеріалу фізично інтерпретують як присутність розсіяних в його об'ємі різних мікроскопічних дефектів (пор, пустот, тріщин, внутрішніх поверхонь розділу тощо), які призводять до зменшення несучої здатності матеріалу виробів чинити опір силовим і/або несиловим навантаженням [6–8]. За думкою Тамуж В. П. та ін. [5–10], мікродефекти з'являються в найбільш слабких і перенапружених місцях структури матеріалу, що є причиною поступового кінцевого його руйнування.

Загально прийнято рівень пошкодження композиційних матеріалів оцінювати за параметром, що називають «індексом» чи «коефіцієнтом» (позначають «DI» чи « K_n ») пошкоженості, величина якого повинна коливатися в межах від 0 до 1. Чим більша величина параметра, тим триваліший термін служби виробів (конструкцій). Для непошкодженого композиту значення параметра відповідає одиниці. Ефективними й практичними для оцінки пошкодження композитів є неруйнівні та руйнівні методи [5; 7; 9; 11]. Більш широкого розповсюдження набули неруйнівні методи (капілярні, акустичні, радіаційні, теплові тощо). Однак не завжди величини їх параметрів вдається точно виміряти чи зафіксувати з деякою розбіжністю від попередніх значень (наприклад, загальну площу тріщин чи їх протяжність на визначеній ділянці поверхні матеріалу, швидкість зародження мікродефектів, зміну динамічного модуля пружності тощо), що здебільшого унеможлиблює їх використання в практичних обчисленнях. Поряд з неруйнівними способами не менш ефективними є руйнівні, за допомогою яких величину пошкодження оцінюють на основі результатів випробувань бетонних зразків на тріщиностійкість, міцність при стиску, розтягу, згині тощо. Варто зауважити, що методи контролю параметра, на мою думку, повинні бути адаптовані під матеріал виробу дослідження.

Для аналізу впливу початкового складу бетону (в період набору механічної міцності його зразків) та факторів навколишнього середовища на структурні характеристики матеріалу виробів (в період їх експлуатації) авторами [12] пропонується нова методика визначення пошкоженості матеріалу за руйнівним способом. Метод передбачає поетапне дослідження зразків за двома характеристиками. На першому етапі бетонні зразки-призми квадратного перерізу випробовуються на міцність на розтяг при згині, на другому етапі за характером поверхні розлому зразків

(відомо, що пошкодження суттєво впливають на характер руйнування матеріалу) розраховується коефіцієнт пошкоженості композиту. Надалі за експериментальними даними параметра будується нелінійна структурована математична модель [13], що описує «повне» поле коефіцієнта пошкоженості бетону в координатах рецептурних факторів його складу.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. Протягом останніх десятиліть вивченням пошкоженості бетону займались В. М. Вировой, D. D. L. Chung, J. Cao, A. M. Brant, F. H. Wittmann та ін. В їх наукових працях [3; 5; 10; 14; 15 та ін.] підкреслюється, що пошкодження, які спричинені синергетичною дією комбінованих навантажень, значно впливають на структурні характеристики композиційних матеріалів. Отже, необхідною оцінкою довговічності та експлуатаційної надійності є моніторинг пошкодження бетону.

Для зменшення початкових мікродефектів (тріщин, пор тощо) в об'ємі структури композиту матеріалознавці рекомендують до складу цементних композитів вводити тонкодисперсні та/або волокнисті наповнювачі. Це обумовлено тим, що вони мають здатність знижувати об'ємні деформації, які виникають в період становлення структури композитного матеріалу та є причинами зародження дефектів.

В ряді робіт В. М. Вирового [5; 16; 17 та ін.] показано, що введення кварцового або карбонатного наповнювачів, раціональних за дисперсністю й кількістю, сприяє зниженню технологічної пошкоженості композицій завдяки зменшенню загальної кількості зародкових тріщин, їх протяжності, уповільненню розвитку тріщин тощо. Водночас E. Özbay, Liu Zihao та ін. виявили, що використання меленого доменного шлаку або золи-виносу оптимальних дозувань дозволяє змінити структуру пор бетону і зменшити об'єм капілярних пор розміром 0.05 мкм. Окрім цього ними встановлено, що міцність на стиск бетону лінійно пов'язана саме з об'ємом пор діаметром більш ніж 0.01 і 0.05 мкм, збільшення котрих в об'ємі структури знижує критерій [18; 19]. Зокрема, в статті Zelic J. та ін. [20] продемонстровано, що заміна в'язучого 15% тонкоподрібненим вапняком і 8% золою виносу дозволяє отримати цементний розчин з оптимальною будовою пористого простору, яка характеризується переривчастою структурою пор. З такою структурою розчин володіє найменшою загальною пористістю і найбільшою міцністю на стиск. Представлені в [21; 22] результати власних досліджень характеристик дисперсно-армованого декоративного композиту

показують, що розвиток і ріст технологічних тріщин може ефективно уповільнюватися дискретними дрібними порами присутніми в об'ємі структури бетону.

Огляд робіт з динаміки розвитку мікродфектів у цементних композитах демонструють, що важливим є якість структури границі розділу між двома контактуючими матеріалами чи фазами. Це обумовлено тим, що міцність зв'язку на межі розділу цих фаз контролює механічну реакцію бетону. Відомо, що напруження передаються від однієї фази до іншої через границю розділу, яка за своєю структурою є відмінною від структури об'ємної матриці композиту, оскільки містить більший об'єм капілярних пор, мікротріщин тощо [23]. Отже, передача напружень між двома контактуючими матеріалами є важливим фактором щодо механічної поведінки композитів, які знаходяться під постійною синергетичною дією навантажень різного походження. В [15; 24] D. D. L. Chung відмічає, що додавання мікрокремнезему до складу будівельного розчину вносить значний вклад у динаміку пошкоджень. Порівняння поведінки двох різних складів розчину (звичайного і з добавкою SiO_2) під впливом деформацій усадки та стиску при багаторазовому силовому навантаженні показало, що мікрокремнезем через менші мікроструктурні зміни матриці на межі розділу і менший розмір дефектів на цій межі знижує пошкодженість матеріалу. Також у працях багатьох авторів [10; 25; 26; 27 та ін.] вказується – дискретні волокна всіх видів зміцнюють цементну матрицю композитів, знижують концентрацію напружень у вершинах тріщин, уповільнюючи у такий спосіб поширення тріщин в слабкій міжфазній перехідній зоні. Однак вплив фібри на динаміку пошкодженості бетону напряму залежить від її механічного закріплення, високого диспергування в об'ємі структури матеріалу, а також прямого контакту моноволокон з цементною матрицею. Водночас відомо, що розподіл пошкоджень в об'ємі композиту, через неоднорідну природу мікроструктури бетону і вплив зовнішніх факторів, зазвичай є анізотропним (дефекти певним чином розподіляються у 3D-просторі [8]), а накопичення мікродфектів здебільшого відбувається у поверхневих шарах матеріалу виробів [3]. З огляду на це, важливо проєктувати склади декоративного бетону зі структурою, яка б могла рівномірно розподіляти напруження в мікродфектах (утворених під час виготовлення виробів) і бути стійкою до розвитку цих (чи появи нових) дефектів під впливом кліматичних навантажень під час експлуатації архітектурних елементів. Отже, вищенаведений аналіз

наукових праць вказує – для отримання декоративного бетону з меншою пошкодженістю доцільно використовувати високодисперсні органо-мінеральні добавки, введення яких дозволить зміцнити міжфазну поверхню розділу матриці та запобігти легкому поширенню в ній мікродфектів. У роботі представлено результати комплексного дослідження пошкодженості декоративних композитів, фізико-механічні властивості яких змінювались під впливом рецептурних факторів складу і комбінованих природних факторів.

Метою роботи є підвищення довговічності та експлуатаційної надійності архітектурних виробів за рахунок зниження пошкодженості декоративних композитів.

Умови експерименту, матеріал і методика досліджень. Дослідження структурних характеристик 27-ми різних складів декоративного композиту проводились за спланованим натурним експериментом [28; 29]. В експерименті варіювались дозування п'яти рецептурних факторів, об'єднаних залежно від характеру дії на композит у дві групи.

В першу групу увійшли фактори *модифікації цементно-піщаної системи*: тонкомелений клиноптилолітовий цеоліт в кількості $X_1 (Z) = 4 \pm 4\%$, доля дрібнозернистого піску (середній діаметр зерен $d = 0.22$ мм) в суміші з крупнозернистим ($d = 0.37$ мм) $X_2 (SG) = 50 \pm 20\%$; суперпластифікатор на полікарбоксилатній основі $X_3 (MF) = 0.5 \pm 0.2\%$. Цеоліт вводився замість частини білого портландцементу, а полікарбоксилат – від маси в'язучої речовини.

Другу групу склали *параметри дисперсного армування*: лугостійкі скляні волокна довжиною 6 і 12 мм, які дозувались за масою розчинної суміші в кількості $X_4 (F6) = X_5 (F12) = 0.015 \pm 0.015\%$, відповідно.

Рецептурні фактори за типовими формулами нормалізовано до $|x_i| \leq 1$ [30]. Зокрема, нижні рівні 3-х факторів відповідають нульовим значенням ($X_1 = X_4 = X_5 = 0$ чи $x_1 = x_4 = x_5 = -1$), що дозволяє оцінити ефективність їх впливу на властивості декоративного бетону.

Фіксованими компонентами дрібнозернистого бетону були вміст цементного в'язучого та заповнювача, при їх співвідношенні 1:3.4 за масою розчинної суміші. Склади сумішей приготувлялися з різним водо-цементним співвідношенням, при якому забезпечувалося виконання вимоги однакової рухомості композицій – марки S4.

Для проведення комплексних досліджень з оцінки впливу рецептурних факторів і кліматичних навантажень на рівень пошкодженості композитів виготовлялось шість зразків-призм квадратного перерізу, з яких три були контрольними, а три – піддавалися висушуванню і зволоженню (загалом виконано 100 циклів). При цьому, зразки висушувались при температурі $50\pm 55^\circ\text{C}$, а надалі насичувались водопровідною питною водою, яка після кожних 5-ти циклів замінювалась на нову. Один цикл виконувався впродовж 10 год (в загальний час 1-го циклу входить 2 год на остигання зразків при кімнатній температурі та вологості). Для оцінки змін структури бетону через кожні 5 циклів додатково контролювались такі параметри, як зміна маси зразків (M , %), швидкості поширення ультразвуку (v , м/с), динамічного модуля пружності (E , ГПа). Відповідно до ДСТУ Б.В.2.7-226:2009 для вимірювання часу (t , мкс) поширення ультразвуку при різній частоті застосовувався прилад УК-14ПМ. Способом наскрізного прозвучування зразків-балочок виконувалось по 6 вимірювань часу.

В свою чергу, дослідження пошкодженості 27-ми різних за складом декоративних бетонів передбачає: випробування зразків-призм в сухому стані (висушувались протягом 24 год) на міцність на розтяг при згині (f_{ctfm} , МПа) відповідно до ДСТУ Б В.2.7-239:2010, сканування половинок розламаних зразків, отримання цифрових 3D-моделей зламаних зразків, визначення площі поверхні розлому (S_p) та площі основи (S_o) досліджуваних зразків. Як критерій прийнято коефіцієнт пошкодженості K_{Π} , який обчислюється за формулою (1):

$$K_{\Pi} = \frac{S_o}{S_p}. \quad (1)$$

Варто відмітити, що з кожного зразка відбиралась лише одна його половина для сканування, а друга – піддавалась випробуванню на міцність при стиску (f_{cm} , МПа). Після дослідження зразків композиту на f_{ctfm} , визначалась також глибина карбонізації (δ , мм) матеріалу контрольних зразків та тих зразків, що піддавалися циклічному навантаженню зовнішнього впливу вологи й температури.

Пошкодженість композиту: натурні дані, взаємозв'язок з характеристиками. Аналіз отриманих результатів показав, що наповнення структур декоративного бетону різноманітними за формою і розміром дискретними мінеральними частками здійснює вагомий вплив на його початкову пошкодженість (чисельні значення

K_p змінювались в межах 10%). З поміж 27-ми різних складів матеріалу найменшою технологічною пошкодженістю (таблиця) володіє композит #2 з $V/C = 0.4$, а найбільшою – склад #15 з $V/C = 0.527$ та $K_p = 0.904$. Тут необхідно зазначити, що структура бетону #15 є гібридно-армована фіброю різної довжини ($F6 + F12 = 0.06\%$), вміст якої у 2 рази вищий порівняно зі складом #2 ($F12 = 0.03\%$). Втім всупереч більшій початковій пошкодженості цього композиту, він володіє підвищеними показниками міцності відносно контрольного складу #16 ($x_1 \div x_5 = -1$).

Таблиця

Склади 4-х із 27-ми видів декоративного бетону з max й min величинами K_p

Номер складу	Натурні значення					Нормалізовані перемінні				
	$X_1 (Z)$	$X_2 (SG)$	$X_3 (MF)$	$X_4 (F6)$	$X_5 (F12)$	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
<i>Контрольні склади композиту</i>										
#2	8	70	0.7	0	0.03	+1	+1	+1	-1	+1
#15	0	30	0.3	0.03	0.03	-1	-1	-1	+1	+1
<i>Склади композиту, що пройшли випробування на вологостійкість</i>										
#1	8	70	0.7	0.03	0	+1	+1	+1	+1	-1
#4	8	70	0.3	0	0	+1	+1	-1	-1	-1

Водночас аналіз характеристик декоративних бетонів, які піддавались прискореному руйнуванню в умовах малоциклової зміни волого-температурних деформацій показав, що найменшою величиною пошкодженості ($K_p = 0.953$) характеризується армований дискретним волокном $F6$ склад #1 з $V/C = 0.40$, а найбільшою, відповідно, неармований фіброю композит #4 з $V/C = 0.533$ та $K_p = 0.810$ (табл. 1). Отримані дані за коефіцієнтом пошкодженості K_p для цих бетонів добре узгоджуються з величинами зміни маси їх зразків після 100 циклів втомного руйнування та міцності на розтяг при згині f_{ctfm} порівняно з контрольними зразками матеріалу. Спостерігається, що при зменшенні маси зразків композиту #1 на 0.72% f_{ctfm} не змінилась, а при втраті маси зразків складу #4 на 3.1% f_{ctfm} знизилась на 35%. Як відомо, розвиток й утворення мікрodefektів у структурі матеріалу під впливом циклових навантажень супроводжується зниженням швидкості поширення ультразвуку v і динамічного модуля пружності E . На рис. 1 для наочності, на прикладі двох вищезазначених композитів, представлені кінетичні криві зміни значень критеріїв v і E .

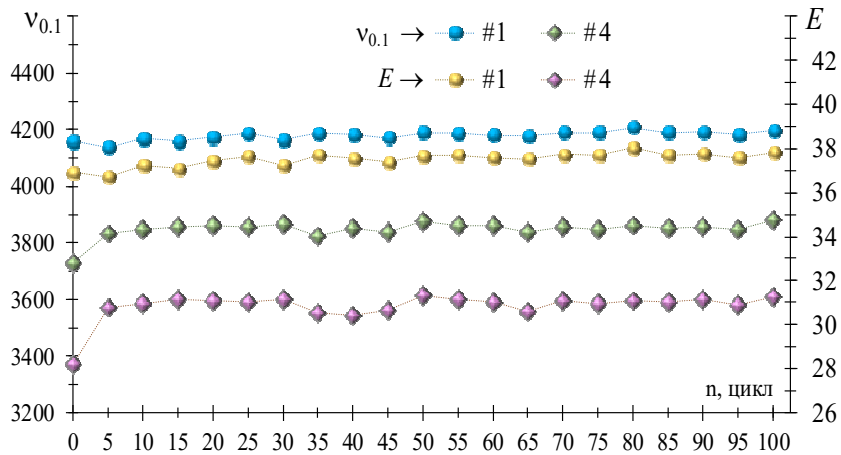


Рис. 1. Кінетика швидкості поширення ультразвуку при частоті перетворювачів 0.1 ($v_{0.1}$, м/с) і динамічного модуля пружності (E , ГПа) композитів різного складу

З ходу кривих видно, що нарощування деформацій починає поступово проявлятися з 35 циклів, особливо це помітно на бетонних зразках складу #4. Однак попри прояв інтенсивних деформаційних процесів у структурі композитів зниження величин критеріїв v та E в кінці досліджень не спостерігається. Хоча пошкодженість бетону #4 по відношенню до початкової ($K_n = 0.933$) зростає на 13.2%.

Аналіз екстремальних величин коефіцієнта пошкодженості спонукає до думки, що декоративні бетони з початково низькими значеннями В/Ц співвідношення суміші характеризуються дещо меншим об'ємом мікродфектів у своїй структурі. Це зобов'язує розглянути вплив В/Ц на рівень K_n та f_{ctfm} для 27-ми видів композиту. Обробка натурних даних показала повну відсутність зв'язку В/Ц з коефіцієнтом технологічної пошкодженості та контрольною міцністю на розтяг при згині ($r = 0$). Проте починає простежуватись залежність експлуатаційної (втомної) пошкодженості й міцності матеріалу від В/Ц сумішей, коефіцієнт кореляції між критеріями складу $r\{В/Ц: K_n\} = -0.50$ і $r\{В/Ц: f_{ctfm}\} = -0.89$, відповідно. Отже, стійкість мікроструктури перехідної зони композитів до розвитку мікродфектів під впливом кліматичних навантажень певною мірою залежить від величини В/Ц.

Для розрахунку ступеня взаємозв'язку фізико-механічних характеристик з коефіцієнтом K_n , визначення чисельних значень всіх параметрів послідовно проводилось на зразках з фіксованим

номером для певного виду бетону. Окрім з K_p , розглянуто співзалежність між властивостями. Виявлено досить тісний зв'язок між модулем пружності E , швидкістю поширення ультразвуку v , середньою густиною ρ та міцністю f_{ctfm} композитів, випробуваних на вологостійкість. Кореляція поміж цими критеріями складала більше ≥ 0.85 . Також, попри доволі низький лінійний зв'язок між f_{ctfm} і K_p ($r = 0.39$), встановлено співвідношення критеріїв вологостійкості K_w , карбонізації δ та швидкості v з рівнем K_p бетону. Втім з діаграм рис. 2, а видно, що залежність фізичних величин від рівня пошкодженості матеріалу є не достатньо високою. З метою підтвердження факту співзалежності між цими параметрами за більш надійними значеннями коефіцієнта кореляції r , втомну пошкодженість визначено повторно, але через модуль пружності за формулою (2) [10; 31–33].

$$D = 1 - \frac{\bar{E}}{E}, \quad (2)$$

де \bar{E} – модуль пружності після 100 циклів зволоження і висушування зразків, ГПа; E – модуль пружності контрольних зразків бетону, ГПа. Отримані дані параметра D теж співвіднесено з величинами характеристик бетону (рис. 2, б). Статистична обробка результатів критеріїв дозволила встановити пряму залежність міцності на згин f_{ctfm} від D . При цьому помічається, що під час комбінованих впливів зовнішніх волого-температурних навантажень пришвидшується розвиток наявних мікродфектів ($-0.14 \leq D < 0$), збільшується глибина карбонізації δ поверхневого шару матеріалу архітектурних виробів, в результаті чого погіршуються його функціональні властивості (f_{ctfm} , K_w , ρ_c тощо).

Таким чином, опираючись на отриману інформацію з аналізу натурних даних K_p й D , доцільно оцінити вклад кожного рецептурного фактору в зниження пошкодженості декоративного бетону на певному етапі його дослідження.

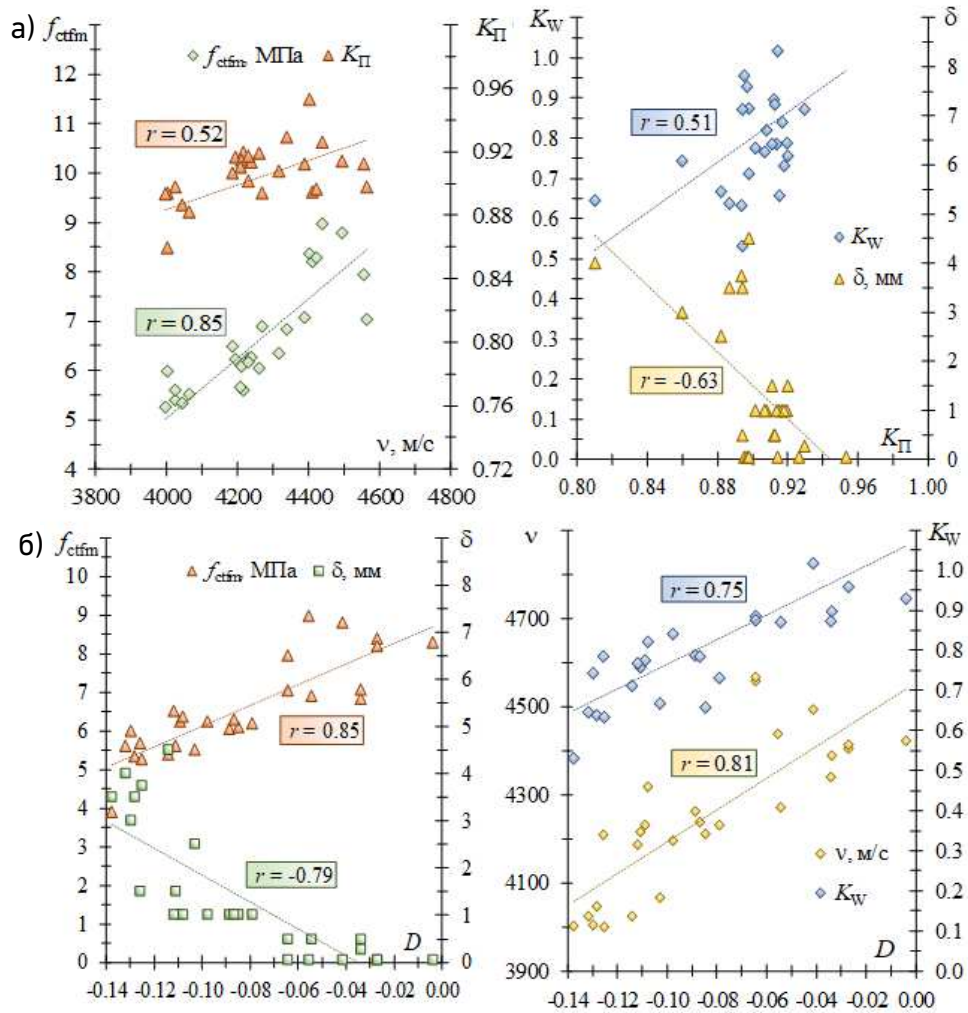


Рис. 2. Співвідношення експлуатаційних характеристик з пошкодженістю бетону: а) K_{II} визначено за розробленою методикою [12]; б) D розраховано за методикою, наведеною в [31–33]

Моделювання результатів натурального експерименту. За даними критеріїв пошкодженості (технологічної й експлуатаційної), отриманих в спланованому експерименті, побудовано дві нелінійні

$$Y = b_0 \left[\begin{array}{l} + b_1x_1 + b_{11}x_1^2 + b_{12}x_1x_2 \\ + b_2x_2 + b_{22}x_2^2 + b_{13}x_1x_3 \\ + b_3x_3 + b_{33}x_3^2 + b_{23}x_2x_3 \end{array} \right] \text{ (a)} \left[\begin{array}{l} + b_{14}x_1x_4 + b_{15}x_1x_5 \\ + b_{24}x_2x_4 + b_{25}x_2x_5 \\ + b_{34}x_3x_4 + b_{35}x_3x_5 \end{array} \right] \text{ (c)} \left[\begin{array}{l} + b_4x_4 + b_{44}x_4^2 + b_{45}x_4x_5 \\ + b_5x_5 + b_{55}x_5^2 \end{array} \right] \text{ (b)} \quad (3)$$

квадратичні моделі виду (3). В моделях для двох груп факторів (x_i представлені як безрозмірні перемінні) виділено три блоки. Блок (а) містить ефекти модифікаторів $x_1 \div x_3$ при середніх дозуваннях фібри $x_{4,5} = 0$, блок (б) описує вплив дискретних волокон x_4 і x_5 при основних рівнях факторів модифікації $x_{1,2,3} = 0$, а блок (с) оцінює синергетичну дію факторів складу з блоків (а) і (б) на цементно-піщану систему. Відповідно, коефіцієнт b_0 дорівнює значенню Y в центрі експерименту при $x_i = 0$.

В роботі наочно приведена експериментально-статистична модель (ЕС-модель) (4) для експлуатаційної пошкодженості декоративного композиту. ЕС-модель описує «повне» поле коефіцієнта K_p в координатах 5-ти рецептурних факторів з 16 значимими коефіцієнтами (середньоквадратична помилка експерименту для параметра склала $s_e = 0.007$). Максимальний рівень поля дорівнює 0.955 при рівнях $x_1 = x_2 = x_3 = x_4 = x_5 = +1$. Мінімальне значення відповідає 0.812 при $x_1 = x_2 = +1$, $x_3 = x_4 = x_5 = -1$. Аналогічна модель отримана для технологічного K_p .

$$K_p = 0.909 \left[\begin{array}{l} - 0.003 x_1 \pm 0 x_1^2 + 0.005 x_1x_2 \\ - 0.003 x_2 \pm 0 x_2^2 + 0.008 x_1x_3 \\ + 0.015 x_3 - 0.010 x_3^2 + 0.017 x_2x_3 \end{array} \right] \text{ (a)} \left[\begin{array}{l} + 0.005 x_1x_4 + 0.008 x_1x_5 \\ + 0.007 x_2x_4 + 0.003 x_2x_5 \\ - 0.007 x_3x_4 - 0.006 x_3x_5 \end{array} \right] \text{ (c)} \left[\begin{array}{l} + 0.008 x_4 \pm 0 x_4^2 - 0.003 x_4x_5 \\ \pm 0 x_5 \pm 0 x_5^2 \end{array} \right] \text{ (b)} \quad (4)$$

Для аналізу математичних моделей коефіцієнтів K_p технологічної й експлуатаційної пошкодженості композиту побудовано дві діаграми «куби на квадраті» (рис. 3). Трифакторні діаграми в координатах градієнтних факторів модифікації системи $\{Z,$

SG, MF розташовані у вершині й центрі квадрату, осями якого служать рівні дискретних волокон $\{F6, F12\}$.

Результати двох пар діаграм (рис. 3, а і б) дозволяють відмітити наступне.

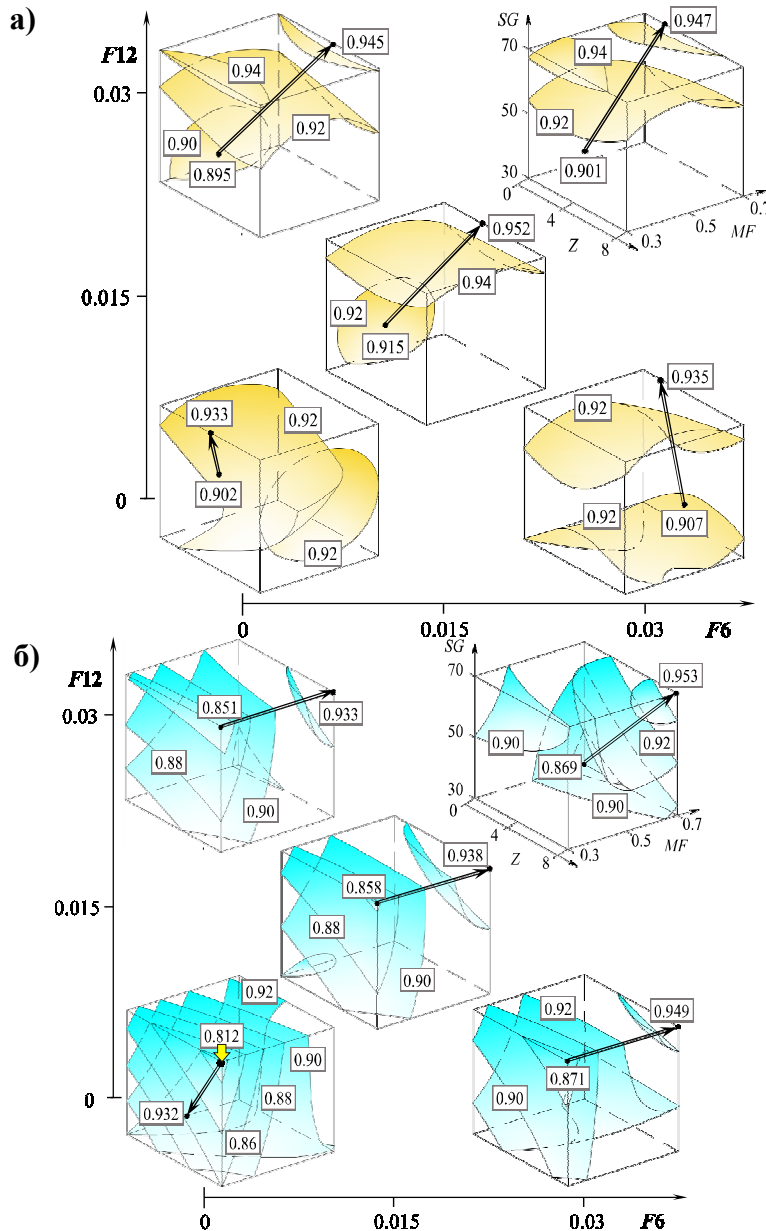


Рис. 3. Зміна величини коефіцієнта K_p технологічної (а) та експлуатаційної (б) пошкодженості декоративних композитів у координатах 5-ти композиційних факторів

Введення до початкового складу композицій дискретних моноволокон різної довжини дозволяє підвищити надійність функціональних характеристик матеріалу в архітектурних виробках. Присутність склофібри, зокрема, гібридної сприяє контролю зародження й розповсюдження мікродфектів у структурі композитів у технологічний та експлуатаційний період їх життя. Як показано в [22], подібні результати досліджень попередньо отримано при випробуванні декоративних бетонів на тріщиностійкість. Найменшою величиною пошкодженості володіють гібридно-армовані склади матеріалу з коефіцієнтом $K_{п.маx} \Rightarrow 0.952$, рис. 3, а (куб в центрі) та 0.953, рис. 3, б (куб верхній справа). Наразі встановлено – для отримання найменш пошкоджених композитів недостатньо виготовляти їх лише з початково-низьким водоцементним співвідношенням (при рівні $MF \geq 0.5\%$). Для зміцнення структури міжфазної перехідної зони матриці, яка за даними фахівців є найбільш слабкою навколо волокон й зерен заповнювача, необхідно частково цементне в'язуче замінювати тонкодисперсним цеолітом в кількості щонайменше 3%. Позитивний вплив клиноптилолітової добавки на зниження пошкодженості скоріш за все пов'язаний з її пуцолановою природою. Взаємодія активних оксидів SiO_2 і Al_2O_3 цеоліту з портландитом цементу ймовірно дозволяє ущільнити перехідну область матриці. Внаслідок чого, мікродфекти на границі розділу є дещо меншими за розміром, ніж в зоні контакту зерен піску й цементу. Об'єктивність такого ствердження підтверджується результатами власних досліджень [21], а також М. Nas і Ş. Kurbetci в статті [34]. Однак загалом, зважаючи на високо пористу структуру цеоліту (об'єм пор складає 54%) і з метою підвищення коефіцієнта використання міцності скляних волокон (для кращого заанкерування їх між зернами дрібного й крупного пісків) [35], слід збільшувати рівень пластифікації композицій (рис. 3, б, куби верхній лівій, центральний і нижній правий). За цих умов стійкість структури матеріалу до розвитку мікродфектів під впливом кліматичних навантажень зростає не менш ніж на 9%.

В зниженні пошкодженості декоративних бетонів важливу роль, як видно з рис. 3, відіграє гранулометричний склад піщаного заповнювача. В більшості випадків область максимальних значень критерію $K_{п}$ досягається на високо пластифікованих складах матеріалу ($MF = 0.7\%$) з більшим вмістом дрібнозернистого піску ($SG =$

70 м.ч. або $x_2 = +1$). При такій гранулометрії заповнювача дискретні високомодульні волокна краще укладаються між дрібними зернами піску, збільшуючи тим самим енергію руйнування композитів. Порівняння поведінки неармованих складів (при $F_6 = F_{12} = 0\%$) матеріалу показало, що попри збільшення В/Ц приблизно на 18% при зміні екстремальних значень коефіцієнта K_p від 0.902 до 0.933 (рис. 3, а, куб нижній зліва), технологічна пошкодженість зменшується на 3.4%, а міцність при згині f_{ctfm} зростає на 14%. Втім початковий вклад факторів модифікації цементно-піщаної системи в забезпечення стабільності структурних параметрів під впливом малоциклових волого-температурних деформацій (рис. 3, б, куб нижній зліва) істотно змінюється. При первинній величині параметра K_p в 0.933 композиту складу в точці, що відмічена стрілкою на діаграмі, пошкодженість зростає на 12.7%, а f_{ctfm} знижується на 40%. Тож, можна стверджувати, що стійкість структури матеріалу до розвитку мікродфектів під час експлуатації виробів першочергово визначається В/Ц співвідношенням композицій.

Висновки. Необхідність поглибленого вивчення пошкодженості має вагоме значення для забезпечення довговічності та експлуатаційної надійності матеріалу архітектурних виробів. Експериментально підтверджено – якісний і кількісний склад високодисперсних наповнювачів, при різній величині пластифікації сумішей та гранулометрії піску, здійснюють вагомий вклад в зниження пошкодженості декоративного бетону, що в підсумку надасть змогу зберегти художньо-естетичну виразність архітектурним виробам. Дослідження інтегральних показників пошкодженості спільно з фізико-механічними властивостями дрібнозернистих композитів дозволять передбачати термін служби виробів. Отримані дані по величині коефіцієнта пошкодженості будуть корисні при багатокритеріальній оптимізації складів декоративного бетону.

1. Architectural Precast Concrete / PCI Architectural Precast Concrete Manual Committee / Sidney Freedman Editor et al. Third Edition. 2007. 588 p.
2. Довгань О. Д., Вировой В. М. Умови експлуатації енергоефективних декоративних матеріалів і виробів. *Сучасні проблеми енергозбереження в будівництві, містобудуванні та житлово-комунальному господарстві* : матеріали Всеукраїн. наук.-практ. конференції. Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2020. С. 7–9.
3. Wittmann F. H., Zhang P., Zhao T. Damage of Concrete under Combined Actions. *Restoration of Buildings and Monuments*

Bauinstandsetzen und Baudenkmalpflege. 2011. Vol. 17, No. 5. P. 321–330. **4.** Jiang F., Wan X., Wittmann F.H., Zhao T. Influence of Combined Actions on Durability of Reinforced Concrete Structures. *Restoration of Buildings and Monuments Bauinstandsetzen und Baudenkmalpflege*. 2011. Vol. 17, No. 5. P. 289–298. **5.** Суханов В. Г., Выровой В. Н., Коробко О. А. Структура материала в структуре конструкции : монография. Одесса : «Полиграф», 2016. 244 с. **6.** Lemaitre J., Desmorat R. Engineering Damage Mechanics: Ductile, Creep, Fatigue and Brittle Failures (Springer Berlin, Heidelberg). 2005. 380 p. **7.** Daniel I. M., Wooh S. C., & Lee J. W. Defect and Damage Characterization in Composite Materials. *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*. 1987. Vol. 6 A. Pp. 1195–1202. **8.** Khoroshun L. P., Nazarenko L. V. Deformation and Damage of Composites with Anisotropic Components (Review). *International Applied Mechanics*. July, 2013. Vol. 49, No. 4. P. 387–455. **9.** Тамуж В. П., Куксенко В. С. Микромеханика разрушения полимерных материалов. Рига : Зинатне, 1978. 294 с. **10.** Andrzej M. Brant Cement-based composites: materials, mechanical properties, and performance. Taylor & Francis, London and New York, 2009. **11.** Vui V. Cao, Hamid R. Ronagh. A model for damage analysis of concrete. *Advances in Concrete Construction*. 2013. Vol. 1, No. 2. Pp. 187–200. **12.** Довгань О. Д., Хлицов М. В., Вировой М. В., Довгань П. М. Експериментальні дослідження в навчальному процесі. *Управління якістю підготовки фахівців : матеріали XXVII міжнародної науково-методичної конференції*. Одеса : ОДАБА, 2022. Ч-2. С. 33–34. **13.** Вознесенский В., Ляшенко Т. ЭС-модели в компьютерном материаловедении. *Материалы к 45-му международному семинару по моделированию и оптимизации композитов*. Одесса : «Астропринт», 2006. 115 с. **14.** Cao J., Chung D. D. L. Defect dynamics and damage of concrete under repeated compression, studied by electrical resistance measurement. *Cement and Concrete Research*. 2001. Vol. 31. Pp. 1639–1642. **15.** Cao J., Chung D. D. L. Defect dynamics and damage of cement mortar under repeated loading, studied by electrical resistance measurement. *Cement and Concrete Research*. 2002. Vol. 32. Pp. 379–385. **16.** Дорофеев В. С., Выровой В. Н. Технологическая поврежденность строительных материалов и конструкций. Одесса : Город мастеров, 1998. 168 с. **17.** Ткачук А. М., Лисенко В. А., Выровой В. Н., Сильченко С. В. Трещиностойкость цементного камня с наполнителями. *Вісник ОДАБА*. 2004. Вип. 15. С. 296–301. **18.** Özbay E., Erdemir M., Durmus H. I. Utilization and efficiency of ground granulated blast furnace slag on concrete properties – A review. *Construction Building Materials*. 2016. Vol. 105. Pp. 423–434. **19.** Liu Z., Takasu K., Suyama H., Koyamada H., Liu S., Hao Q. The Effect of Cementitious Materials on the Engineering Properties and Pore Structure of Concrete with Recycled Fine Aggregate. *Materials*. 2023. Vol. 16, Issue 1. P. 305. **20.** Zelic J., Krstulovic R., Tkalcec E., Krolo P. Properties of Portland cement-limestone-silica fume mortars. *Cement and Concrete Research*. 2000. Vol. 30 (1). Pp. 145–152.

21. Довгань О. Д., Вировий В. М., Довгань П. М. Водопоглинання, як функція складів декоративних бетонів. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. 2020. Вип. 38. С. 148–160. **22.** Dovgan A. D., Vyrovoy V. M., Dovgan P. M. Crack resistance of decorative composites. *IOP Conf. Ser. Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 708. **23.** P. Kumar Mehta, Paulo J. M. Monteiro. *Concrete: Microstructure, Properties and Materials* / Department of Civil and Environmental Engineering University of California at Berkeley (The McGraw-Hill Companies). 2006. **24.** Chung D. D. L. Damage evolution in cement-based materials, studied by electrical resistance measurements. *ATEM'03, JSME-MMD*, Sep. 10–12, 2003. **25.** Page C. L., Page M. M. *Durability of concrete and cement composites*. Woodhead Publishing Limited, 2007. **26.** Рамачандран Р., Фельдман Р., Бодуэн Дж. Наука о бетоне: физико-химическое бетоноведение / пер. с англ. Т. И. Розенберг, Ю. Б. Ратиновой. М. : Стройиздат, 1986. 278 с. **27.** Afroughsabet Vahid, Biolzi Luigi, Ozbakkaloglu Togay. High-performance fiber-reinforced concrete: a review. *Journal of Materials Science*. 2016. Vol. 51. Pp. 1–35. **28.** Довгань П. М., Довгань А. Д., Ляшенко Т. В., Хлыцов Н. В. Планирование эксперимента в исследовании декоративных песчаных бетонов. *Структуроутворення, міцність та руйнування композиційних будівельних матеріалів і конструкцій* : зб. тез доп. Міжнар. конф. Одеса : ОДАБА, 2018. С. 27–30. **29.** Lyashenko T. V., Dovgan A. D., Dovgan P. M. Decorative concrete with hybrid glass fibre: design and first results of the experiment. *Bulletin of Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture*. Odessa, 2018, Vol. 70. Pp. 99–105. **30.** Ляшенко Т. В., Вознесенский В. А. Методология рецептурно-технологических полей в компьютерном строительном материаловедении. Одесса : Астропринт, 2017. 168 с. **31.** Lemaitre J. L. Continuum Damage Mechanics. Part I. *General Concepts. Journal of Applied Mechanics*. 1988. Vol. 55. Pp. 59–64. **32.** Nie S. A Micromechanical Study of the Damage Mechanics of Acrylic Particulate Composites under Thermomechanical Loading : PhD Thesis / The State University of New York at Buffalo. 2005. 372 p. **33.** Mao H., Mahadevan S. Fatigue damage modelling of composite materials. *Composite Structures*. 2002. Vol. 58. Pp. 405–410. **34.** Memduh Nas, Şirin Kurbetci. Mechanical, durability and microstructure properties of concrete containing natural zeolite. *Computers and Concrete*. 2018. Vol. 22, No. 5. **35.** Lyashenko T. V., Dovgan A. D., Dovgan P. M. Fibre-reinforced decorative composite: the effects of composition on the strength. *Вісник ОДАБА*. 2018. Вип. 73. С. 89–97.

REFERENCES:

1. Architectural Precast Concrete / PCI Architectural Precast Concrete Manual Committee / Sidney Freedman Editor et al. Third Edition. 2007. 588 p.
2. Dovhan O. D., Vyrovoy V. M. Umovy ekspluatatsii enerhoefektyvnykh dekoratyvnykh materialiv i vyrobiv. *Suchasni problemy enerhozberezhennia v*

budivnytstvi, mistobuduvanni ta zhytlovo-komunalnomu hospodarstvi : materialy Vseukrain. nauk.-prakt. konferentsii. Zaporizhzhia : NU «Zaporizka politekhnikha», 2020. S. 7–9. **3.** Wittmann F. H., Zhang P., Zhao T. Damage of Concrete under Combined Actions. *Restoration of Buildings and Monuments Bauinstandsetzen und Baudenkmalpflege*. 2011. Vol. 17, No. 5. P. 321–330. **4.** Jiang F., Wan X., Wittmann F.H., Zhao T. Influence of Combined Actions on Durability of Reinforced Concrete: Structures. *Restoration of Buildings and Monuments Bauinstandsetzen und Baudenkmalpflege*. 2011. Vol. 17, No. 5. P. 289–298. **5.** Suhanov V. G., Vyirovoy V. N., Korobko O. A. Struktura materiala v strukture konstruktzii : monografiya. Odessa : «Poligraf», 2016. 244 s. **6.** Lemaitre J., Desmorat R. Engineering Damage Mechanics: Ductile, Creep, Fatigue and Brittle Failures (Springer Berlin, Heidelberg). 2005. 380 p. **7.** Daniel I. M., Wooh S. C., & Lee J. W. Defect and Damage Characterization in Composite Materials. *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*. 1987. Vol. 6 A. Pp. 1195–1202. **8.** Khoroshun L. P., Nazarenko L. V. Deformation and Damage of Composites with Anisotropic Components (Review). *International Applied Mechanics*. July, 2013. Vol. 49, No. 4. P. 387–455. **9.** Tamuj V. P., Kuksenko V. S. Mikromehanika razrusheniya polimernyih materialov. Riga : Zinatne, 1978. 294 s. **10.** Andrzej M. Brant Cement-based composites: materials, mechanical properties, and performance. Taylor & Francis, London and New York, 2009. **11.** Vui V. Cao, Hamid R. Ronagh. A model for damage analysis of concrete. *Advances in Concrete Construction*. 2013. Vol. 1, No. 2. Pp. 187–200. **12.** Dovhan O. D., Khlytsov M. V., Vyrovoy M. V., Dovhan P. M. Eksperymentalni doslidzhennia v navchalnomu protsesi. *Upravlinnia yakistiu pidhotovky fakhivtsiv* : materialy KhKhVII mizhnarodnoi naukovo-metodychnoi konferentsii. Odesa : ODABA, 2022. Ch-2. S. 33–34. **13.** Voznesenskiy V., Lyashenko T. ES-modeli v kompyuternom materialovedenii. *Materialyi k 45-mu mejdunarodnomu seminaru po modelirovaniyu i optimizatsii kompozitov*. Odessa : «Astroprint», 2006. 115 s. **14.** Cao J., Chung D. D. L. Defect dynamics and damage of concrete under repeated compression, studied by electrical resistance measurement. *Cement and Concrete Research*. 2001. Vol. 31. Pp. 1639–1642. **15.** Cao J., Chung D. D. L. Defect dynamics and damage of cement mortar under repeated loading, studied by electrical resistance measurement. *Cement and Concrete Research*. 2002. Vol. 32. Pp. 379–385. **16.** Dorofeev V. S., Vyirovoy V. N. Tehnologicheskaya povrejdennost stroitelnyih materialov i konstruktiiy. Odessa : Gorod masterov, 1998. 168 s. **17.** Tkachuk A. M., Lisenko V. A., Vyirovoy V. N., Silchenko S. V. Treschinostoykost tsementnogo kamnya s napolnitelyami. *Visnik ODABA*. 2004. Vip. 15. S. 296–301. **18.** Özbay E., Erdemir M., Durmus H. I. Utilization and efficiency of ground granulated blast furnace slag on concrete properties – A review. *Construction Building Materials*. 2016. Vol. 105. Pp. 423–434. **19.** Liu Z., Takasu K., Suyama H., Koyamada H., Liu S., Hao Q. The Effect of Cementitious Materials on the Engineering Properties and Pore Structure of Concrete with Recycled Fine Aggregate. *Materials*. 2023.

Vol. 16, Issue 1. P. 305. **20.** Zelic J., Krstulovic R., Tkalcec E., Krolo P. Properties of Portland cement-limestone-silica fume mortars. *Cement and Concrete Research*. 2000. Vol. 30 (1). Pp. 145–152. **21.** Dovhan O. D., Vyrovyi V. M., Dovhan P. M. Vodopohlynannia, yak funktsiia skladiv dekoratyvnykh betoniv. *Resursoekonomni materialy, konstruksii, budivli ta sporudy*. 2020. Vyp. 38. S. 148–160. **22.** Dovgan A. D., Vyrovoy V. M., Dovgan P. M. Crack resistance of decorative composites. *IOP Conf. Ser. Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 708. **23.** P. Kumar Mehta, Paulo J. M. Monteiro. Concrete: Microstructure, Properties and Materials / Department of Civil and Environmental Engineering University of California at Berkeley (The McGraw-Hill Companies). 2006. **24.** Chung D. D. L. Damage evolution in cement-based materials, studied by electrical resistance measurements. *ATEM'03, JSME-MMD*, Sep. 10–12, 2003. **25.** Page C. L., Page M. M. Durability of concrete and cement composites. Woodhead Publishing Limited, 2007. **26.** Ramachandran R., Feldman R., Boduen Dj. Nauka o betone: fiziko-himicheskoe betonovedenie / per. s angl. T. I. Rozenberg, YU. B. Ratinovoy. M. : Stroyizdat, 1986. 278 s. **27.** Afroughsabet Vahid, Biolzi Luigi, Ozbakkaloglu Togay. High-performance fiber-reinforced concrete: a review. *Journal of Materials Science*. 2016. Vol. 51. Pp. 1–35. **28.** Dovgan P. M., Dovgan A. D., Lyashenko T. V., Hlyitsov N. V. Planirovanie eksperimenta v issledovanii dekorativnykh peschanykh betonov. *Strukturoutvorennia, mitsnist ta ruinuvannia kompozytsiinykh budivelnykh materialiv i konstruksii* : zb. tez dop. Mizhnar. konf. Odesa : ODABA, 2018. S. 27–30. **29.** Lyashenko T. V., Dovgan A. D., Dovgan P. M. Decorative concrete with hybrid glass fibre: design and first results of the experiment. *Bulletin of Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture*. Odessa, 2018, Vol. 70. Pp. 99–105. **30.** Liashenko T. V., Voznesenskyi V. A. Metodolohyia retsepturno-tekhnolohycheskykh polei v kompiuternom stroytelnom materyalovedenyy. Odessa : Astroprynt, 2017. 168 c. **31.** Lemaitre J. L. Continuum Damage Mechanics. Part I. *General Concepts*. *Journal of Applied Mechanics*. 1988. Vol. 55. Pp. 59–64. **32.** Nie S. A Micromechanical Study of the Damage Mechanics of Acrylic Particulate Composites under Thermomechanical Loading : PhD Thesis / The State University of New York at Buffalo. 2005. 372 p. **33.** Mao H., Mahadevan S. Fatigue damage modelling of composite materials. *Composite Structures*. 2002. Vol. 58. Pp. 405–410. **34.** Memduh Nas, Şirin Kurbetci. Mechanical, durability and microstructure properties of concrete containing natural zeolite. *Computers and Concrete*. 2018. Vol. 22, No. 5. **35.** Lyashenko T. V., Dovgan A. D., Dovgan P. M. Fibre-reinforced decorative composite: the effects of composition on the strength. *Visnyk ODABA*. 2018. Vyp. 73. S. 89–97.

Dovhan O. D., Candidate of Engineering (Ph.D.), Associate Professor
(Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Odessa,
aleks.dovhan@gmail.com)

DAMAGE OF DISPERSED-REINFORCED DECORATIVE COMPOSITES

The results of damage study obtained during the development of fine-grained concrete for architectural elements are presented. The need for in-depth study of damage is important to ensure a durability and operational reliability of the material of decorative products. Damage study of 27 different compositions of decorative composite was carried out using a method of experimental and statistical modeling.

A new technique has been proposed, that provides for a stage-by-stage research of samples by two characteristics, to determine a damage of concrete. At the first stage, square-section concrete prism samples are tested for bending strength at the second stage, a damage coefficient of the composite is calculated according to the nature of a fracture surface of the samples. In the future, a nonlinear structured mathematical model is built according to experimental data of the parameter, describing a «complete» field of concrete damage coefficient in the coordinates of the recipe factors of its composition.

The article considers an impact of initial composition of composites on the value of technological damage, as well as a stability of decorative concretes structure to the development of microdefects under climate change. Analysis of obtained results showed that the filling of decorative concrete structures with discrete mineral particles of various shape and size has a certain effect on its initial damage (numerical KD values varied within 10%). Kinetic curves and correlation were built based on the results of the natural experiment. It was found that an increase in deformations begins to gradually appear with 35 cycles of alternating humidification and drying, in the course of curves of values change of ultrasound propagation speed and dynamic modulus of elasticity. Processing of full-scale data showed a complete absence of connection of water-cement ratio with the coefficient of technological damage and control tensile strength at bending. However, a rather close connection between elastic modulus, ultrasound propagation speed, average density and strength of composites, as well as dependence of

operational damage and bending strength of the material on the initial W/C of mixtures was found. Experimentally confirmed, the qualitative and quantitative composition of highly dispersed fillers, with different values of plasticization of mixtures and granulometry of sand, makes a significant contribution to reducing damage of composite, which ultimately makes it possible to maintain artistic and aesthetic expressiveness of architectural products.

***Keywords:* decorative concrete; damage; experimental-statistical model; discrete fibres; zeolite.**
