
ПОШКОДЖЕНІСТЬ БЕТОННИХ І ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ

Дорофеев В. С., Пушкар Н. В., Зінченко Г. В.
DOI <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-653-9-4>

ВСТУП

При проведенні обстежень технічного стану залізобетонних конструкцій спостерігається велика кількість дефектів та пошкоджень: волосяні тріщини вздовж поздовжньої арматури з товщиною шару корозії арматури до 2,0 мм; тріщини вздовж поздовжньої робочої арматури з шириною розкриття до 3 мм; відколювання захисного шару вздовж поздовжньої арматури внаслідок корозії; випирання робочої арматури колон (рис. 1).¹



Рис. 1. Дефекти і пошкодженість колон

Ми вважаємо, що причиною появи дефектів та пошкоджень конструкцій є неоднорідна структура бетону, на яку впливає середовище експлуатації.

¹ Zinchenko H.V. Stressed-deformed condition and destruction of technologically damaged reinforced concrete structures. *New stages of development of modern science in Ukraine and EU countries: monografia* / H.V. Zinchenko, V.S. Dorofeev. Riga, 2019. P. 166.

Метою роботи є вивчення основних причин зародження та розвитку дефектів залізобетонних конструкцій в процесі структуроутворення, виникнення та розвиток технологічної пошкодженості бетонів, вплив початкової пошкодженості на експлуатаційні властивості бетонів та конструкцій, а також на роботу залізобетонних конструкцій^{2,3,4}.

1. Формування структури будівельних композитів

Композиційні (складні) матеріали отримують шляхом фізико-хімічного чи фізико-механічного з'єднання різнорідних компонентів. Встановлено, що фізико-механічні характеристики кінцевого матеріалу пов'язані нелінійно з характеристиками вихідних компонентів. Можна припустити, що при взаємодії компонентів утворюються внутрішні по відношенню до матеріалу структури, взаємодія яких призводить до появи явищ синергізму. Як правило, композиційні будівельні матеріали (КБМ) складаються з в'язучого, наповнювачів і заповнювачів. Загальну кількість складових структур КБМ можна виділити за характерними структурними неоднорідностями (рис. 2).

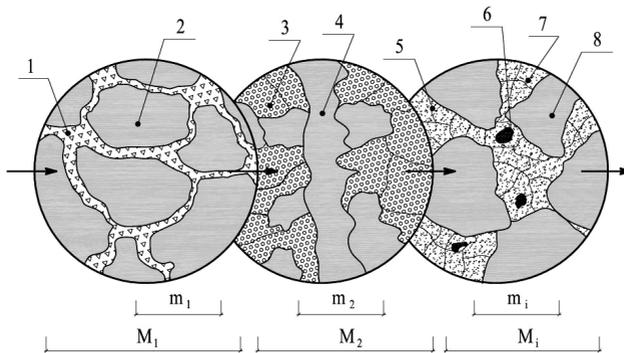


Рис. 2. Організація структури композиційних будівельних матеріалів:

1 – елементарний структурний елемент в'язучого; 2 – наповнювач; 3 – цементний камінь; 4 – мілкий заповнювач; 5 – макроструктурні тріщини; 6 – пори; 7 – розчинна частина (матриця); 8 – крупний заповнювач

² Дорофеев В.С., Зінченко Г.В., Курилюк Д.В., Пушкар Н.В. Поновлення громадських будівель, пошкоджених внаслідок дії вибухів *Progressive Opportunities and Solutions of Advanced Society*: праці 2 міжнар. і практ. інтернет-конф. (Дніпро, 7–8 листопада 2024 р.) Дніпро, 2024. С. 90.

³ Дорофеев В.С., Вировий В.М. Технологічна пошкодженість будівельних матеріалів і конструкцій. Одеса, 1998. С. 65.

⁴ Дорофеев В.С., Зінченко Г.В., Романюк В.В. Дослідження характеру розподілу напруги та переміщень біля вершини тріщини в залізобетонних елементах. *Ресурсемкі матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. 2017. Вип. 34. С. 131.

На кожному виділеному рівні структурної неоднорідності матеріал можна описати з позиції лінійної механіки, структурної механіки чи мікромеханіки.

Представлення матеріалу як суцільної середи передбачає виділення об'єму, в якому індивідуальні властивості елементів нівелюються. Мікромеханіка вивчає процеси, які протікають між окремими компонентами при їх взаємодії як в процесі технологічної переробки, так і в процесі експлуатації матеріалу. Виявлення особливостей взаємодії окремих складових дозволить розкрити механізм формування середніх характеристик на рівні M_1 . У свою чергу, аналіз взаємодії структур на рівнях M_1, M_2, \dots, M_i (рис.2) розкриває механізм формування фізико-механічних характеристик КБМ з багаторівневою організацією структури. Такі матеріали можна представити як матеріали типу "структура в структурі" чи "композит в композиті".

Для кожного рівня виділеної структурної неоднорідності ймовірна поява тріщин, довжина яких a була би менше самої структурної неоднорідності $m_p, a/m_i < 1$. Оскільки в матеріалі виникають дефекти на різних масштабних рівнях, вони є небезпечними для одних "структур" і безпечними для інших. В загальному випадку необхідно добиватися, щоб тріщини з більш низьких масштабних "структур" не переростали би в більш високі до розмірів M_i .

Поява і розвиток тріщин у твердіючих матеріалах залежать від кількості взаємодіючих фаз, їх механічних характеристик, геометричних параметрів гетерогенної системи, геометричних характеристик композитних зразків чи конструкції, величини і кінетики розвитку власних об'ємних деформацій, зміни реологічних характеристик твердіючої системи, інтенсивності і параметрів технологічних впливів.

Складна функціональна залежність зародження і розвитку технологічних тріщин на характерних рівнях структурних неоднорідностей КБМ ставить задачу вивчення механізмів структуроутворення і руйнування композитів багаторівневої організації структури. Проведені дослідження^{5, 6, 7, 8, 9, 10}

⁵ Соломатов В.І., Вировий В.М., Дорофеев В.С., Сіренко В.В. Композиційні будівельні матеріали і конструкції пониженої матеріалоемкості. Київ, 1991. С. 9.

⁶ Дорофеев В.С., Вировий В.М. Технологічна пошкодженість будівельних матеріалів і конструкцій. Одеса, 1998. С. 75.

⁷ Дорофеев В.С., Зінченко Г.В. Чисельні дослідження, що характеризують початкову стадію роботи композитів. *Нові технології в будівництві*. 2017. Вип. 33. С. 31.

⁸ Дорофеев В.С., Пушкар Н.В. Руйнування гідротехнічних бетонів при дії циклічних навантажень і впливів. *Science and technology of the present time: Priority development directions of Ukraine and Poland: proceedings of International Multidisciplinary Conf.* (Wolomin, 19–20 October 2018). Wolomin, 2018. P. 95.

⁹ Dorofeev Vitaliy, Myronenko Igor, Pushkar Natalia. The Effect of Technological Damage on the Properties and Reliability of Construction Materials and Structures Applied Mechanics and Materials (AMM). 2022. Vol. 908. P. 152.

¹⁰ Дорофеев В.С., Зінченко Г.В., Пушкар Н.В. Вплив технологічної пошкодженості на стійкість бетонів при малоцикловому навантаженні *Promising ways of solving scientific problems: proceedings of IX International Scientific and Practical Conf.* (Brussels, 26–28 December 2022). Brussels, 2022. P. 20.

показали, що для якісного описання фізико-механічних процесів структуроутворення і руйнування КБМ і встановлення кількісних співвідношень достатньо виділити дві структури: мікро- і макрорівні. На мікрорівні КБМ характерною структурною неоднорідністю є "в'язуче-наповнювач". Макроструктура представлена неоднорідністю "розчинна частина-заповнювач". Причому припускається, що кожна виділена структура складається зі своїх структур більш низького масштабного рівня. Такі структури в матеріалі існують не ізольовано одна від одної. Проростаючи з одного на інший масштабний рівень, вони взаємодіють між собою. Виконується своєрідна самоорганізація гетерогенної системи, коли структури нижнього масштабного рівня ініціюють організацію структур більш високого масштабного рівня, що в свою чергу викликає зміну вихідних структур. Така діалектична взаємодія між структурами в поліструктурних КБМ потребує диференційного вивчення кожної структури з послідовним їх з'єднанням у композит.

Багаторівнева організація структури КБМ достатньо чітко проглядається в бетонах, як найбільш масовій продукції промисловості будівельних матеріалів, від субмікрокристалів гелевої складової з розміром $10^{-8} \dots 10^{-10}$ м до неоднорідності "розчинна частина-заповнювач" з характерним розміром $2 \cdot 10^{-2}$ м.

Мікроструктура утворюється шляхом суміщення низьков'язких в'язучих і дисперсних наповнювачів, включаючи дисперсну арматуру мілких фракцій (цементу і води, бітуму і порошку, полімеру і наповнювача). Властивості мікроструктури визначаються явищами, які протікають у контакті рідкої і твердої фаз, тобто залежать від кількості наповнювача, його дисперсності, фізико-хімічної активності поверхні, концентрації в'язучого, кількості небезпечних для даної структури дефектів та інших факторів. Мікроструктура присутня зв'язковими в'язучими КБМ, під якими розуміють бінарні композиції, що складаються з низьков'язких пластичних в'язучих і наповнювачів.

Взаємодія окремих компонентів і складових структур КБМ здійснюється по поверхням розділу (ПР). Можна виділити три типи ПР, характерних для мікро- і макроструктур КБМ:

1. При взаємодії окремих компонентів здійснюється їх взаєморозчинення.
2. Взаємодія компонентів супроводжується хімічними реакціями, у зв'язку з чим утворюється перехідний шар з модифікованого матеріалу.
3. При взаємодії компоненти не створюють перехідні шари.

Виділені типи ПР створюють свої структури КБМ, і повинні мати хімічну стабільність на весь період експлуатації, забезпечувати заданий

рівень механічних властивостей для перерозподілу технологічних, експлуатаційних деформацій і напружень між окремими компонентами та структурами, забезпечувати властивості гетерогенної середи як єдиного матеріалу. Крім того, ПР, що з'явилися, здатні прискорити або уповільнити розвиток тріщин в системі, що необхідно враховувати при проектуванні складів матеріалу з мінімальною кількістю початкових дефектів. В наповнених системах розвинута площа поверхні ПР здатна модифікувати властивості готового матеріалу і змінювати умови його технологічної переробки.

Класифікацію КБМ на макрорівні можна проводити по виду і призначенню заповнювачів:

1. Будівельні композити із заповнювачами у вигляді гранул правильної і неправильної форми. Бетони можуть мати хаотично розташовану арматуру, поперечні розміри елементів якої порівняні з крупністю заповнювачів.

2. КБМ, насичені лінійними армуючими елементами з оптимальним геометричним розташуванням в їх структурі і по об'єму композитних виробів.

3. КБМ, складені із в'язучих і орієнтованих волокнистих заповнювачів, об'єднаних у плоскі армуючі елементи.

4. КБМ, скомпоновані із в'язучих і заповнювачів, об'єднаних у каркаси по об'єму виробів.

Запропонована класифікація по виду і призначенню заповнювачів передбачає, що пружно-механічні характеристики і їх щільність можуть бути вище, дорівнювати або бути нижче пружно-механічних характеристик і щільності в'язучих.

2. Характер розповсюдження внутрішніх поверхонь розділу і технологічних тріщин в бетонах

Проведені дослідження і аналіз показали, що на кожному виділеному рівні структурних неоднорідностей реалізується свій механізм спонтанного структуроутворення. При цьому якісно не схожі механізми організації структур призводять до утворення схожих структурних параметрів – внутрішніх поверхонь розділу (ВПР) і технологічних тріщин. ВПР різних типів і технологічні тріщини визначають гетерогенність окремих структурних неоднорідностей і гетерогенність всього матеріалу. Таким чином, ВПР і технологічні тріщини можна віднести до придбаних структурних елементів, вид і характер розповсюдження яких визначають у подальшому здатність активно вписуватися в умови експлуатації.

Для якісної оцінки ролі одних або інших елементів структури в поведінці поліструктурного матеріалу виникла необхідність розробки моделі структури бетону. При розробці моделі бетону виходили з апріорної інформації про наявність на всіх рівнях структурних неоднорідностей несучильностей у вигляді ВПР і технологічних тріщин. Незалежно від причин створення і масштабного рівня ВПР мають загальні ознаки, до яких можна віднести:

- розділення матеріалу на окремі фрагменти, з утворенням фрагментів чи шарів модифікованого матеріалу, властивості якого відрізняються від властивостей матеріалу в об'ємі;
- здатність сприймати навантаження і деформації у зв'язку з зовнішніми впливами і внутрішніми процесами, які передаються від фрагмента до фрагмента;
- здатність перерозподіляти деформації між фрагментами;
- є одним із важливих джерел внутрішнього і зовнішнього теплообмінів.

Як показано в¹¹, береги тріщин як своєрідні ВПР сприймають об'ємні деформації, що розвиваються у твердіючому в'язучому. Це призводить до збільшення ширини розкриття тріщин, накопичення максимальних пластичних деформацій і скачкоподібного проростання тріщини до наступних місць затримки. При цьому здійснюється збільшення площі поверхні берегів тріщини, що дає можливість сприймати більші деформації і їх градієнти, та призводить до появи явищ формозміни протилежних берегів і подальше збільшення їх розкриття та наступного прориву місць затримки. У випадку проростання тріщини до перетину з берегами іншої тріщини її функції як концентратора напружень втрачаються, і вона перетворюється у ВПР з комплексом перерахованих вище ознак. Таким чином, ВПР є завершеними у своєму розвитку технологічними тріщинами.

В загальному випадку в модель структури бетону включені ВПР, утворені в результаті взаємодії розчинної частини з крупним заповнювачем (рис.3,а) і цементного каменю з м'яким заповнювачем (рис.3,б) та ВПР міжкластерних поверхонь розділу на рівні цементного каменю (рис.3,в). При цьому можна виділити ВПР на межі розділу матриці з заповнювачами і ВПР у матричному матеріалі.

До технологічних тріщин можна віднести несучильності матеріалу, що утворюються на різних рівнях структурної неоднорідності, які можна

¹¹ Соломатов В.І., Вировий В.М., Дорофеев В.С., Сіренко В.В. Композиційні будівельні матеріали і конструкції пониженої матеріалоємкості. Київ, 1991. С.55.

охарактеризувати протяжність, яка в декілька разів більше розміру між протилежними площинами (берегами) і наявність однієї або двох точок (ліній) змикання протилежних площин (берегів).

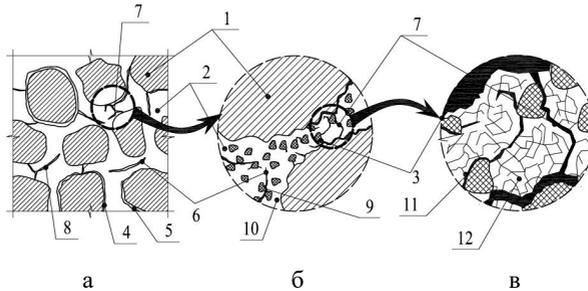


Рис. 3. Модель структури бетону

а – макроструктура; б – рівень "розчинна частина – крупний заповнювач"; в – рівень "цементний камінь – мілкий заповнювач"; 1 – крупний заповнювач; 2 – розчинна частина; 3 – мілкий заповнювач; 4 – тріщини зчеплення по всій поверхні заповнювачів; 5 – тріщини зчеплення, розташовані на окремих ділянках поверхні заповнювачів; 6 – тріщини, розташовані між заповнювачами; 7 – тріщини, які замикаються на берегах інших тріщин; 8 – тріщини, незавершені у своєму розвитку; 9 – модифікований поверхневий шар на ВПП і берегах тріщин; 10 – цементний камінь; 11 – тріщини, що виникли в результаті взаємодії мілких заповнювачів і цементного каменю; 12 – структурні блоки цементного каменю; 13 – міжкластерні поверхні розділу; 14 – технологічні тріщини на рівні цементного каменю

Причиною виникнення зародкових тріщин є об'ємні зміни, які супроводжують твердіння і структуроутворення мінеральних в'язучих. Можна представити, що, розвиваючись по певним залежностям у всьому об'ємі матричного матеріалу, деформації одночасно ініціюють принципово різні механізми утворення зародкових тріщин (базових несучільностей) в детермінованих місцях. На рівні структурної неоднорідності "матриця-заповнювачі" місце виникнення зародкових тріщин визначається геометричними характеристиками макроструктури і співвідношенням значень R_a і R_x . У випадку $R_a < R_x$ зародкові тріщини виникають на межі розділу між матричним матеріалом і заповнювачем з подальшим проростанням на цій границі розділу. Для ситуації $R_a > R_x$ зародкові тріщини з'являються у матричному матеріалі між заповнювачами. Подальша траєкторія таких тріщин визначається структурними особливостями

матричного матеріалу. Конкретне місце появи тріщини в макроструктурі і мікротраєкторії її розвитку пов'язані з утворенням міжкластерних поверхонь розділу різного масштабного рівня, які при об'ємних змінах, що продовжуються, здатні трансформуватися в технологічні тріщини чи ВПР, які характерні для даного рівня структурної неоднорідності.

Можна представити, що ці процеси реалізуються на усіх рівнях структурних неоднорідностей, взаємовпливаючи і взаємодіючи один з одним. У випадку поліструктурної організації матеріалу об'ємні деформації, переходячи на більш високий рівень структурної неоднорідності призводять до появи значних площин поверхонь розділу. Місце і вид цих площин визначаються особливостями даного рівня структурних неоднорідностей, і вони автоматично входять складовою частиною в структуру на рівні взаємодії цементного каменю з мілким заповнювачем (рис.3,б) і на рівні самого цементного каменю (рис.3,в). В моделі представлені технологічні тріщини, які в процесі еволюції матеріалу не виродились у пори і капіляри за рахунок "самозаліковування".

Оскільки траєкторія їх розвитку визначена дискретною будовою різних рівнів структурних неоднорідностей, то до визначеного рівня впливів експлуатаційні тріщини будуть замикатися на берегах технологічних тріщин чи на ВПР. При цьому енергія, необхідна для зростання тріщини розсіюється, що затримує процеси руйнування. Замикання тріщин на берегах інших тріщин чи ВПР переводить їх у новоутворені ВПР, при яких функції тріщини як основного фактору поділу матеріалу на самостійні частини втрачаються. Рівень властивостей при цьому не змінюється оскільки технологічні тріщини перетворюються в експлуатаційні і розвиваються в межах одного структурного фрагменту. Подальші навантаження будуть викликати об'єднання ВПР і тріщин різних структурних фрагментів по достатньо складним траєкторіям, які залежать від початкового дискретного стану кожного рівня структурної неоднорідності. Після об'єднання ВПР до розміру магістральної тріщини може спостерігатися її незворотне зростання до повного розділення матеріалу в конструкції на частини (руйнування).

В силу того, що кінетика руйнування матеріалу конструкцій, які експлуатуються в екстремальних умовах, в значній мірі визначається видом і характером розповсюдження ВПР і технологічних тріщин на різних рівнях структурних неоднорідностей бетону як поліструктурного матеріалу, можна вважати, що, змінюючи основні параметри вихідних структурних елементів в запропонованій моделі структури бетону, можна більш повно використовувати ресурс матеріалу за рахунок зміни його руйнування.

В якості основних факторів, які дозволяють змінити вид і характер ВПР та технологічних тріщин, прийняті форма і мінералогічний склад крупних

заповнювачів. Зміна цих елементів дозволить отримати бетони з різними типами структурних параметрів на рівні макроструктури, представленою неоднорідністю "розчинна частина-крупні заповнювачі".

Кількісну оцінку пошкодженості бетону технологічними дефектами проводили через визначення пошкодженості поверхневими тріщинами.

Пошкодженість бетону дефектами визначали вимірюванням довжини поверхневих тріщин курвіметром з точністю до 0,001 мм на протилежних гранях зразка. Поверхневі тріщини фіксувалися витримкою зразків у водних розчинах таніну. Зміна лужності бетону в районі тріщин змінювала забарвлення танінів, виявляючи та фіксуючи тріщини¹². Прийнята методика визначення тріщин показала, що вона може дозволити виявляти тріщини шириною розкриття від 2 мкм і більше і довжиною 2 мм і більше. Технологічні тріщини визначалися на зразках віком понад 200 діб (рис.4).

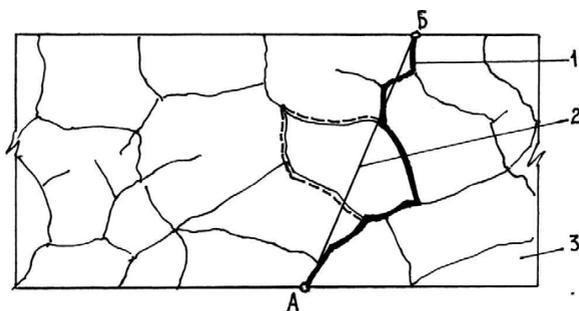


Рис. 4. Метод визначення коефіцієнта ушкодженості:

1 – технологічна тріщина довжиною l_{cre} ; 2 – геодезична лінія l ; 3 – виділена ділянка на поверхні бетону

$$K_{II} = l_{cre}/l \quad (1)$$

Фізична суть коефіцієнта полягає в оцінці питомої довжини поверхневих тріщин, виявлених на одиниці довжини. Зі збільшенням K_{II} міцнісні і деформативні характеристики бетону знижуються.

Розглянемо механізм трансформації технологічних тріщин в експлуатаційні. Для пояснення механізму зародження тріщин при дії знакозмінних навантажень запропоновано кілька моделей (рис.5).

¹² Дорофеев В.С., Зінченко Г.В., Целікова А.Г. Вплив технологічної пошкодженості матеріалу на напружено-деформований стан згинальних залізобетонних елементів. *Вісник Львівського національного аграрного університету, Архітектура і сільське будівництво*. 2017. Вип. 18. С. 77.

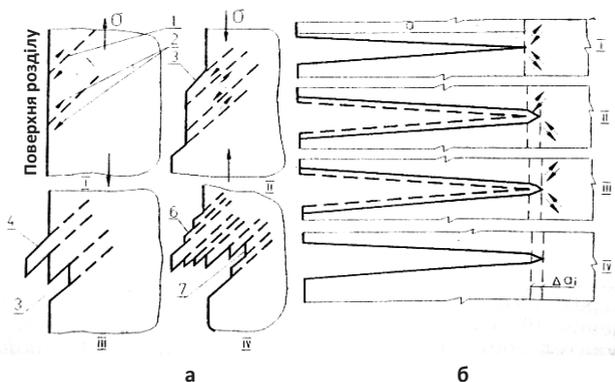


Рис. 5. Механізм зародження тріщин (а) та його розвитку (б)

I...IV – етапи зародження та розвитку втомних тріщин; 1...3 – деформування по площинам; 4, 5 – зміна характеру поверхні; 6 – зародження тріщин екструзії; 7 – зародження тріщин інтрузії

Під дією розтягуючих напружень в деякій площині відбувається зсув. Зсув у зворотному напрямку (зміна знаку напружень) йде по паралельній площині. При цьому можливі видавлювання або екструзія чи вдавлювання або інтрузія поверхні досить ізотропного і пружного матеріалу. При змінних напруженнях вдавлювання являє собою зародкову тріщину, здатну зростати до того часу, поки досягне довжини, при якій визначальною умовою подальшого зростання стануть напруження біля її вершини (рис. 5, б).

Припускається, що в полі високих напружень у вершині тріщини відбувається зсув. Це спричиняє збільшення ширини розкриття тріщини та її зростання на Δa . Відбувається зсув на іншій площині (етап III). Дифузійні процеси здатні перетворити гострий кінець тріщини на тупий. Під дією стискаючих напружень ширина розкриття тріщин зменшується, і пластичні деформації, що виникають, сприяють відновленню гострого гирла (етап IV). Після чого цикл повторюється і тріщина збільшується на чергове значення Δa .

Представимо напівнескінченну пластину з тріщиною, розташованою на осі симетрії (рис. 6). Під впливом зовнішніх впливів матеріал зазнає об'ємних деформацій зі змінним знаком.

Цикл починається з деформацій збільшення об'єму. Через прийняті припущення берега тріщин будуть переміщатися паралельно самим собі¹³.

¹³ Дорофєєв В.С., Вировий В.М. Технологічна пошкодженість будівельних матеріалів і конструкцій. Одеса, 1998. С. 88.

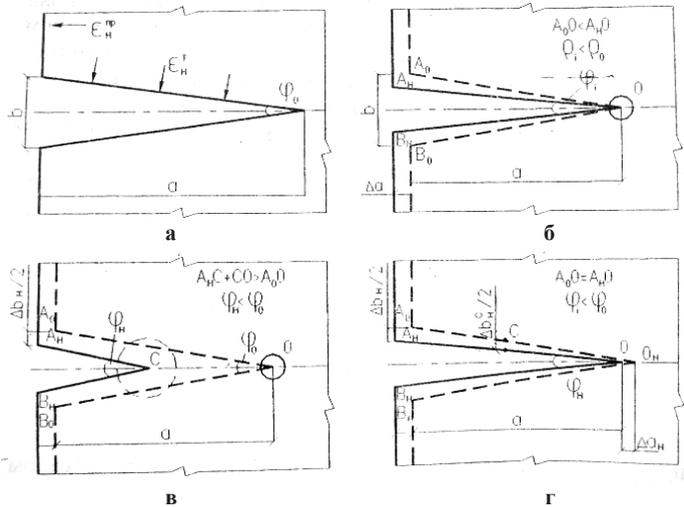


Рис. 6. Механізм втомного зростання технологічної тріщини при знакозмінних об'ємних деформаціях набухання: геометричні параметри технологічної тріщини (а); зміна геометричних параметрів тріщини при пластичних деформаціях біля її гирла (б); зміна параметрів тріщини при пластичному деформуванні гирла та її берегів (в); зміна властивостей тріщини за рахунок її зростання (г)

Введемо кінцеві розміри зразка і прийемо, що в ньому тріщини розташовані паралельно одна до одної на відстані, при якій відбувається нерівномірний розподіл деформацій як по довжині тріщини, так і на протилежних берегах (рис.7).

Збільшення об'єму матеріалу викликає нерівномірний розподіл деформацій на берегах тріщин (рис. 6, б).

Розподіл деформацій в районі тріщини АВ за умови лінійної залежності між об'ємними змінами матеріалу та його лінійними деформаціями визначали графоаналітичним методом.

Аналіз показав, що через геометричні особливості взаєморозташування тріщин та їх розмірів виникають градієнти деформацій, які викликають появу деформацій зсуву. Останні можуть виникнути як на самому березі тріщини, так і біля її гирла. На березі тріщини деформації здатні утворювати ділянки видавлювання, що веде до утворення втомних зародкових тріщин. Зсув у вершині тріщини веде до її розвитку на значення Δa . Градієнт деформацій визначає напрям розвитку такої тріщини. Таким чином, вже на

стадії збільшення об'єму матеріалу при нерівномірному розподілі деформацій набухання на берегах тріщин можливе зростання тріщини та появи зародкових тріщин. Відбувається дроблення структури матеріалу за схемою (рис. 7, в).

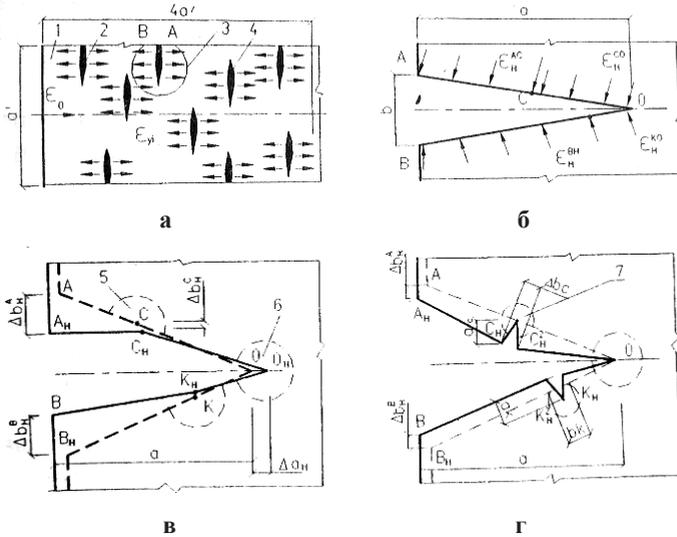


Рис. 7. Механізм зростання втомної тріщини при дії на її береги різновеликих усадкових деформацій: розподіл усадкових деформацій у зразку з тріщинами (а); геометричні параметри тріщини та розподіл на її берегах деформації набухання (б); зміна геометричних параметрів тріщини за рахунок пластичного деформування берегів і гирла (в); те саме за рахунок зародження на її берегах нових тріщин (г); 1 – зразок; 2 – поверхневі тріщини; 3 – різновеликі усадкові деформації; 4 – тріщини в об'ємі матеріалу; 5 – зони пластичності на берегах; 6 – зони пластичності біля гирла; 7 – нові поверхні розділу на берегах тріщини

Потенційна можливість зростання та трансформації технологічних тріщин в експлуатаційні при знакозмінних об'ємних змінах матеріалу ставить завдання вивчення впливу кількості циклів зміни об'єму на накопичення пошкоджень у бетоні. Збільшення та зменшення об'єму матеріалу відбувається при його експлуатації в умовах періодичного зволоження або висушування, зміни температури та ін.

Проведено випробування зразків віком 540 діб на дію малоциклового зволоження та висушування з метою визначення характеру технологічної

пошкодженості та його впливу на кінетику розвитку експлуатаційних тріщин. Кількість циклів зволоження та висушування становила 80 та 110. У процесі досліджень вимірювалося накопичення пошкоджень та $K_{лr}$. Дослідження показали, що в міру збільшення циклів зволоження та висушування у бетонах різного складу відбувається накопичення пошкоджень¹⁴. При цьому можна виділити три випадки накопичення пошкоджень (рис. 8).

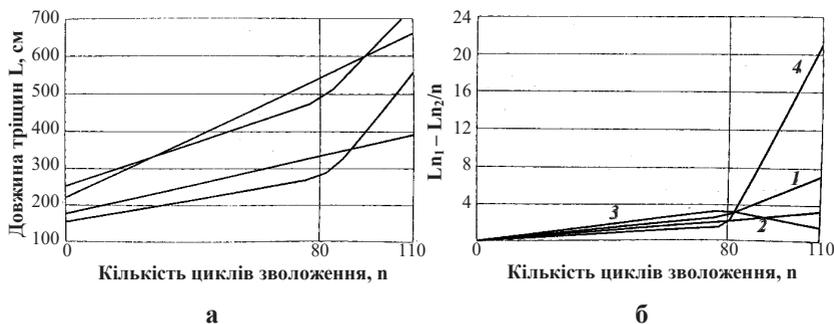


Рис. 8. Вплив зволоження та висушування на зростання поверхневих тріщин: зміна довжини поверхневих тріщин (а); зміна інтенсивності зростання тріщин (б); 1...4 – номери складів бетону

Для першого випадку (рис.8,а) характерно, що при перших 80 циклах відбувається незначне збільшення довжини тріщин. Максимальне збільшення довжини тріщини становить 64%. Це може бути пов'язано з тим, що об'ємні зміни для даних структур бетону при початкових циклах знакозмінної деформації не можуть призвести до утворення нових поверхонь розділу (тріщин), а зміна довжини тріщин може бути пов'язана з підростанням технологічних тріщин.

Для другого випадку характерна інтенсивна зміна протяжності поверхневих тріщин, яка може становити 290%. Це може бути пов'язане з появою та розвитком нових поверхонь розділу. Зі збільшенням кількості циклів від 80 до 110 відбувається різке накопичення пошкоджень, і максимальний приріст становить 399%.

В окрему групу можна віднести склади, для яких зміна пошкодженості відбувається пропорційно кількості циклів.

¹⁴ Дорофеев В.С., Зінченко Г.В., Пушкар Н.В. Вплив технологічної пошкодженості на стійкість бетонів при малоциклового навантаженні *Promising ways of solving scientific problems: proceedings of IX International Scientific and Practical Conf. (Brussels, 26–28 December 2022)*. Brussels, 2022. P. 21.

Відмінність у зміні пошкодженості бетонів дозволяє оцінити швидкість накопичення дефектів по їх інтенсивності (рис.8,б). Дані показують, що для частини бетонних складів максимальна швидкість накопичення дефектів відбувається при 80 циклах. Подальше збільшення кількості циклів знижує інтенсивність приросту довжини розвитку тріщин. Для інших складів бетону (4) інтенсивність накопичення дефектів різко зростає після 80 циклів.

Експлуатація конструкції в зонах поперемінного впливу вологості передбачає, що при зміні кліматичних умов (наприклад, в зимовий період) може відбуватися їх багаторазове заморожування та розморожування.

Випробування проводилося на зразках розмірами 70×70×280 мм за прискореним методом (насичення та розморожування зразків здійснювали в 5% розчині NaCl, а заморожування – в камері при -50°C). Розморожування проводили у ванні з водою, температура якої становила 15...20°C. Було проведено 100 циклів заморожування та відтавання.

Проведені дослідження показали, що зі збільшенням кількості циклів у бетонах відбувається накопичення пошкоджень. Можна виділити два випадки накопичення пошкоджень (рис.9).

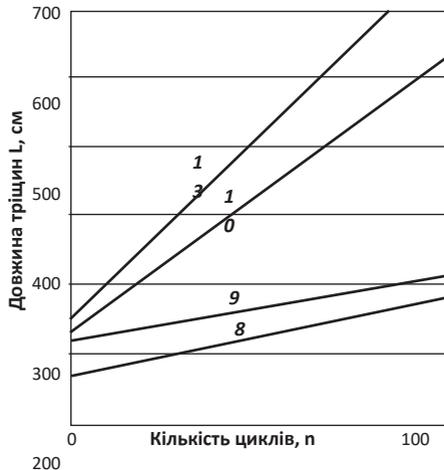


Рис. 9. Вплив кількості циклів заморожування та розморожування на зміну протяжності поверхневих тріщин: 8...13 – номери складів бетону

Для першого випадку характерне незначне збільшення приросту довжини тріщини. Максимальний приріст збільшення довжини тріщини

становить 60%. Це може бути пов'язане з поступовим підrostанням технологічних тріщин.

Для другого випадку характерна помітна зміна протяжності поверхневих тріщин, що становить 211%. Це пов'язано з появою та розвитком нових поверхонь розділу та нових тріщин.

Аналогічні дані отримані для коефіцієнта пошкодженості.

ВИСНОВКИ

Проведений аналіз показує, що композиційні будівельні матеріали є складеними багатокомпонентними середовищами зі складною організацією структури по типу "структура в структурі" чи "композит в композиті". Така складна організація структур КБМ є об'єднуючою основою матеріалів різної природи в'язучих, заповнювачів і фізико-механічних властивостей. Це дозволяє цілеспрямовано використовувати окремі структурні елементи і цілі "структури", а також технологічні прийоми і способи для отримання кінцевого продукту з підвищеними механічними характеристиками і експлуатаційною надійністю.

Формування внутрішніх поверхонь розділу між матричним матеріалом та включеннями визначається характером адгезійно-когезійних сил зв'язку на межах розділу, способами укладання та кількістю включень. Цілеспрямована зміна цих параметрів дозволить прогнозувати пошкодженість макроструктури технологічними дефектами.

Прийнята методика оцінки технологічної пошкодженості через поверхневі тріщини показала, що запропонований спосіб дозволяє виявити тріщини з шириною розкриття від 5 мкм і довжиною більше 2 мм, що дає можливість вивчити розвиток технологічних тріщин при дії середі експлуатації, і трансформацію технологічних тріщин в експлуатаційні.

Встановлено вплив початкової пошкодженості матеріалів на експлуатаційні властивості композиційних будівельних матеріалів та конструкцій. Проведений аналіз дозволяє зробити висновок, що збільшення початкової пошкодженості за рахунок утворення безлічі тріщин сприяє інтенсивному накопиченню пошкоджень як за рахунок технологічних тріщин, так і за рахунок утворення нових поверхонь розділу (тріщин). Це впливає на характер руйнування зразків після знакозміної деформації, і дозволяє визначити стійкість матеріалу при різних зовнішніх впливах.

Аналіз структури бетону як грубогетерогенного матеріалу і механізмів структуроутворення на мікро- і макрорівнях дозволив запропонувати модель структури бетону, в яку крім заповнювачів, матричного матеріалу, модифікованого шару на межі розділу матриці і заповнювачів, пор і капілярів, включені в якості елементів структури такі елементи як

технологічні тріщини і ВПР. В свою чергу технологічні тріщини і ВПР класифіковані за масштабною ознакою, за місцем виникнення і напрямком розвитку. Проведений аналіз дозволив намітити технологічні шляхи отримання бетонів з регульованими виділеними структурними елементами з метою підвищення стійкості при різних режимах експлуатації.

АНОТАЦІЯ

Розглянуто композиційні будівельні матеріали (бетони), властивості яких формуються та трансформуються у часі на внутрішніх поверхнях розділу. Описано механізм формування структури композиційних будівельних матеріалів – бетонів з утворенням поверхонь розділу на площині контакту, включень та матриці. Як включення розглянуто дрібний і крупний заповнювач, а як матриця – розчинна частина і цементний камінь. Подібне виділення структурних рівнів дозволяє встановити виникнення небезпечних дефектів, розмір яких більший за розмір складових структури елемента. Тому розмір дефекту, безпечний на одному структурному рівні, стає небезпечним на більш низькому рівні. Технологічні тріщини визначають пошкодженість конструкцій технологічними дефектами, які трансформуються в експлуатаційні та визначають експлуатаційну надійність. Неоднорідність конструкції пропонується визначати через поверхневу пошкодженість технологічними дефектами.

Встановлено характер тріщиноутворення та розвитку тріщин при дії зовнішнього навантаження у залізобетонних стиснутих і згинальних елементах залежно від технологічної пошкодженості. Показано, що розподіл усадкових деформацій в бетоні з сіткою технологічних тріщин впливає на деформативність і на стійкість при атмосферному впливі середовища, а також в умовах втомного малоциклового навантаження.

Література

1. Zinchenko H.V. Stressed-deformed condition and destruction of technologically damaged reinforced concrete structures. *New stages of development of modern science in Ukraine and EU countries: monografia* / H.V. Zinchenko, V.S. Dorofeev. Riga, 2019. P. 165–184.

2. Дорофеев В.С., Зінченко Г.В., Курилюк Д.В., Пушкар Н.В. Поновлення громадських будівель, пошкоджених внаслідок дії вибухів *Progressive Opportunities and Solutions of Advanced Society*: праці 2 міжнар. і практ. інтернет-конф. (Дніпро, 7–8 листопада 2024 р.) Дніпро, 2024. С. 90–92.

3. Дорофеев В.С., Вировий В.М. Технологічна пошкодженість будівельних матеріалів і конструкцій. Одеса, 1998. 168 с.

4. Дорофеев В.С., Зінченко Г.В., Романюк В.В. Дослідження характеру розподілу напруги та переміщень біля вершини тріщини в залізобетонних елементах. *Ресурсоємкі матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. 2017. Вип. 34. С. 129–135.

5. Соломатов В.І., Вировий В.М., Дорофеев В.С., Сіренко В.В. Композиційні будівельні матеріали і конструкції пониженої матеріалоемкості. Київ, 1991. 144 с.

6. Дорофеев В.С., Зінченко Г.В., Целікова А.Г. Вплив технологічної пошкодженості матеріалу на напружено-деформований стан згинальних залізобетонних елементів. *Вісник Львівського національного аграрного університету, Архітектура і сільське будівництво*. 2017. Вип. 18. С. 75–82.

7. Дорофеев В.С., Зінченко Г.В. Чисельні дослідження, що характеризують початкову стадію роботи композитів. *Нові технології в будівництві*. 2017. Вип. 33. С. 30–35.

8. Дорофеев В.С., Пушкар Н.В. Руйнування гідротехнічних бетонів при дії циклічних навантажень і впливів. *Science and technology of the present time: Priority development directions of Ukraine and Poland: proceedings of International Multidisciplinary Conf. (Wolomin, 19–20 October 2018)*. Wolomin, 2018. P. 94–97.

9. Dorofeev Vitaliy, Myronenko Igor, Pushkar Natalia. The Effect of Technological Damage on the Properties and Reliability of Construction Materials and Structures *Applied Mechanics and Materials (AMM)*. 2022. Vol. 908. P. 149–156.

10. Дорофеев В.С., Зінченко Г.В., Пушкар Н.В. Вплив технологічної пошкодженості на стійкість бетонів при малоцикловому навантаженні *Promising ways of solving scientific problems: proceedings of IX International Scientific and Practical Conf. (Brussels, 26–28 December 2022)*. Brussels, 2022. P. 19–23.

Information about the authors:

Dorofeyev Vitaliy Stepanovych,

Doctor of Technical Sciences, Professor,
Professor at the Department of Construction, Architecture and Design
Odessa National Polytechnic University,
1, Shevchenko ave., Odesa, 65044, Ukraine

Pushkar Natalia Volodymyrivna,

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Professor at the Department of Reinforced Concrete Structures
and Transport Facilities,
Odessa State Academy of Building and Architecture,
4, Didrihsona str., Odesa, 65029, Ukraine

Zinchenko Hanna Valeriivna,

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department
of Construction, Architecture and Design,
Odessa National Polytechnic University,
1, Shevchenko ave., Odesa, 65044, Ukraine