

Міністерство освіти і науки України
Національний університет водного господарства та
Природокористування

Кафедра промислового, цивільного будівництва
та інженерних споруд

03-01-153М

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання практичних занять з курсу
**«Особливості проектування конструкцій з використанням
високоміцних бетонів»**
для здобувачів вищої освіти другого
(магістерського) рівня за освітньо-професійною програмою
«Промислове і цивільне будівництво» спеціальності
192 «Будівництво та цивільна інженерія»
всіх форм навчання

Рекомендовано науково-
методичною радою з якості ННІБА
Протокол № 1 від 29 серпня 2023 р.

Рівне – 2023

Методичні вказівки до виконання практичних занять з курсу «Особливості проектування конструкцій з використанням високоміцних бетонів» для здобувачів вищої освіти другого (магістерського) рівня за освітньо-професійною програмою «Будівництво та цивільна інженерія» спеціальності 192 «Будівництво та цивільна інженерія». [Електронне видання] / Бабич Є. М., Філіпчук С. В. – Рівне : НУВГП, 2023. – 15 с.

Укладачі: Бабич Є. М. доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри промислового, цивільного будівництва та інженерних споруд; Філіпчук С. В., кандидат технічних наук, доцент кафедри промислового, цивільного будівництва та інженерних споруд.

Відповідальний за випуск: Бабич Є. М., доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри промислового, цивільного будівництва та інженерних споруд.

Керівник групи забезпечення спеціальності 192 “Будівництво та цивільна інженерія”

Масюк Г. Х.

© Є. М. Бабич,
С. В. Філіпчук, 2023
© НУВГП, 2023

Зміст

1. Характеристичні та розрахункові значення механічних характеристик бетонів	4
2. Діаграми деформування бетону за стиску	7
3. Механічний стан бетону за дії динамічних навантажень	10
Література	15

1. Характеристичні та розрахункові значення механічних характеристик бетонів

Механічні характеристики кількісно оцінюють якість бетонів та їх здатність чинити опір механічним впливам.

Бетон повинен мати наперед задані гарантовані характеристики (за ДСТУ Б В.2.7-43-96) [1]:

- міцність за стиску, розтягу та зрізу;
- міцність за розтягу під час згину;
- зчеплення з арматурою;
- середня густина (щільність);
- морозостійкість;
- водонепроникність;
- вогнетривкість.

Чим вища міцність бетону, тим краще його зчеплення з арматурою та вищий опір утворенню тріщин за розтягу. Застосування бетонів високої міцності забезпечує підвищену довговічність та надійність залізобетонних конструкцій, що є важливим фактором доцільності використання їх в спеціальних спорудах, які можуть перебувати під впливом як статичних, так і динамічних навантажень [2].

Механічні характеристики бетонів є основою для розрахунку залізобетонних конструкцій з необхідною несучою здатністю упродовж зазначеного терміну експлуатації в процесі експлуатації. Відповідно до ДБН В.2.6-98:2009 [3] основними механічними характеристиками важких бетонів є:

- кубикова міцність $f_{ck,cube}$;
- призмova міцність $f_{ck,prism}$;
- міцність за розтягу f_{ctm} ;
- міцність за розтягу під час розколювання $f_{ct,sp}$;
- початковий модуль пружності бетону E_{cm} ;
- відносні деформації стиску ε_c ;
- відносні граничні деформації стиску ε_{cu} .

В нормах [3] передбачено три рівня значень механічних характеристик бетонів (середні, характеристичні і розрахункові)

залежно від класу бетону. Клас міцності ґрунтується на характеристичній кубиковій міцності зі статистичною забезпеченістю 0,95. В нормах класи бетонів обмежуються максимальним значенням С60 (С50/60). Щодо вищих класів бетонів (до С115), то використання їх у практиці проектування можливе за умови виконання спеціальних експериментальних досліджень і визначення характеристичних і розрахункових значень міцності.

Міцність бетону визначається його опором різноманітним силовим впливам – стиску, згину, зрізу, а деформативність – його здатністю до пружних і непружних деформацій. Оскільки бетон є неоднорідним тілом, то зовнішнє навантаження створює в ньому складний напружений стан. Під стискаючим навантаженням в бетонному зразку напруження концентруються на більш жорстких частинах, внаслідок чого на поверхні контакту різних за міцністю частин виникають зусилля, які намагаються зруйнувати зв'язки між ними. Одночасно у місцях послаблення бетону порами також відбувається концентрація напружень. При цьому розтягуючі напруження діють у площинах, паралельних до напрямку дії стискаючої сили (рис. Помилка! Джерело посилання не знайдено.).

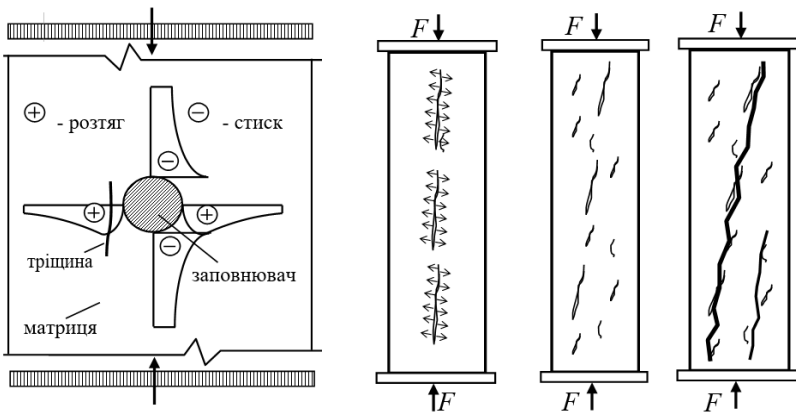


Рис. 1 Схема концентрації напружень в бетоні та характер руйнування бетонної призми [2]

Оскільки в бетоні міститься велика кількість пор та часток заповнювачів, то напруження біля одного концентратора накладаються на напруження від поряд розташованого концентратора і внаслідок цього в бетонному зразку, що зазнає стиску, виникають як поздовжні стискаючі, так і поперечні розтягуючі напруження (вторинне поле напружень). Вторинні розтягуючі зусилля в стиснутому бетоні ще далеко до вичерпання міцності досягають у деяких місцях граничних значень і призводять до утворення мікротріщин. Зі збільшенням навантаження кількість мікротріщин збільшується, вони зливаються між собою, утворюючи магістральну тріщину, яка розділяє зразок на частини, і відбувається руйнування. Таким чином, хоча бетонний зразок, який зазнає дії стискаючої сили, руйнується від стиску, але бетон зразка руйнується від його розтягу.

На характер концентрації напружень в бетоні суттєве значення має його структура. В бетонах з крупним заповнювачем концентрація відбувається як на поверхні контакту з цементним каменем, так і навколо пор, в дрібнозернистих бетонах навколо заповнювачів концентрація напружень дещо менша, а тому вони краще чинять опір силовим впливам.

Основною метою проектування конструкцій є недопущення в процесі їх експлуатації настання будь-якого граничного стану, тобто необхідно забезпечити несучу здатність і придатність конструкцій до нормальної експлуатації. Розрахунок конструкцій виконують за нелінійною деформаційною методикою, сутність якої полягає у тому, що у перерізах враховують приріст не зусиль (напружень), а деформацій матеріалів. Основою деформаційної моделі є використання повних діаграм деформування бетону, які мають висхідну та низхідну вітки.

Базовими міцнісними характеристиками бетону, які використовують в розрахунках, є їх характеристичні значення:

- опір бетону осьовому стиску - $f_{ck,prism}$;

- опори бетону осьовому розтягу – $f_{ctk,0,05}$ і $f_{ctk,0,95}$ ($f_{ctk,0,05}$ визначають з забезпеченістю 0,05; в аварійних ситуаціях – $f_{ctk,0,95}$ з забезпеченістю 0,95).

Характеристичні значення визначають залежно від середніх значень з урахуванням необхідної забезпеченості та коефіцієнта варіації. Характеристичне значення опору бетону осьовому стиску (призмової міцності) обчислюють за формулою

$$f_{ck,prism} = f_{cm,prism}(1 - 1,64V_c); \quad (1)$$

а характеристичне значення опору бетону осьовому розтягу $f_{ctk,0,05}$ – за формулою

$$f_{ctk,0,05} = 0,7 f_{cm,0,05}. \quad (2)$$

Розрахункові значення опору бетону осьовому стиску і розтягу визначаються з урахуванням коефіцієнтів надійності за матеріалом відповідно γ_c і γ_{ct} .

$$f_{cd} = f_{ck,prism} / \gamma_c; \quad (3)$$

$$f_{ctd} = f_{ctk,0,05} / \gamma_{ct}. \quad (4)$$

Коефіцієнти надійності для бетону в розрахунках за граничними станами першої групи за стиску і розтягу відповідно приймають $\gamma_c = 1,3$ і $\gamma_{ct} = 1,5$, в розрахунках за граничними станами другої групи – γ_c і $\gamma_{ct} = 1,0$.

2. Діаграми деформування бетону за стиску

Зв'язок деформативних і міцнісних властивостей бетону відображається на діаграмі стиску і розтягання. Характер такої діаграми суттєво залежать від режиму навантаження. За одноразового навантаження бетонного зразка (призми) стискаючим або розтягуючим зусиллям (з постійною швидкістю збільшення напруження найбільш важливими є два режими: умовно-миттєвий і короткочасний стандартний.

Під короткочасним стандартним (подальше короткочасний) розуміють режим, прийнятий при визначенні статичної міцності бетону, під умовно-миттєвим (в подальшому

миттєвий) режим, в якому навантаження подається поступово (без переривів) зі «стандартною» швидкістю від 1 до 3 мм/хв, коли загальна тривалість прикладання навантаження на порядок менша, ніж при короткочасному навантаженні і, природно, впливом фактора часу на характер діаграми $\sigma_c - \varepsilon_c$ можна нехтувати.

Діаграма, яка відповідає миттєвому режиму навантаження, необхідна для побудови розрахункових моделей напружено-деформованого стану залізобетонних конструкцій з урахуванням механічних характеристик бетону, що базуються на гіпотезах і припущеннях теорії механіки деформованого тіла, а також для розв'язання задач, пов'язаних з використанням технічної теорії повзучості бетону. Діаграма, яка відповідає короткочасному режиму навантаження, використовується в розрахунках міцності і тріщиностійкості залізобетонних конструкцій на основі чинних нормативних документів [3].

У випадку короткочасного поступового з витримкою на кожному ступені навантаження в експериментах отримується ступінчаста лінія, яка відображає реальний процес деформування стиснутого зразка – призми. За достатньо великої кількості ступенів навантаження залежність $\sigma_c - \varepsilon_c$ можна відобразити плавною кривою лінією, при цьому зі збільшенням навантаження кривизна діаграми збільшується. Ближче до завершення прикладання навантаження збільшення деформацій бетону відбувається особливо інтенсивно.

Повні деформації у разі короткочасного режиму навантаження складаються з трьох частин. На початку відбуваються непружні деформації, які виникають під час витримки на ступенях навантаження і називаються деформаціями швидкоплинної повзучості. До умовної нижньої межі тріщиноутворення ці деформації переважно обумовлені безпосередньо повзучістю бетону. Надалі на ділянці між нижньою і верхньою межами тріщиностійкості на деформації повзучості накладаються деформації, які пов'язані з розвитком мікротріщиноутворення. Ближче до завершення прикладання навантаження, яке перевищує верхню межу тріщиноутворення,

збільшення непружних деформацій і деформацій швидкоплинної повзучості суттєво пришвидшується, мікроруйнування переходять в макроруйнування і зразок руйнується [Помилка! Джерело посилання не знайдено.].

Зі збільшенням міцності бетону пластичні деформації і деформації швидкоплинної повзучості зменшуються, а діаграма деформування наближається до прямої лінії.

Деформації бетону, які відповідають максимальним напруженням на діаграмі $\sigma_c - \varepsilon_c$, характеризують момент руйнування в умовах навантаження його зростаючим зусиллям.

Інша картина спостерігається у випадку сталого ступеневого збільшення деформацій. У цьому випадку діаграма $\sigma_c - \varepsilon_c$ отримується з екстремумом і низхідною віткою, як для миттєвого, так і короткочасного режимів. Отримання на діаграмі деформування бетону низхідної вітки можливе тільки за наявності спеціального силового обладнання, яке забезпечує випробування бетонних зразків за постійної швидкості приросту деформацій.

Для точного розрахунку і конструювання бетонних і залізобетонних конструкцій необхідно, щоб характеристики матеріалів, з яких вони виготовленні, були визначені якомога точніше. Згідно з чинними нормативними документами ці характеристики визначають за стандартними методиками шляхом випробування стандартних бетонних зразків короткочасним навантаженням в пресовому обладнанні за "м'якого" режиму навантаження, тобто випробуванням з постійним приростом навантаження [3]. В результаті цього можна отримати діаграму деформування лише на висхідній вітці. Далі визначають розрахунковий опір бетону, за яким, використовуючи таблиці, проводять інтерполювання для визначення інших основних параметрів.

Точність розрахунків залізобетонних конструкцій з використанням сучасної деформаційної методики залежить від вибору аналітичної залежності між напруженнями і деформаціями в бетоні $\sigma_c - \varepsilon_c$. Вибір такої залежності наразі достатньо різноманітний. Для побудови діаграм в теорії

залізобетону було використано сплайн-функції, тригонометричні функції та ряди, степеневі, показникові, дробово-раціональні, синусоїдні, лінійні, кусочно-лінійні функції, поліноми 2-го...5-го степенів та інші [3].

3. Механічний стан бетону за дії динамічних навантажень

Бетон є пружно-пластичним матеріалом, який за дії статичних навантажень чітко проявляє свої пластичні властивості. Водночас, за дії динамічних навантажень бетон витримує значні динамічні впливи, при цьому збільшуючи значення міцності за стиску, розтягу або сколюванні, або руйнується.

Вважається, що чим меншою є тривалість дії динамічних навантажень, тим більше значення динамічного опору перевищує значення статичного опору. Така тривалість становить десятки частки секунди або декілька секунд. Якщо за цей час навантаження не зменшиться, то бетон зруйнується. Варто зазначити, що зустрічаються випадки зменшення динамічного опору бетону порівняно зі статичним, але це притаманно крихким високоміцним бетонам і це обов'язково необхідно враховувати, проектуючи склади високоміцних бетонів. Типові діаграми деформування бетону за статичної та динамічної дій навантаження наведено на рис. 2.

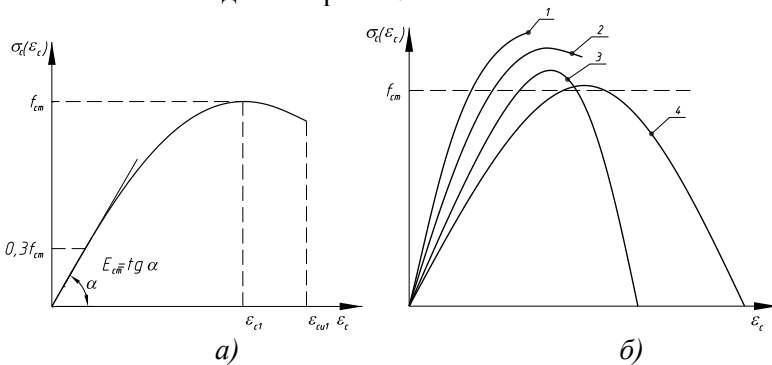


Рис. 2. Типові діаграми деформування бетону за дії навантаження: а) статичного; б) динамічного; 1, 2 - зафіксовано руйнування; 3, 4 - руйнування не зафіксовано

Повні діаграми деформування бетонів та фібробетонів за статичної дії навантаження отримують на спеціальному пресовому обладнанні, приймаючи постійну швидкість зростання деформацій. Існують також теоретично обґрунтовані методи побудови повних діаграм із діаграм, отриманих на звичайному пресовому обладнанні.

Отримати діаграми деформування за дії динамічного навантаження значно важче. Це пов'язано з тим, що процеси за динамічних впливів відбуваються миттєво. Параметри таких діаграм змінюються залежно від швидкості навантаження. В розрахунку конструкцій на динамічну дію навантаження використовують залежність міцності бетону від тривалості навантаження або від швидкості наростання напруження чи деформацій. Залежність міцності бетону від тривалості навантаження визначається швидкістю наростання напружень

$$\dot{\sigma} = \frac{f_d}{\tau}, \quad (5)$$

де $\dot{\sigma}$ – швидкість наростання навантаження, $\text{кг}\cdot\text{с}/\text{см}^2$; τ – тривалість навантаження, с; f_d – відповідний розрахунковий опір бетону, $\text{кг}/\text{см}^2$.

Даний параметр характеризує роботу бетону лише на висхідній ділянці діаграми (див. рис. 2). В багатьох експериментах спостерігається певна затримка в руйнуванні, після досягнення максимальних напружень що підтверджує наявність низхідної ділянки діаграми деформування бетону за дії динамічних навантажень. Приймаючи швидкість наростання деформації постійною, її можна визначити, якщо відомі граничні деформації

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\varepsilon_u}{\tau}, \quad (6)$$

де $\dot{\varepsilon}$ – швидкість наростання деформацій, с^{-1} ; τ – тривалість навантаження, с; ε_u – відповідні граничні деформації бетону.

В окремих дослідах спостерігають певне сповільнення росту деформацій на початку деформування і прискорення наприкінці, але при цьому в розрахунках також використовують середні значення швидкості наростання деформації.

Загалом, розглядають такі динамічні характеристики бетонів та фібробетонів як тріщиностійкість та ударну витривалість або ударну в'язкість.

Роботу, витрачену на руйнування зразка, визначають, використовуючи загальноприйняті поняття потенціальної та кінетичної енергій. Для бетонів та фібробетонів ударну в'язкість визначають залежно від виду напружено-деформованого стану (стиск, розтяг, розколювання). Ударна в'язкість - це якісна характеристика, її не можна використати у розрахунках міцності, але вона дає змогу оцінити особливу властивість матеріалів – схильність до крихкого руйнування в умовах складного напружено-деформованого стану.

Основними міцнісними характеристиками бетону за дії динамічних навантажень є динамічна міцність за стиску, розтягу та розколювання.

Міцнісні характеристики бетону за динамічних впливів прийнято оцінювати за величиною їх відношень до статичних міцнісних характеристик, і ці величини є коефіцієнтами динамічності

$$DEF_c = \frac{f_{cd}}{f_c}, \quad DEF = \frac{f_{td}}{f_t}, \quad (7)$$

де DEF_c , DEF – коефіцієнти динамічності відповідно за стиску та розтягу; f_c , f_t – міцність бетону відповідно за стиску та розтягу за дії статичного навантаження; f_{cd} , f_{td} – міцність бетону відповідно за стиску та розтягу за дії динамічного навантаження.

В окремих випадках міцність бетону за розтягу замінюють міцністю бетону за розколювання, яка дозволяє отримувати більш достовірні дані та значно спростити установки з випробування зразків на динамічні впливи.

Найголовнішими питаннями, які необхідно детально розглянути в умовах прикладання динамічних навантажень є визначення кореляційних зв'язків між міцністю за стиску, розтягу

та розколювання, а також з'ясування залежностей граничних деформацій бетонів різних видів. Детальний розгляд запропонованих питань необхідний у першу чергу для того, щоб продемонструвати більш сучасні підходи до встановлення основних залежностей. Застосування та обґрунтування загально прийнятих гіпотез та поширення їх на динамічні явища, а також порівняння з емпіричними виразами, отриманими для певних умов, значно розширить діапазон задач, безпосередньо пов'язаних з динамічними впливами.

За дії статичних навантажень загальновідомими є формули Коші О.-Л., які дозволяють з достатньою точністю встановлювати значення міцності бетону за різного роду деформацій залежно від міцності за стиску:

- міцність за розтягу під час згину $0,08(10f_c)^{2/3}$;
- міцність зарозколювання $0,055(10f_c)^{2/3}$;
- міцність за осьового розтягу $0,046(10f_c)^{2/3}$;
- міцність за зрізу $0,093(10f_c)^{2/3}$;
- міцність засколювання $0,0162(10f_c)^{2/3}$.

Узагальнюючи вищенаведені залежності, запропоновано формулу для визначення міцності бетону за розтягу

$$f_t = k(10f_c)^{2/3}, \quad (8)$$

де k – коефіцієнт, який залежить від виду бетону, вмісту фібри, крупності заповнювача тощо.

Гіпотезу Коші О.-Л. про справедливість формули **(Помилка! Джерело посилання не знайдено.)**, за дії динамічних навантажень можна записати

$$f_{t,d} = f(f_{c,d}) = k(10f_{c,d})^{2/3}, \quad (9)$$

де $f_{t,d}$ і $f_{c,d}$ – міцності бетону відповідно за розтягу та стиску за дії динамічних навантажень.

Динамічна міцність бетону за стиску

$$f_{c,d} = f_c \times DEF_c, \quad (10)$$

де f_c – міцність бетону за стиску за дії статичного навантаження, DEF_c – коефіцієнт динамічного зміцнення за стиску.

Динамічна міцність бетону за розтягу

$$f_{t,d} = f_t \times DEF, \quad (11)$$

де f_t – міцність бетону за розтягу за дії статичного навантаження, DEF – коефіцієнт динамічного зміцнення за розтягу.

Формули для визначення граничних деформацій бетону $\varepsilon_{c1,d}$ мають вигляд:

$$\begin{cases} \varepsilon_{c1,d} = \left(2,352 - 0,763 \frac{f_{c,d}}{f_c} + 0,01 f_c \right) \times 10^{-3} \text{ якщо } \dot{\varepsilon} > 1,6 \times 10^{-5} \text{ c}^{-1}; \\ \varepsilon_{c1,d} = \left(9,24 - 7,666 \frac{f_{c,d}}{f_c} + 0,01 f_c \right) \times 10^{-3} \text{ якщо } \dot{\varepsilon} < 1,6 \times 10^{-5} \text{ c}^{-1}, \end{cases} \quad (12)$$

або

$$\begin{cases} \varepsilon_{c1,d} = (2,352 - 0,763 \times DEF_c + 0,01 f_c) \times 10^{-3} \text{ якщо } \dot{\varepsilon} > 1,6 \times 10^{-5} \text{ c}^{-1}; \\ \varepsilon_{c1,d} = (9,24 - 7,666 \times DEF_c + 0,01 f_c) \times 10^{-3} \text{ якщо } \dot{\varepsilon} < 1,6 \times 10^{-5} \text{ c}^{-1}. \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} \varepsilon_{cu,d} = \left(0,7 - 75 \left(\frac{f_c}{6,9} \right)^{-0,7} (DEF - 1,38) \right) 10^{-3} \text{ якщо } \dot{\varepsilon} > 1,6 \times 10^{-5} \text{ c}^{-1}; \\ \varepsilon_{cu,d} = \left(0,7 - 41,67 \left(\frac{f_c}{6,9} \right)^{-0,7} (DEF - 1,14) \right) 10^{-3} \text{ якщо } \dot{\varepsilon} < 1,6 \times 10^{-5} \text{ c}^{-1}. \end{cases} \quad (14)$$

Максимально можливі деформації бетону $\varepsilon_{cu,d}$ пропонується також визначати за екстремальним критерієм з урахуванням стійкого руйнування, яке в багатьох випадках задовольняється за величини напружень у бетоні не нижчих за $0,8f_c$. Для розтягнутої зони фібробетонних конструкцій граничні деформації необхідно приймати рівними граничним деформаціям фібри. Для більш точного їх визначення необхідно проводити експериментальні випробування балок на згин із побудовою діаграми деформування за стандартами.

Література

1. ДСТУ Б В.2.7-43-96. Бетони важкі. Технічні умови. Київ : Держкоммістобудування України. 1997. 22 с.
2. Берг О. Я. Физические основы теории прочности бетона и железобетона. М. : Госстройиздат, 1961. 96 с.
3. ДБН В.2.6–98:2009. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення. К. : Мінрегіонбуд України, 2011. 71 с.
4. Високоміцні швидкотверднучі бетони та фібробетони : монографія / Дворкін Л. Й., Бабич Є. М., Житковський В. В., Бордюженко О. М., Філіпчук С. В., Кочкарьов Д. В. Рівне : НУВГП, 2017. 331 с.
5. Баженов Ю. М. Бетон при динамическом нагружении. М. : Стройиздат, 1970. 274 с.