

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

УДК 624.012.044

Панчук Ю. М., к.т.н., доцент, Панчук О. Ю., ст. 4 курсу  
(Національний університет водного господарства та природокористування м. Рівне)

### ДЕСТРУКТИВНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДРІБНОЗЕРНИСТОГО ТА КРУПНОЗЕРНИСТОГО БЕТОНІВ ЗА МАЛОЦИКЛОВИХ НАВАНТАЖЕНЬ

В даній статті наведені результати досліджень деструктивних характеристик дрібнозернистого та крупнозернистого бетонів за малоциклових навантажень середнього і високого рівнів. Побудовані діаграми об'ємного деформування бетонів, дозволяють простежити за тенденцією деформування матеріалу із зростанням кількості циклів навантаження.

**Ключові слова:** бетон, напружено-деформований стан, деформації, малоциклові навантаження.

**Вступ.** При дії зростаючого стискаючого навантаження відбувається зміна об'єму зразка [1]. Спочатку проходить ущільнення бетону, його об'єм зменшується, потім відбувається процес розущільнення матеріалу, розвиток мікротріщин, які об'єднуються утворюють макротріщини, що призводить до руйнування при збільшення об'єму зразка. Зміна об'ємних деформацій обумовлена деструктивними процесами, що проходять в бетоні, а також характеризується граничними рівнями виникнення і розвитку мікро- та макротріщин.

**Аналіз досліджень.** Відносну об'ємну деформацію бетону  $\varepsilon_v$  за короткочасного центрального стиску визначають за формулою

$$\varepsilon_v = \varepsilon_l - 2\varepsilon_{tr}, \quad (1)$$

де  $\varepsilon_l$ ,  $\varepsilon_{tr}$  – відносні поздовжні та поперечні деформації.

Статистична обробка дослідних даних, отриманих [2, 3, 4, 5] свідчить про те, що залежність «напруження – січний модуль пружно-пластичності» ( $\sigma - E'_b$ ) при стисканні бетонних призм, завантажених з постійною швидкістю зростання напружень, можна прийняти лінійною до моменту руйнування бетонного зразка при нелінійній гіпербо-

лічного виду залежності « $\sigma - \varepsilon$ »:

$$E' = \frac{\sigma}{\varepsilon} = E_b - \frac{E_b - E'_R}{R_b} \sigma = E_b \left( 1 - \frac{E_b - E'_R}{R_b} \frac{\sigma}{R_b} \right); \quad (2)$$

$$\frac{E_b - E'_R}{R_b} = \lambda_R = 1 - \nu_R = 1 - \frac{\varepsilon_{el}}{\varepsilon_b^u} = \frac{\varepsilon_{pl}}{\varepsilon_b^u}, \quad (3)$$

де  $\lambda_R$ ,  $\nu_R$  – граничні значення (при  $\sigma = R_b$ ) коефіцієнтів пластичності і пружності;  $\varepsilon_{el}$  – пружні відносні деформації;  $\varepsilon_{pl}$  – відносні деформації швидконатікаючої повзучості;  $\varepsilon_b^u$  – повні відносні деформації

бетону. Після підстановки (3) в (2), враховуючи, що  $\eta = \frac{\sigma}{R_b}$ , залежність (2) набуває такого вигляду:

$$E' = \frac{\sigma}{\varepsilon} = E_b (1 - \lambda_R \eta). \quad (4)$$

**Методика досліджень.** Матеріали, склад дрібнозернистого та крупнозернистого бетонів для витововлення зразків призм, а також методика і результати експериментальних досліджень малоцикловими сти-скаючими навантаженнями наведені в [6].

**Результати досліджень.** В результаті математичної обробки дослідних даних випробування призм здрібнозернистого (ДЗБ) та крупнозернистого (КЗБ-2) бетонів за [7], отримані лінійні рівняння регресії  $E'_{bl} - \eta$ ,  $E'_{btr} - \eta$ :

$$E'_{bl} = \frac{\sigma}{\varepsilon_l} = E_{bl} (1 - \lambda_{lR} \eta); \quad (5)$$

$$E'_{btr} = \frac{\sigma}{\varepsilon_{tr}} = E_{btr} (1 - \lambda_{trR} \eta). \quad (6)$$

Після підстановки (5) і (6) в (1) отримаємо:

$$\varepsilon_v = \frac{R_b \eta}{E_{bl} (1 - \lambda_{lR} \eta)} - 2 \frac{R_b \eta}{E_{btr} (1 - \lambda_{trR} \eta)}. \quad (7)$$

Значення верхнього, нижнього і критичного рівнів утворення і розвитку поздовжніх мікро- і макротріщин відриву визначали математичною обробкою залежності (1) [7], в результаті отримані наступні аналі-

тичні залежності:

$$\eta_{crc}^{low} = \frac{\sqrt[3]{\lambda_{lR} E_{btr}} - \sqrt[3]{2\lambda_{trR} E_{bl}}}{\lambda_{trR} \sqrt[3]{\lambda_{lR} E_{btr}} - \lambda_{lR} \sqrt[3]{2\lambda_{trR} E_{bl}}}, \quad (8)$$

$$\eta_{crc}^{top} = \frac{\sqrt{E_{btr}} - 2\sqrt{2E_{bl}}}{\lambda_{trR} \sqrt{E_{btr}} - \lambda_{lR} \sqrt{2E_{bl}}}, \quad (9)$$

$$\eta_{crc}^{cr} = \frac{E_{btr} - 2E_{bl}}{\lambda_{trR} E_{btr} - 2\lambda_{lR} E_{bl}}, \quad (10)$$

де  $\lambda_{lR}$ ,  $E_{bl}$ ;  $\lambda_{trR}$ ,  $E_{btr}$  – коефіцієнти пластичності і початкові модулі пружності відповідно поздовжніх і поперечних деформацій.

При навантаженнях, що не перевищують  $\eta_{crc}^{low}$  проходить нерівномірно-прискорене ущільнення бетону за рахунок розвитку пластичних деформацій цементного каменю, діаграма  $\varepsilon_v - \eta$  поверннена опуклістю до осі  $\eta$  і при  $\eta_{crc}^{low}$  змінює знак кривизни до осі  $\varepsilon_v$ . При цьому об'ємне деформування за рахунок утворення поздовжніх мікротріщин переходить в нерівномірно-уповільнене. В діапазоні напружень  $\eta_{crc}^{low} < \eta < \eta_{crc}^{top}$  пластичні деформації цементної решітки перевищують деформації, обумовлені розвитком поздовжніх мікротріщин, при цьому відбувається уповільнене ущільнення структури і зменшення об'єму бетону. При  $\eta_{crc}^{top}$  діаграма  $\varepsilon_v - \eta$  змінює свій напрям за рахунок розвитку поздовжніх мікротріщин, тобто переходить з нерівномірно-уповільненого ущільнення і зменшення об'єму в нерівномірно-прискорене розущільнення бетону і збільшення його об'єму. При рівні напружень  $\eta_{crc}^{top}$  відбувається максимальне ущільнення бетону  $\varepsilon_v = \varepsilon_{vmax}$ . При напруженнях в межах  $\eta_{crc}^{top} < \eta < \eta_{crc}^{cr}$  деформації поздовжнього мікротріщиноутворення перевищують лінійні пластичні деформації цементної складової, при цьому відбувається збільшення об'єму  $V$  до початкового  $V_0$ . Мікротріщини накладаються одна на одну і утворюють магістральні макротріщини відриву. За граничного рівня  $\eta_{crc}^{cr}$  об'ємні відносні деформації дорівнюють нулю  $\varepsilon_v = 0$ , цей рівень прийнято вважати якісною межею деструктивного процесу в розвитку напружено-деформованого стану бетону [10].

Підставивши відповідні значення  $E_{bil}$ ,  $\lambda_{ilR}$ ,  $E_{birr}$ ,  $\lambda_{irrR}$ , отримані з дослідно-кореляційних рівнянь регресії для окремого  $i$ -того циклу малоциклового навантаження в залежність (1), визначено об'ємну деформацію бетону  $\mathcal{E}_v$  на  $i$ -тому циклі навантаження.

Характерні діаграми об'ємного деформування ( $\mathcal{E}_v - \eta$ ) дрібно- та крупнозернистого бетонів за малоциклового центрального стиску зі зміною кількості циклів прикладання навантаження  $n_{cyc}$  наведені на рис. 1 а, б. З діаграм об'ємного деформування  $\mathcal{E}_v$ , побудованих за малоциклових стискаючих навантажень високих рівнів ( $\eta = 0,78...0,86$ ) видно, що при збільшенні кількості циклів навантаження  $n_{cyc}$  відбувається поступове від циклу до циклу зменшення значень об'ємного ущільнення. Так, для дрібнозернистого бетону (ДЗБ) (рис. 1, а) значення максимального об'ємного ущільнення, яке на 1-му циклі навантаження склало  $50,0 \times 10^{-5}$ , при дії малоциклових навантажень знизилось і на 2-му та 3-му циклах склало відповідно  $28,6 \times 10^{-5}$  і  $23,7 \times 10^{-5}$ , на 5-му циклі зменшилось до  $12,58 \times 10^{-5}$ , а на 7-му циклі становило  $4,56 \times 10^{-5}$ . В межах з 10-го по 35-й цикли навантажень визначені об'ємні відносні деформації бетону набули від'ємних значень, які зі зростанням кількості циклів мали тенденцію до зменшення. Від'ємні значення величин об'ємного деформування  $\mathcal{E}_v$  свідчать про настання процесів розущільнення структури бетону, які супроводжуються незворотнім збільшенням об'єму бетону  $V$  відносно початкової його величини  $V_0$ . Очевидно в цьому діапазоні циклів навантажень, внаслідок розвитку поздовжніх магістральних мікротріщин відриву, відбувається незворотній процес руйнування бетону.

Значення максимального об'ємного ущільнення  $\mathcal{E}_{vmax}$ , визначене для крупнозернистого бетону (КЗБ2) (рис. 1, б) на 1-му циклі, склало  $41,12 \times 10^{-5}$ , при збільшенні кількості циклів прикладання навантаження відбувається його зниження. Так, на 2-му і 5-му циклах повторного навантаження значення  $\mathcal{E}_{vmax}$  зменшились і склали відповідно  $23,28 \times 10^{-5}$  і  $19,81 \times 10^{-5}$ , а ці ж значення, визначені для 10-го, 20-го і 30-го циклів навантаження становили відповідно  $14,45 \times 10^{-5}$ ,  $7,66 \times 10^{-5}$  і  $5,16 \times 10^{-5}$ . Починаючи з 40-го циклу до руйнування бетону (89 цикл) об'ємні відносні деформації бетону  $\mathcal{E}_v$ , визначені на цих циклах, мають від'ємні значення, зменшую-

чись зі зростанням кількості циклів прикладання навантаження, проходить процес незворотнього розуцільнення і руйнування бетону.

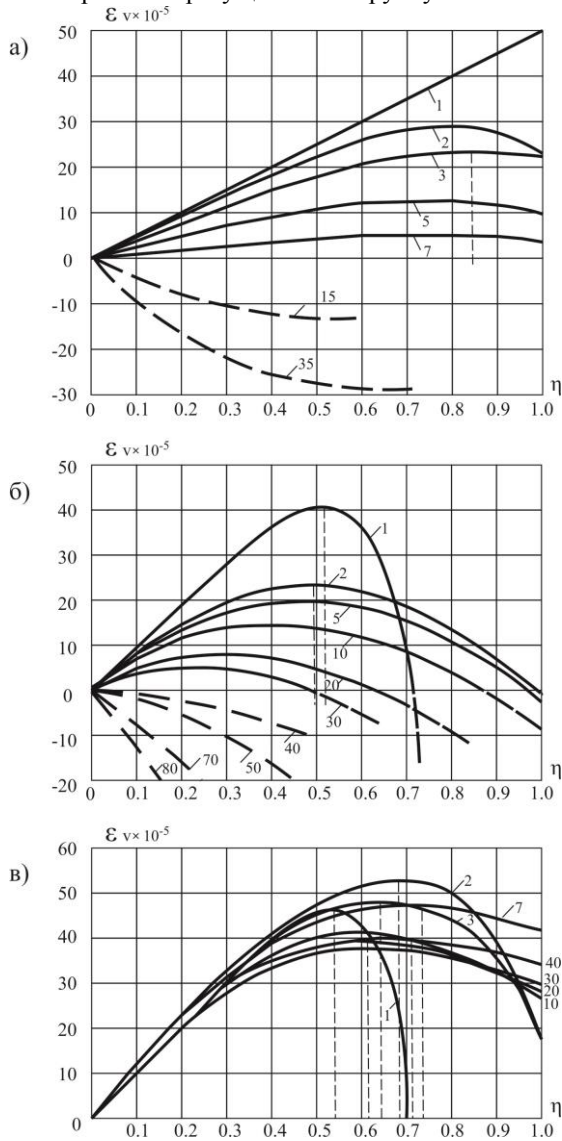


Рис. 1. Діаграми об'ємного деформування бетонів за малоциклового осьового стиснення: а) ДЗБ; б) КЗБ2 ( $\eta = 0,78$ ); в) КЗБ2 ( $\eta = 0,6$ )

Для встановлення більш повної картини об'ємного деформування крупнозернистого бетону (КЗБ2) були проведені експериментальні дослідження бетонних призм на вплив малоциклових навантажень середнього рівня, який приймали рівним  $\eta_i = 0,6$ . Аналіз отриманих в результаті випробувань діаграм об'ємного деформування бетону (рис. 1, в) вказує на те, що значення  $\mathcal{E}_{vmax}$  на перших 5-ти циклах зростають, що свідчить про ущільнення матеріалу. Так, значення максимального об'ємного ущільнення, визначені на 1-му, 2-му і 5-му циклах склали відповідно  $46,5 \times 10^{-5}$ ,  $53,22 \times 10^{-5}$  і  $51,25 \times 10^{-5}$ , при наступному збільшенні кількості циклів прикладання навантаження з 10-го по 40-ий цикли поряд з деяким зменшенням максимального об'ємного ущільнення  $\mathcal{E}_{vmax}$ , спостерігається його стабілізація ( $\mathcal{E}_v = 37,04 \dots 41,58 \times 10^{-5}$ ).

**Висновки.** Отже, верхній рівень малоциклового навантаження впливає на роботу бетону за малоциклових навантажень. Побудовані діаграми об'ємного деформування дозволяють чітко простежити за тенденцією деформування бетону зі зростанням кількості циклів прикладання навантаження. Так, за малоциклових стискаючих навантажень середнього рівня, відбувається ущільнення бетону з наступною стабілізацією об'ємних відносних деформацій, а повторні навантаження високих рівнів призводять до поступового від циклу до цикла розущільнення структури матеріалу і, внаслідок розвитку магістральних мікротріщин відриву, відбувається його руйнування. Тобто, існує такий рівень малоциклового навантаження, при перевищенні якого проходить розущільнення і руйнування бетону, а при навантаженнях менших за цей рівень, відбувається ущільнення матеріалу і стабілізація деформацій. Такий рівень вважають рівнем малоциклової втомленості (пристосованості) матеріалу [8, 9].

1. Берг О. Я. Физические основы теории прочности бетона и железобетона / О. Я. Берг. – М. : Госстройиздат, 1961. – 96 с. 2. Бабич Е. М. Экспериментальное исследование модуля упругости бетонных образцов при различной интенсивности сжимающих нагрузок / Е. М. Бабич, Л. П. Макаренко // Известия вузов. Строительство и архитектура. – 1967. – № 3. – С. 20-27. 3. Макаренко Л. П. Практический способ определения модуля упруго-пластических характеристик бетона при сжатии / Л. П. Макаренко, Г. А. Фенко // Известия вузов. Строительство и архитектура. – 1970. – № 10. – С. 141-147. 4. Макаренко Л. П. Оценка деформаций бетонов с учетом нелинейной ползучести / Л. П. Макаренко // Бетон и железобетон. – 1985. – № 2. – С. 25-26. 5. Макаренко Л. П. Рекомендации по экспериментально-статистической оценке прочностных, дефор-

мативних характеристик бетонов при кратковременном нагружении /Л. П. Макаренко. – Ровно : ООП ВЦ Облмашинформа, 1987. – 17 с. **6.** Панчук Ю. М. Экспериментальні дослідження пружно-пластичних властивостей крупнозернистого бетону за малоциклових навантажень високих рівнів / Ю. М. Панчук // Ресурсоєкономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди : зб. наук. статей. – Рівне, 2012. – Вип 23. – С. 372-377. **7.** Макаренко Л. П. Развитие и углубление существующих представлений о деформациях, деструкции и прочности бетона при сжатии /Л. П. Макаренко // Известия вузов. Строительство и архитектура. – 1988. – № 2. – С. 1-6. **8.** Бабич Е. М. Влияние малоцикловых статических нагружений на прочность тяжелого бетона / Е. М. Бабич, Ю. А. Крусь, Ю. Н. Панчук // Совершенствование строительных материалов, технологий и методов расчета конструкций в новых экономических условиях : тез. докл. междунаrod. научн.-практич. конф. – Сумы, 1994. – С. 168-171. **9.** ГОСТ 23207-78. Соппротивление усталости. Основные термины, определения и обозначения. – М. : Издательство стандартов, 1978. – 48 с. **10.** Голуб А. В. Особенности прочностных и деформативных свойств бетона со шлаком ТЭС и их учет при расчете железобетонных конструкций : автореф. дис. ... канд. техн. наук / А. В. Голуб. – Минск, 1990. – 22 с.

Рецензент: к.т.н., доцент Борисюк О. П. (НУВГП)

---

**Panchuk Y. M., Candidate of Engineering, Associate Professor,  
Panchuk O. Y., Senior Student** (National University of Water  
Management and Nature Resources Use, Rivne)

## **DESTRUCTIVE CHARACTERISTICS OF FINE AND COARSE CONCRETES UNDER LOW-CYCLE LOADINGS**

**The article gives the results of researches of destructive characteristics of fine and coarse concretes under low-cycle loadings high and middle levels. By the built diagrams of volume deformation concrete, we can see the tendencies of deformation the material under increase cycles loadings.**

**Keywords: concrete, the stress-strain state, strain, short cyclic loading concrete.**

---

**Пачук Ю. М., к.т.н., доцент, Панчук О. Ю. студент** (Национальний  
університет водного господарства і природопользования, г. Ровно)

**ДЕСТРУКТИВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕЛКОЗЕРНИСТОГО И КРУПНОЗЕРНИСТОГО БЕТОНОВ ПРИ МАЛОЦИКЛОВЫХ НАГРУЖЕНИЯХ**

**В данной статье приведены результаты исследований деструктивных характеристик мелкозернистого и крупнозернистого бетонов при малоцикловых нагружениях среднего и высокого уровней.**

**Построенные диаграммы объемного деформирования бетонов, позволяют проследить за тенденцией деформирования материала при увеличении циклов приложения нагрузки.**

**Ключевые слова: бетон, напряженно-деформированное состояние, деформации, малоцикловые нагрузки бетона.**