

УДК 691.32:620.191.33

**МЕХАНІЗМИ РОЗВИТКУ СТРУКТУРИ БЕТОНУ ПРИ
МАЛОЦИКЛОВИХ УТОМНИХ НАВАНТАЖЕННЯХ**

**MECHANISMS OF THE STRUCTURAL DEVELOPMENT OF
CONCRETE WITH LOW-FATIGUE FATIGUE INFLUENCES**

**Коробко О.О., к.т.н., доцент (ОДАБА, м. Одеса), Вировой В.М.,
д.т.н., проф. (ОДАБА, м. Одеса), Варич Г.С. (ОДАБА, м. Одеса),
Яковенко І.О. (ОДАБА, м. Одеса).**

**Korobko O.O., Ph.D., senior lecturer (Odessa State Academy Civil
Engineering and Architecture, Odessa), Vyrovoy V.M., DSc in engineering,
professor (Odessa State Academy Civil Engineering and Architecture,
Odessa), Varych H.S. (Odessa State Academy Civil Engineering and
Architecture, Odessa), Yakovenko I.O. (Odessa State Academy Civil
Engineering and Architecture, Odessa).**

Досліджена динаміка зміни пошкодженості бетону в умовах
знакозмінних зовнішніх впливів з урахуванням різноманітності
структури та проаналізовано механізм утомного росту тріщин в
об'ємі матеріалу.

The work is devoted to solving the problem of increasing the
resistance of concrete in conditions of low-cycle fatigue influences. The
material of the building construction adapts to the actions of climatic
factors through structural changes. Cracks are structural elements, which
are capable of instantly responding to changing external conditions.
Fatigue growth of cracks depends on their initial parameters and occurs
according to a certain mechanism. It is possible to set the complex of
cracks by changing the parameters of the characteristic elements of the
macrostructure. The difference in values of the concrete damage
coefficient through cycles of alternate wetting-drying and freezing-
thawing was from 10-57% in the detached cells. Under the experimental
conditions, the strength of concrete was doubled and the modulus of
elasticity was increased by 40% with a decrease in water absorption by
2.5 times. The variety of structure contributes to the preservation of the
functional properties of the material.

Ключові слова: бетон, структурні зміни, утомна тріщина, пошкодженість, малоциклові впливи.

Keywords: concrete, structural changes, fatigue crack, damage, low-cycle fatigue influences.

Вступ. Експлуатація бетонних конструкцій і виробів апріорно передбачає перманентний вплив на них кліматичних факторів. Всі види періодичних впливів, пов'язаних з дією вологи та температур, сприймає бетон, який реагує на багаторазові перепади температурно-вологісного режиму шляхом періодичних змін маси та об'єму. Це викликає постійні зміни структури бетону, шляхом яких матеріал пристосовується до нових умов експлуатації. Прояв ефектів адаптації бетону у вигляді спонтанних структурних перебудов є результатом своєчасної зміни параметрів конкретних складових структури, які здатні адекватно відкликатися на зовнішні впливи. До початку експлуатації в структурі бетону вже присутній певний набір таких активних елементів, до яких відносяться технологічні (спадкові, початкові, залишкові) тріщини. Процеси, котрі відбуваються в об'ємі тріщин при заморожуванні-розморозуванні та зволоженні-висушуванні, перетворюють кожен тріщину в нестабільний елемент структури. Нестабільність тріщин пов'язана зі збільшенням ширини їх розкриття та зміною тиску всередині тріщини. Це створює умови для росту тріщин внаслідок концентрації напружень в зоні устя при нерівномірному розподілі деформацій і напружень на звивистих берегах тріщини та в об'ємі оточуючого матеріалу. Сумарна кількість тріщин з різноманітними параметрами визначає загальну пошкодженість бетону, яку в роботі [1] пропонується розглядати як характеристику структури. В період експлуатації зміна пошкодженості матеріалу залежить від початкових наборів тріщин. Задані набори спадкових тріщин можна одержувати шляхом керування процесами багаторівневого структуроутворення композитів поліструктурної будови.

Аналіз останніх досліджень. У спеціальній літературі приведені прийоми і способи керування пошкодженістю матеріалів: на рівні часток в'язучого (мікроструктура бетону) за рахунок використання раціональних наповнювачів і хімічних добавок, на рівні макроструктури бетону шляхом зміни геометрії та фізичних параметрів структурних чарунок, утворених зернами заповнювачів

в матричному матеріалі, на рівні виробу через зміну його геометричної форми. На нашу думку, більш детального розгляду потребує дослідження динаміки зміни пошкодженості бетону під дією перемінних кліматичних чинників з урахуванням різноманітності характеристик складових структури на макрорівні.

Причинами зародження та росту тріщин спеціалісти вважають власні об'ємні деформації матеріалу в цілому та його окремих компонентів, градієнти температурних і вологісних деформацій, стиснені деформаційні ефекти, осмотичні та корозійні явища й т.п. При цьому механізми зародження і розвитку тріщин в гетерогенних грубодисперсних матеріалах, як правило, не розглядаються. Проте, саме гетерогенність матеріалів типу бетону локалізує зародкові тріщини в середині себе на рівнях структурних неоднорідностей зі збереженням їх потенційної можливості в умовах знакозмінних впливів зростати до небезпечних для даних структур тріщин.

Постановка мети та задач досліджень. Зовнішні впливи, що пов'язані з циклічною зміною температури і вологи, ведуть до утоми матеріалу, яка визначається наборами початкових тріщин. Виходячи з цього, була поставлена мета роботи – підвищення стійкості бетону при малоцикловій утомі за рахунок одержання заданої структури матеріалу шляхом забезпечення відповідного набору характерних складових на рівні макроструктури. Для досягнення поставленої мети слід вирішити наступні задачі: - проаналізувати механізм розвитку втомної тріщини в об'ємі будівельних композитів; - дослідити зміну пошкодженості бетону з виходом на рівень властивостей в умовах поперемінної дії циклів зволоження-висушування і заморожування-розморожування.

Результати досліджень. Під утомним руйнуванням бетону розуміють поступове накопичення пошкоджень в результаті періодичного впливу напружень або деформацій з перемінною амплітудою до виникнення небезпечної тріщини та її незворотного росту. Необхідно створювати структури, які будуть забезпечувати структурний розвиток, сприятливий для збереження властивостей матеріалу. Для цього швидкість відповідних реакцій структури у вигляді зародження і росту тріщин має співвідноситися з інтенсивністю зовнішніх впливів в одному темпоритмі.

Утомні тріщини утворюються з технологічних тріщин шляхом їх підростання. Для кількісної оцінки швидкості росту втомної тріщини виходять з припущення, що довжина тріщини a за один

цикл знакозмінних напружень N змінюється в залежності від зміни коефіцієнту інтенсивності напружень в циклі $\Delta K = K_{\max} - K_{\min}$ та констант матеріалу C і m . Виходячи з даного механізму розвитку тріщини за один цикл, пропонується співвідносити швидкість росту тріщини з величиною її розкриття. Однак, як показали досліди, утомна міцність матеріалів з однаковим модулем Юнга може мати різні значення (різну швидкість росту тріщини).

Для матеріалів, що зазнають великі знакозмінні деформації, введені деформаційні критерії утомного руйнування, під якими розуміються критерії, пов'язані з циклічними деформаціями. На основі цього встановлено зв'язок між пластичною деформацією за цикл $\epsilon_{пл}$, амплітудою деформації $\Delta \epsilon$, амплітудою напружень та модулем пружності матеріалу.

При аналізі прийнято наступні обмеження та допущення: - мікроструктура являє собою безперервне середовище з визначеними ефективними характеристиками; - тріщини в мікроструктурі являють собою внутрішні прямолінійні поверхні розділу з визначеними геометричними характеристиками (довжина a , ширина розкриття b , радіус устя φ , довжина фронту l); - об'ємні деформації мікроструктури практично не проявляються на зовнішніх по відношенню до неї поверхнях розділу; - властивості мікроструктури практично не змінюються протягом одного циклу знакозмінних об'ємних змін; - об'ємні деформації виникають без градієнтів по перетину зразків.

Зовнішні впливи викликають внутрішні деформаційні процеси, які проявляються на берегах тріщин. Отже, знакозмінні об'ємні зміни матеріалу є внутрішніми спонтанними процесами утомного росту початкової тріщини при багаторазових об'ємних змінах з різним знаком (рис. 1).

Представимо напівнескінчену пластину з тріщиною, яка розташована по осі симетрії. Цикл росту тріщини починається зі збільшення об'єму матеріалу. В силу прийнятих допущень на берега тріщин буде діяти рівномірно розподілена деформація об'ємів матеріалу, звернених до свого берегу (рис. 1, а). Під дією деформацій берега тріщини починають зближуватися на величину Δb_n . У випадку, коли деформації, які проявляються на берегах тріщини, $\Delta b'_n$, менше або дорівнюють ефективній ширині розкриття тріщини b_T , $\Delta b'_n < b_T$, буде реалізовуватися пластичне деформування (рис. 1, б, в).

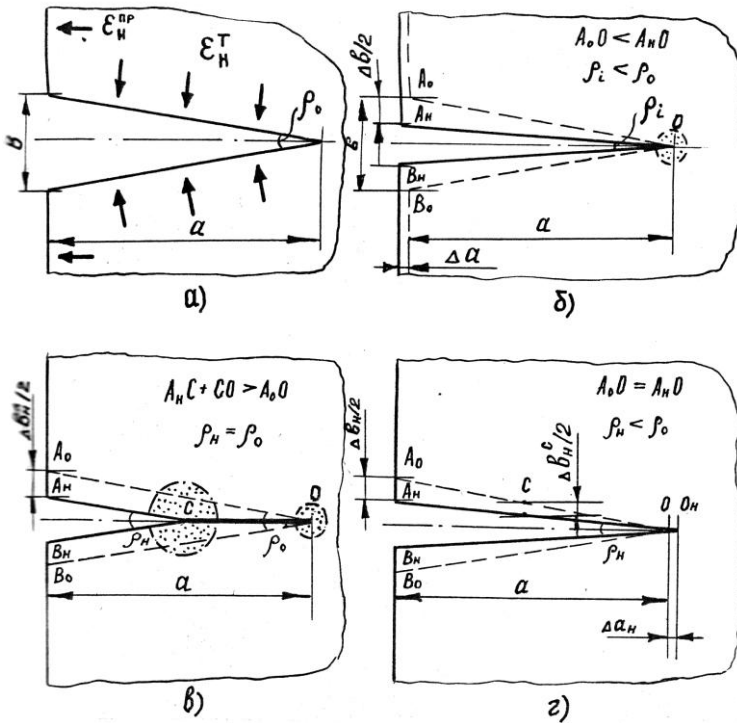


Рис. 1. Механізм утомного росту початкової тріщини:
 а – геометричні параметри тріщини; б – зміна геометрії тріщини при прояві пластичних деформацій в зоні устя;
 в – зміна параметрів тріщини при пластичному деформуванні матеріалу в зоні устя та на берегах тріщини;
 г – зміна параметрів тріщини за рахунок її росту.

При $\Delta b'_n > b_T$ берега тріщини зустрічаються один з одним. Частина тріщини починає працювати як сам матеріал та, на цієї ділянці, пружні деформації ϵ_{np} переважають пластичні ϵ_{nl} , $\epsilon_{np} > \epsilon_{nl}$. У випадку паралельності берегів тріщини, їх змикання та загальну деформацію можна виразити через пластичну ϵ_{nl} та пружну ϵ_{np} частини.

Пластичне деформування можливе тільки в зоні ширини розкриття тріщини, тому $\Delta b_n = \epsilon_{nl}$ можна записати як:

$$\varepsilon = b_n + \varepsilon_{np}.$$

Змикання клиноподібних тріщин є практично неможливим, за виключенням наступних випадків, які в нашій роботі виходять за рамки розгляду: - пластичного деформування матеріалу берегів тріщини, що веде до зміни їх середніх властивостей в зоні деформування; - формозміни границь розділу; - шарнірного повороту пластини навколо устя тріщини. В інших випадках повне змикання берегів тріщини не відбувається.

Для кількісної оцінки частки пластичного деформування було введено поняття ефективної ширини розкриття тріщини, яке можна визначити як середній розмір її ширини. Ефективна ширина розкриття тріщини \bar{b} залежить від її довжини a та ширини розкриття b , тому може бути визначена геометричним шляхом:

$$\bar{b} = a \cos(\varphi/2).$$

Тоді деформація зразка з тріщинами n_T при збільшенні об'єму матеріалу буде дорівнювати:

$$\varepsilon = n_T \cdot a \cos(\varphi/2).$$

При зменшенні об'єму V_0 до значень $V_0 / \Delta V_y < 1$ деформації усадки викликають розкриття тріщин. Деформації берегів до значень \bar{b} можна віднести до пружної частини усадочних деформацій. Після цього настає етап пластичного деформування. В силу прийнятих допущень, тріщина не може викривити свої береги, а матеріал змінити власні середні характеристики. Тому, у випадку $\Delta b'_y > bt$, відбувається збільшення довжини тріщини на величину Δa_y , (рис. 1, г). Збільшення довжини тріщини реалізується одночасно зі збільшенням ширини її розкриття Δb_y . Абсолютні значення Δb_y та Δa_y залежать від початкових b_0 і a_0 та величини деформацій усадки, які проявляються на берегах тріщини $\Delta \varepsilon_y$. Між збільшенням ширини розкриття тріщини Δb_y та приростанням її довжини існує залежність:

$$\Delta a_y = \Delta b_y / 2 \operatorname{tg}(\varphi/2).$$

Ширина розкриття визначається величиною деформацій усадки та, в нашому випадку, дорівнює їй, тому можна записати:

$$\Delta a_y = \Delta \varepsilon_y / 2 \operatorname{tg}(\varphi/2).$$

Як наслідок, загальна лінійна усадка зразка з тріщиною при зменшенні об'єму матеріалу буде дорівнювати:

$$\varepsilon = n \cdot \Delta\varepsilon_y / 2 \operatorname{tg}(\varphi/2).$$

Кожний цикл знакозмінних деформацій буде викликати підростання тріщини на величину Δa_y . Зміна довжини тріщини за один цикл $\Delta a_y / dN$ залежить від Δb_y та $\Delta\varepsilon_y$:

$$\Delta a_y / dN = \Delta b_y / \Delta\varepsilon_y.$$

Якщо прийняти рівномірність усадочних деформацій від циклу до циклу, то довговічність в умовах малоциклової втоми або кількість циклів N буде залежати від початкової довжини тріщини a_0 , ширини її розкриття b_0 , величини усадочних деформацій ε_y та відношення площі тріщини до перетину зразка S_T / S_{06} (при умові, що фронт тріщини являє собою пряму лінію; при $a_T = 0,25a$ приймемо, що зразок вийшов з ладу). Величину a_T можна визначити з умови:

$$a_T \leq 0,25a; a_T \leq \Delta a_y N.$$

Крім підростання тріщин, в умовах знакозмінних деформацій не виключені ситуації, при яких на берегах тріщин зароджуються та розвиваються нові для даного структурного рівня тріщини, що веде до зміни пошкодженості матеріалу експлуатаційними тріщинами.

Проведений аналіз показав, що довговічність, при прийнятих допущеннях, визначається параметрами початкової тріщини та амплітудою і кількістю знакозмінних об'ємних деформацій.

В реальних зразках відбувається нерівномірний розподіл деформацій на берегах тріщини. В силу геометричних особливостей взаєморозподілу тріщин різних розмірів на їх берегах проявляються деформації, різні за величиною. Нерівномірний розподіл викликає деформації зсуву ε_c , які можуть виникнути на протилежних берегах тріщини та в зоні її устя. На берегах тріщини ε_c здатні утворювати ділянки видавлювання та вдавлювання, що веде до утворення втомних зародкових тріщин. Градієнт деформацій визначає також напрямок розвитку такої тріщини. При збільшенні об'єму матеріалу можливий ріст та поява зародкових тріщин, що веде до повної зміни розподілу деформацій на етапі усадки матеріалу. Усадкові деформації проявляються на нових поверхнях розділу, що посилює градієнти деформацій за величиною та напрямком. Такий процес сприяє накопиченню пошкоджень в одиниці об'єму структури. Накопичення пошкоджень до критичного значення, при якому вони

здатні зливатися в магістральну тріщину, визначає стійкість матеріалу в умовах знакозмінних деформацій.

Бетон є матеріалом, організованим за принципом «структура в структурі» за якісно відмінними механізмами формування окремих рівнів структурних неоднорідностей. Тому мікроструктуру бетону можна виділити як складову частину макроструктури. В роботі [2] показано, що характерними складовими макрорівня є структурні чарунки, які утворюються при статистично вільному розташуванні заповнювачів в цементній матриці. Чарунки, навіть при одному й тому ж складі бетону, відзначаються різноманіттям геометричних параметрів та співвідношень адгезійно-когезійних сил зв'язку на міжфазних границях розділу. Було визначено, що макроструктурні параметри є факторами керування кінетикою процесів організації мікроструктури та її пошкодженістю початковими тріщинами.

Ступень пошкодженості мікроструктури (цементної складової) в структурних чарунках визначали через коефіцієнт пошкодженості $K_{п} = S_{т}/S_0$ як співвідношення площі, обмеженої тріщинами, $S_{т}$, до площі зразка, на якій з'явилися тріщини, S_0 . Дослідження показали, що пошкодженість цементного каменя в різних чарунках різнилась до 1,5-2,5 разів. В локальних об'ємах макроструктури утворювалися неповторні набори початкових тріщин, які на рівні структури бетону повинні інтегративно визначати функціональний потенціал матеріалу та умови його взаємодії з оточуючим середовищем під дією знакозмінних впливів температури та вологи.

Результати досліджень на моделях з різним набором чарунок, показали, що після зволоження-висушування значення коефіцієнта пошкодженості зразків відрізнялися на 10-57% залежно від типу укладки заповнювачів та стану їх поверхні.

Дослідження на зразках-кубах показали (рис. 2), що найбільш монотонно, без різких перепадів від циклу до циклу, змінювалась пошкодженість зразків, які мали різноманітні за співвідношеннями міжфазних сил зв'язку набори структурних чарунок.

Це, на нашу думку, пов'язано з тим, що багатоваріантність параметрів чарунок сприяє прояву ефектів адаптації до зовнішніх впливів. Забезпечення різноманіття чарунок дозволяє підтримувати рівень властивостей матеріалу в допустимих нормах межах.

Проведений аналіз та дослідження показали, що для підвищення стійкості бетону при малоциклових діях температури та вологи необхідно забезпечувати конкретні структури матеріалу.

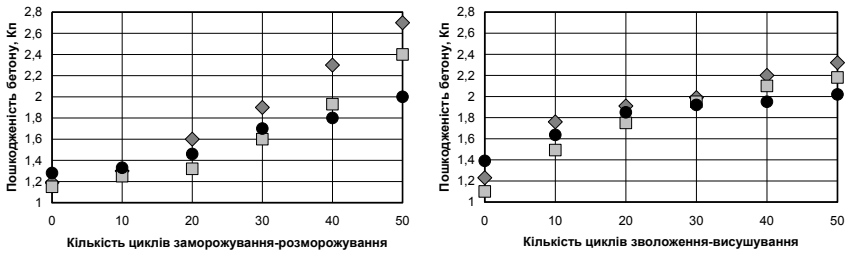


Рис. 3. Зміна пошкодженості бетону з різними параметрами макроструктурних чарунок при малоцикловій утомі:

■ – $R_A > R_K$; ◆ – $R_A < R_K$; ● – $R_A = R_K$.

R_A – величина адгезії матриці до поверхні заповнювачів,
 R_K – величина когезійної міцності матричної складової.

Ефективним фактором керування структуроутворення виступає направлена зміна параметрів багатоваріантних структурних чарунок як характерних складових макроструктури. Проаналізовано механізм розвитку втомних тріщин при урахуванні їх генезису з початкових тріщин під впливом власних деформацій матеріалу. Це дозволило встановити зв'язок між безпекою функціонування виробу та зміною технологічної пошкодженості бетону як проявом ефектів адаптації. В умовах періодичного зволоження-висушування або заморожування-розморожування збільшення різноманітності структури зумовило підтримку рівня властивостей бетонних зразків з одержанням підвищених показників міцності та модуля пружності, до 2 разів, при зниженні водопоглинення, до 3 разів, та різних значеннях пошкодженості. Таким чином, збереження заданих фізико-технічних характеристик є функцією сприятливих структурних перебудов матеріалу при домінуючій ролі спадкових тріщин і внутрішніх поверхонь розділу.

1. Выровой В.Н. Композиционные строительные материалы и конструкции. Структура, самоорганизация, свойства / В.Н. Выровой, В.С. Дорофеев, В.Г. Суханов. – Одесса: ТЭС, 2010. – 169 с. 22. Коробко О.А. Взаимосвязь структур изделия и материала / О.А. Коробко // УкрДУЗТ: збірник наукових праць. – 2017. – Вип.68. – С. 117-124.