

(РК=115 мм). Зменшення водопотреби до В/Ц=0,34 (РК=115 мм) призводить до приросту як ранньої міцності дрібнозернистого бетону, так і в місячному віці тверднення. Так, на 28 добу межа міцності при стисканні досягає 39,5 МПа, що відповідно на 3,5 МПа та 2,0 МПа перевищує міцність дрібнозернистих бетонів на основі портландцементу ПЦ ІІ/А-Ш та КЦ V/Б.

Висновки. Реалізація проектів з випуску ефективних малоенерговмісних цементів дає змогу створити прогресивні моделі в цементній промисловості в плані практики чистого виробництва, а також системно вирішувати питання економії сировини та енергії з переробкою різного роду відходів на стадії виготовлення як клінкеру, так і цементів. Це також забезпечує зменшення викидів парникових газів та аерозолей цементними заводами, що становить безсумнівний інтерес в плані охорони довкілля та запобігання глобальній зміні клімату. Розроблено модифіковані композиційні цементні матеріали характеризуються покращеними будівельно-технічними показниками, а бетони на їхній основі – покращеними експлуатаційними характеристиками.

1. *Swamy R. Design for Durability and Strength Through the Use of Fly Ash and Slag in Concrete / Proc. Mario Collepardi Symposium on Advances in Concrete Science and Technology. – Rome (Italy). – 1997. – P. 127–194.* 2. *Composite cements for energy-saving concrete technologies / M. Sanytsky, Ch. Sobol, T. Markiv, W. Bialczak // Budownictwo o zoptymalizowanym potencjale energetycznym. – Czestochowa (Poland). – 2004. – P.373–377.* 3. *Соболь Х.С. Концепція застосування модифікованих композиційних цементів у будівельному виробництві // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. – 2004. – № 495. – С. 173–177.*

УДК 624.21:539.3:620.179.16

В.Р. Скальський, Ю.Л. Лотоцький
Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка
НАН України, м. Львів

ОЦІНКА ОБ'ЄМНОЇ ПОШКОДЖЕНОСТІ БЕТОНУ НА РІЗНИХ СТАДІЯХ РОЗВИТКУ РУЙНУВАННЯ

© Скальський В.Р., Лотоцький Ю.Л., 2005

Запропоновано методику кількісної оцінки об'ємної пошкодженості бетону, яка полягає у визначенні її акусто-емісійної міри. Перевірку основних теоретичних положень методики виконано на експериментальних дослідженнях руйнування бетонних кубів з різних типів бетонних сумішей і з одночасним записом сигналів акустичної емісії.

The method of quantitative estimation of volume damages in concrete consisting in determination of its acoustic emission measure is proposed. Verification of principal theoretical grounds of the method is conducted during experimental researches of concrete cubes fracture of the different types of concrete mixtures with the simultaneous recording of acoustic emission signals.

Актуальність проблеми. Останнім часом у будівельній індустрії найпоширенішим будівельним матеріалом для виготовлення несучих елементів конструкцій є бетон і залізобетон. Зародження та розвиток руйнування у бетонних та залізобетонних будівельних конструкціях відбувається від наявних у них мікро- (м/т) та макротріщин (МТ). Накопичення та розвиток тріщиноподібних дефектів у таких матеріалах під час їхньої експлуатації відбуваються постійно, а інтенсивність цього процесу залежить від складу бетону та умов експлуатації: типів навантаження (статично-змінне, динамічне, вітрове тощо), агресивної дії середовища (карбонізація, замокання конструкцій, вилуговування, корозія бетону і арматури тощо) та інших фізичних впливів. Тому встановлення кількісних значень пошкодженості в несучих елементах таких конструкцій є актуальною проблемою. Оскільки будівельні конструкції є об'єктами довготривалої експлуатації,

то важливо вміти кількісно оцінювати накопичення в їхніх елементах. Це, в остаточному результаті, дасть змогу здійснювати моніторинг відповідальних об'єктів довготривалої експлуатації методами неруйнівного контролю (НК).

Пошкодженість матеріалу розділяють на розсіяні дефекти – малі за розмірами та множинні в одиниці об'єму і магістральні тріщини, котрі з'являються на завершальній стадії руйнування [1]. Елементарні акти та механізми виникнення дефектів і умови їхнього розвитку відомі лише наближено. Про формулювання кількісних характеристик, функцій розподілу, залежностей між випадковими дефектами говорити важко.

Перспективним напрямком НК і технічної діагностики (ТД) для визначення пошкодженості є метод акустичної емісії (АЕ). У працях [2, 3] на основі аналізу сигналів АЕ (САЕ) показано існування чотирьох стадій руйнування бетону залежно від наростання напружень стискання σ . На першій відбувається пружне деформування, на другій, коли напруження σ досягають значень $0,2 < \sigma < 0,75 R$ (де R – критичні значення напружень, за яких відбувається спонтанне руйнування) – зародження та ріст мікротріщин, а на третій для значень $0,75 < \sigma < 0,96 R$ – макротріщиноутворення. Четвертою вважають закритичну стадію росту МТ, коли навантаження досягає величини $\sigma \geq 0,96 R$. На цій стадії відбувається нестабільне поширення руйнування бетону. Варто зауважити, що відомі літературні дані не показують вплив структури на характер розподілу САЕ.

Стан проблеми. Одним з найпоширеніших напрямків визначення пошкодженості є підхід, що ґрунтується на деяких апріорних характеристиках пошкодженості, котра визначається порівнянням теоретичних і експериментальних даних. Наприклад, запропоновано пошкодженість описувати скаляром ψ ($1 \geq \psi \geq 0$) – “суцільність” [1]. У початковому стані за відсутності пошкодженості $\psi = 1$, а в часі функція ψ спадає і введено функцію $\omega \geq 0$ ($\omega = 1 - \psi$) [4, 5], яку названо пошкодженістю. Надають функції ψ статистичний зміст і тоді зміну суцільності описують кінетичним рівнянням виду [2]

$$\frac{d\psi}{dt} = F(\psi, \dots), \quad (1)$$

де F залежить від ψ та деяких інших змінних: тензора напружень чи деформацій, температури, часу тощо. Істотно, щоб функції та параметри в рівнянні (1) визначались із простих експериментів. Важливим є встановлення принципу лінійного підсумовування пошкодження, котрий вперше постульовано у праці [6] і розвинуто у [1, 7].

Відомі також інші схеми побудови континуальних моделей накопичення пошкоджень. Теорія довготривалої міцності вводить поняття пошкодження Π (його компоненти $\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_n$), що характеризує накопичення дефектів і залежить від історії навантаження цього елемента середовища [8]. Передбачають невід'ємні міри пошкоджень

$$M_j(\Pi), j=1, 2, \dots, m; m \leq n. \quad (2)$$

Руйнування проходить, коли для будь-якого $j=k$

$$M_k(\Pi) = c_k, \quad (3)$$

де c_k – константи матеріалу. У спрощеному варіанті пошкодження Π є симетричним тензором другого рангу.

У [9] пошкодженість матеріалу в околі точки характеризують розподілом дефектів – м/т на малій сфері, що оточує цю точку і вводиться відповідна функція на сфері, для якої записано кінетичне рівняння. Накопичення розсіяних мікродефектів моделюється ростом у матеріалі включень із іншими пружними властивостями [10]. Можна визначити пружні характеристики такого композитного середовища залежно від концентрації включень і від пружних властивостей основного матеріалу та включень. Із урахуванням співвідношень термодинаміки необоротних процесів автори виводять кінетичне рівняння для функції концентрації. Така схема дає змогу розглядати руйнування за повзучості, малоциклової втому, вплив складного навантаження тощо.

Так, наприклад, у [11–13] для описання механічної поведінки матеріалу із тріщиною застосована мікромеханічна модель руйнування, яка ґрунтується на відомому критерії Гурсона–Твергаарда–Нідлемана пластичного течіння для пористого матеріалу. Ця модель вбудована в розрахункову програму із використанням методу кінцевих елементів. Знаючи критичні експериментальні значення мікромеханічних параметрів пошкоджуваності, числовими розрахунками гладких зразків завбачено початок пластичного руйнування компактного зразка із тріщиною. На прикладі низьколегованої сталі з ємності високого тиску показано, що цю модель можна використати для прогнозу початку руйнування гладких зразків.

Однак ефективних методів кількісної оцінки пошкодженості матеріалу під впливом навантаження, а особливо в області його пластичних деформацій (ПД), за допомогою неруйнівних методів контролю НК сьогодні не знайдено. Немає єдиної думки щодо найінформативнішого методу оцінки об'ємної пошкодженості (ОП) матеріалу. Залежно від вибраного параметра, якому ставиться у відповідність міра пошкодженості і спосіб її інтерпретування, отримують різні її значення.

Мета роботи – оцінити об'ємну пошкодженість бетону на різних стадіях розвитку руйнування методом АЕ.

Теоретичні обґрунтування методики дослідження. Розвиток ПД у матеріалах супроводжується зародженням та ростом пор, руйнуванням різного роду включень, утворенням м/т, МТ. У межах нашої моделі концептуально будемо розглядати матеріали, ПД яких відбувається через утворення у її об'ємі м/т та МТ. Отже, якщо мати загальну суму $\sum S_i$ наростання площ таких дефектів новоутворених поверхонь S_i і зіставити її з об'ємом V , де вони утворилися і розвивалися, то можна отримати механічну міру пошкодженості ξ матеріалу в пластично деформованому об'ємі, тобто отримати інтегральну кількісну оцінку ОП.

Експериментальні та теоретичні дослідження показали, що до моменту повного руйнування твердих тіл (ТТ) проходить довгий період, який пов'язаний із деформуванням матеріалу, зародженням і накопиченням пошкоджень. Якщо узагальнити вже відомі результати моделювання руйнування на основі кінетичної теорії, то спрощено можна подати таку послідовність розвитку пошкодженості у ТТ. Навантажений зразок вважають таким, що складається із структурних елементів (СЕ), руйнування яких призводить до утворення м/т. Зруйнування СЕ відбувається за рахунок перевищення напруження деякого критичного значення (силовий критерій руйнування) та термофлуктуацій напружень. На початковій стадії руйнування, коли є незначна кількість м/т, руйнування СЕ статистично незалежне [14]. Із зростанням концентрації м/т і злиттям їх в асоціації – МТ, перебіг руйнування визначається вже співвідношенням між структурною неоднорідністю матеріалу та неоднорідністю напружень, що зумовлена дефектами. У разі малої структурної неоднорідності руйнування локалізується поблизу найбільших МТ, які ростуть, поглинаючи окремі м/т чи їхні дрібні асоціації. Одночасно із цим стабілізуються м/т, які потрапили в область розвантаження матеріалу. Серед МТ виділяється магістральна тріщина, котра, досягнувши критичного розміру, спричинює руйнування зразка. Коли велика структурна неоднорідність матеріалу порівняно із неоднорідністю напружень, руйнування характеризується множиною зародків руйнування, МТ розвиваються практично незалежно.

З утворенням МТ перерозподіляються напруження в її околі. За атермічного злиття МТ руйнуються СЕ в області взаємної нестійкості цих МТ. Швидкість об'єднання близько 0,4...0,6 від швидкості звуку у матеріалі (швидкість закритичного росту тріщин). Малий час процесу τ дає змогу припустити, що у такому разі випромінюється одиничний імпульс АЕ із амплітудою, яка пропорційна $\sqrt{\varepsilon/\tau}$, де ε – енергія, достатня для руйнування СЕ в області між МТ, що зливаються. Для утворення та злиття МТ необхідна доволі висока локальна концентрація одиничних м/т (наприклад, приблизно $10^9 \dots 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ для чистих металів в умовах повзучості [15]), тому, щоб цього досягти, потрібен деякий час. Ось чому на початковому етапі руйнування треба сподіватися низькоамплітудної АЕ, що характерна для утворення одиничних м/т та їхніх дрібних асоціацій, а далі – руйнування з високоамплітудними сигналами АЕ (САЕ).

Оскільки сьогодні не існує прямих методів НК, які безпосередньо могли б визначати площі новоутворених поверхонь дефектів, то, як було зазначено вище, перспективним є залучення для цього саме методу АЕ. Однак аналіз літературних даних щодо застосування АЕ до оцінки площ новоутворених дефектів і накопичення пошкоджень свідчить, що відомі поодинокі результати у цьому напрямку емпіричні, що істотно обмежує їхнє кількісне використання у НК.

Отже, враховуючи висунуту вище концепцію, застосовуватимемо для наших подальших досліджень модель кількісної оцінки об'ємної пошкоженості матеріалу [16], із урахуванням лінійності накопичення пошкоджень у ТТ [1, 4, 7]. Основні її положення такі:

1. Механічна міра об'ємної пошкоженості матеріалу ξ визначається як відношення суми площ новоутворених дефектів S_i до об'єму, де вони утворилися V :

$$\xi = \sum S_i / V = S / V. \quad (4)$$

2. Величина ξ лінійно пропорційна до справжньої деформації (СД) e полікристалічних тіл.
3. Акустико-емісійна міра об'ємної пошкоженості матеріалу ξ_1 визначається відношенням суми амплітуд сигналів АЕ до об'єму, у якому відбувається дефектоутворення.
4. Ця міра об'ємної пошкоженості матеріалу ξ_1 лінійно залежить від СД полікристалічних тіл.
5. Обидві міри об'ємної пошкоженості взаємно пропорційні.

Результати експериментальних досліджень. Навантажували стисканням бетонні куби розмірами 100×100×100 мм трьох типів: з цементно-піщаної суміші (ЦПС), з бетонів на щебеневому та гравійному заповнювачах. Як гідравлічне в'язуче використовували портландцемент марки 500, а дрібний заповнювач – пісок з модулем крупності $M_k = 1,784$; крупний заповнювач – щебінь з фракціями 5...10 + 30% 2,5...5 та гравій фракцій 10...20 + 30% 20...40 + 20% 5...10. Склад сумішей у співвідношеннях цемент (Ц): пісок (П): заповнювач (З) в об'ємних частках був таким: для зразків з ЦПС – Ц:П = 1:3, а водоцементне відношення В/Ц = 0,4; бетонні куби з гравієм – Ц:П:З = 1:1:2, з В/Ц = 0,5; бетонні куби зі щебенем – Ц:П:З = 1:1:1,8, з В/Ц = 0,4.

Суміш готували упродовж 5...6 хв у бетономішувачі примусової дії, обладнаному дозаторами маси об'ємом 0,5 м³. Зразки виготовляли з суміші одного замісу в жорстких дерев'яних опалубках, що були розраховані на 6 зразків. Ущільнювали бетонну суміш на вібростенді. Після виготовлення зразки набували міцності в звичайних умовах за температури навколишнього середовища 15...18 °С. Зволоження зразків не здійснювали; розопалублювання здійснювали через 3...4 доби після їхнього формування.

Випробування здійснювали у віці: зразки ЦПС – 55 доби, бетонні зразки з гравієм – 2 роки та бетонні з щебенем – 53 доби. Схему експериментів наведено на рис.1.

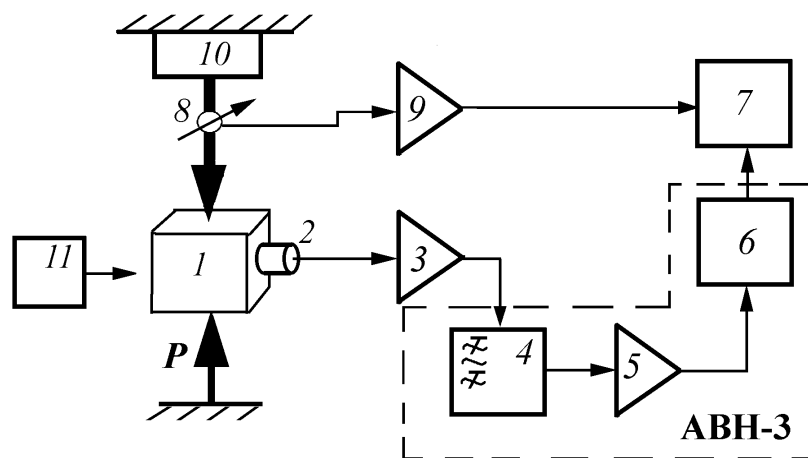


Рис. 1. Схема експериментальних випробувань

Куби стискали на розривній машині 10 типу Р-100 квазістатично із середньою швидкістю зміни навантаження 2...3 кг×см⁻²×с⁻¹. Щоб зменшити тертя в місці дотикання граней куба 1 з

плитами машини та забезпечити відповідні умови навантаження, були виготовлені спеціальні прокладки. Для відбору САЕ первинний п'єзоперетворювач (ПАЕ) 2 через шар мастила фіксували за допомогою струбчини до однієї з прокладок із зусиллям притискання 3...5 Н.

Електричні сигнали АЕ із квазірезонансного ПАЕ 2 надходили на попередній підсилювач 3, блок фільтрів високих і низьких частот 4, вимірювальний підсилювач потужності 5 і на блоки обробки САЕ 6 приладу АВН-3. Підсилювали САЕ у смузі частот 0,16...0,5 МГц. Блок основного вимірювального підсилювача 5 давав можливість ступінчасто підбирати коефіцієнт підсилення з кроком 1 та 10 дБ, коефіцієнт передавання фільтрів приблизно становив одиницю, а загальний коефіцієнт підсилення АЕ-тракту – 58 дБ. Із блока обробки САЕ 6 електричні сигнали в аналоговому вигляді подавали на швидкодійний реєстратор 7 типу Н-338/4, де записували обвідну САЕ за період 0,1 мс, їхній сумарний рахунок тощо, а також зусилля навантаження P . Його знімали як аналоговий електричний сигнал з тензометричного динамометра сили 8 і подавали на реєстратор 7 через підсилювач постійного струму 9 типу У7-1. Зображення стану поверхні фіксували за допомогою фото- чи відеокамери 11. Результати спостережень за боковою поверхнею зразків показані на рис. 2.

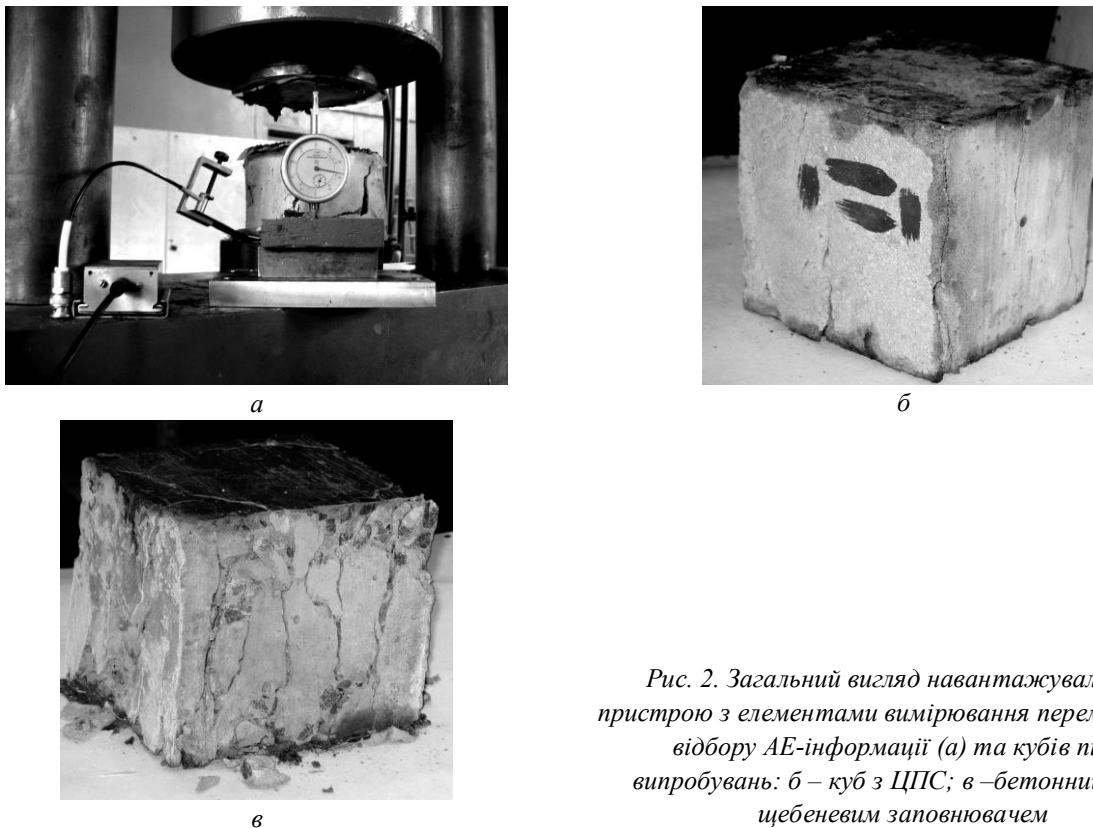
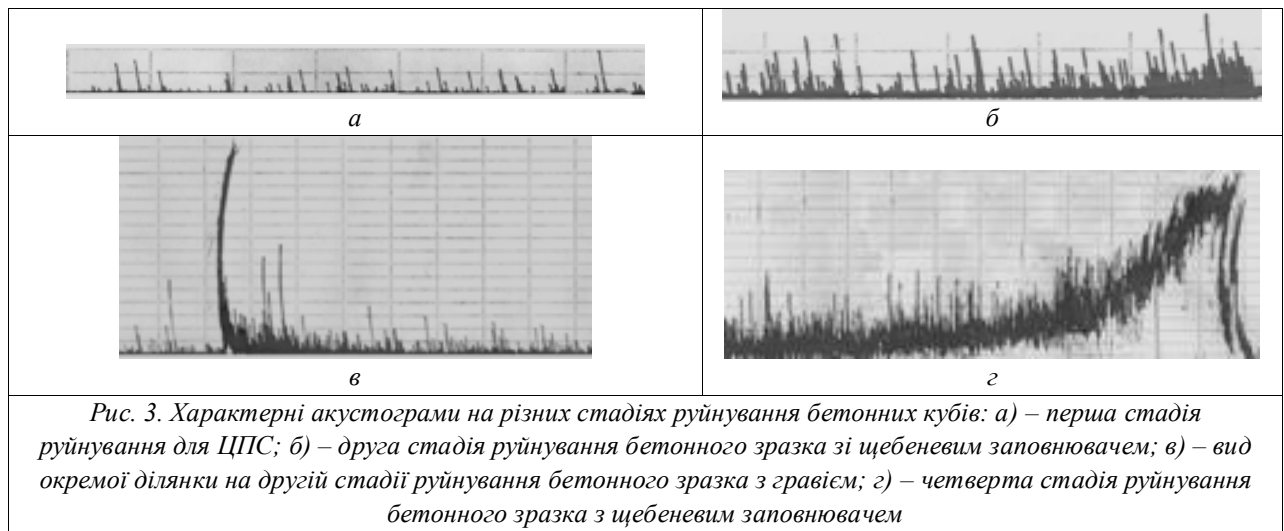


Рис. 2. Загальний вигляд навантажувального пристрою з елементами вимірювання переміщень та відбору АЕ-інформації (а) та кубів після випробувань: б – куб з ЦПС; в – бетонний куб зі щебеним заповнювачем

Характерні ділянки акустограм на певних стадіях руйнування бетонних кубів з різними заповнювачами подано на рис. 3. Так, для зразка з ЦПС характерним є те, що на першій стадії руйнування САЕ генеруються з амплітудами, що не перевищують 4 умовні одиниці (у.о.) (рис. 3, а). На другій стадії руйнування поступово збільшуються амплітуди САЕ, їхня інтенсивність і це монотонно продовжується до закінчення третьої стадії. Коли $\sigma \approx 0,96 R$ (четверта стадія), то амплітуди та інтенсивність САЕ лавиноподібно зростають аж до моменту руйнування.

У бетонному зразку з щебеним крупним заповнювачем накопичення САЕ подібне до кубів з ЦПС лише на перших двох стадіях, але з амплітудами та інтенсивністю більшими, ніж у зразку з ЦПС (рис. 3, б). Дещо інший розподіл САЕ простежується у бетонному зразку з гравієм. Тут їхні амплітуди на усіх стадіях руйнування є значно вищими за амплітуди та інтенсивність від відповідних САЕ зі зразків з щебеним заповнювачем. В окремі моменти часу, наприклад, за досягнення навантаження $\sigma = 0,5 R$, у них відбуваються періодично спалахи високих амплітуд та інтенсивності САЕ (рис. 3, в).



Як показали результати досліджень, для кожного з типів бетону характер і значення наростання суми амплітуд САЕ відрізняються. Так, для зразка з ЦПС вони є найнижчими і це можна пояснити тим, що структура такого матеріалу є майже квазіоднорідною, а геометрично, з певним наближенням можемо вважати, що пісок має сферичну форму і не має гостроконечних виступів. Тому мікротріщиноутворення незначних площ і малої кількості генерує значно менші САЕ. Інший характер руйнування мають бетонні куби, у яких крупним заповнювачем служить щєбінь. Очевидно, гостроконечні виступи щєбеню сприяють зародженню м/т. Поступове наростання навантаження у таких зразках супроводжується підвищенням амплітуд САЕ і наростанням їхньої інтенсивності, що, очевидно, свідчить про більшу кількість новоутворених площ дефектів (див. таблицю).

Значення амплітуд та інтенсивності САЕ на всіх стадіях зародження руйнування бетонних кубів

Тип зразка	Стадія	Середня амплітуда на ділянці, у.о.	Максимальна амплітуда на ділянці, у.о.	$\dot{N} = N/t$, імп.	R, МПа
ЦПС	I	≈1,0	4,0	≈50	23,8
	II	1,3	5,0	105	
	III	1,15	8,0	493	
	IV	4,1	41,0	8562	
Бетон зі щєбенєм	I	≈1,25	7,0	≈100	15,7
	II	1,40	9,0	138	
	III	1,50	13,0	571	
	IV	≈2,0	42,0	4475	
Бетон з гравієм	I	2,15	17,0	408	35,1
	II	2,80	45,0	1480	
	III	4,70	44,0	8628	
	IV	10,05		13158	

Характер наростання амплітуд САЕ в бетоні з гравійним заповнювачем відрізняється від САЕ, що реєстрували під час випробувань попередніх зразків (тут наростання амплітуд відбувається значно активніше). Інколи спостерігаються САЕ з великими дискретними амплітудами. Це гіпотетично можна обґрунтувати тим, що в цей момент, можливо, лопають фракції гравію, які за своєю жорсткістю і міцністю поступаються цементній матриці. В кубах з гравійним заповнювачем руйнування, поряд з відшаруванням гравію і зародженням мікротріщин (САЕ з малими амплітудами) як у матриці, так і у гравії, частіше супроводжується стрибкоподібним розтріскуванням власне гравію, починаючи з другої стадії руйнування кубів.

На рис. 4. показано, як змінюється АЕ-міра об'ємної пошкодженості бетонів з різними заповнювачами залежно від зміни квазістатичного навантаження (точки – отримані експериментальні дані, а криві – результати апроксимації).

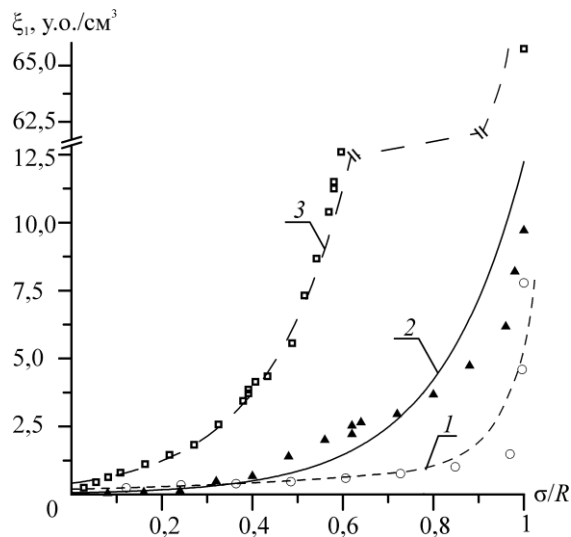


Рис. 4. Залежність АЕ міри об'ємної пошкодженості ξ_1 від навантаження для зразків з бетону різного складу: 1 – ЦПС; 2 – бетон зі щепеневим заповнювачем; 3 – бетон з гравійним заповнювачем

Висновки. Як показали результати теоретико-експериментальних досліджень, руйнування бетону відбувається вже на ранніх стадіях навантаження. За амплітудними ознаками САЕ можна розрізнити стадії руйнування бетону з різною структурою, що є дуже важливо для діагностування реальних будівельних конструкцій методом АЕ.

Акусто-емісійна міра об'ємної пошкодженості бетону ξ_1 ефективно відображає динаміку та ступінь накопичення тріщиноподібних дефектів у матеріалі. Її кількісні показники віддзеркалюють реальні процеси руйнування і згідно з цим видно, що різні типи крупних заповнювачів по-різному впливають на процеси зародження та розвитку об'ємної пошкодженості матеріалу.

1. Качанов Л.М. Основы механики разрушения. – М., 1974.
2. Скальський В.Р., Коваль П.М. Акустична емісія під час руйнування матеріалів, виробів і конструкцій. Методологічні аспекти відбору та обробки інформації. – Львів, 2005.
3. Скальський В.Р., Демчина Б.Г., Карпукін І.І. Руйнування бетонів і акустична емісія (Огляд). Повідомлення 1. Статичне навантаження і вплив температурного поля // Технич. діагностика и неразрушающий контроль. – 2000. – №1. – С.12–23.
4. Работнов Ю.Н. Ползучесть элементов конструкций. – М., 1966.
5. Mishnaevsky L. In Self-organization effects in damage evolution / Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій / Під ред. В.В. Панасюка. – Вип. 2, т.1. – Львів, 1999.
6. Robinson E.L. Effect of temperature variation on the long time rupture strength of steels // Trans. ASME. – 1952. – 74, №5. – P.68–76.
7. Работнов Ю.Н., Милейко С.Т. Кратковременная ползучесть. – М., 1970.
8. Ильющин А.А. Об одной теории длительной прочности // Мех. твердого тела. – 1967. – №3. – С.21–35.
9. Тамуж В.П., Лагздиньш А.Ж. Вариант построения феноменологической теории разрушения // Механика полимеров. – 1968. – №4. – С.638–641.
10. Analysis of steel micromechanical damage parametrs trasferability in ductile fracture initiation conditions / M. Rakin, Z. Cvijovic., A. Sedmak and S. Sedmak // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2002. – №1. – С.87–92.
11. Gurson A.L. Continuum theory of ductil rupture by void nucleation and growth: part I-Yield criteria and flow rules for porous ductile media // J. of Eng. Mater. and Technol. – 1977. – 99. – P.2–15.
12. Tvergaard V. Influence of voids on shear band instabilities under plane strain conditions // Intn. J. Fract. – 1981. – 17. – P.389–407.
13. Tvergaard V. and Needleman A. Analysis of cupe-cone fracture in a round tensile bar // Acta Metallurgica. – 1984. – 32. – P.157–169.
14. Баранов В. М, Кудрявцев Е.М. Использование кинетической теории разрушения для определения параметров акустико-эмиссионных сигналов при докритическом росте трещин в твердых телах / В кн.: Акустическая эмиссия гетерогенных материалов. – Л.: ФТИ им. А.Ф. Иоффе, 1986. – С.22–27.
15. Владимиров В.И., Орлов А.Н. Термически активированное зарождение микротрещин в кристаллах // Проблемы прочности. – 1971. – №2. – С.36–38.
16. Скальський В.Р. Акустико-емісійне визначення накопичення об'ємної пошкодженості твердих тіл // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2003. – №2. – С.84–92.