

Панчук Ю. М., к.т.н., доцент, Довбенко В. С., к.т.н., доцент, Дейнека О. Ю., к.т.н., доцент (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне), **Петренко О. В., к.т.н., ст. викл.** (Національний університет «Львівська Політехніка»)

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ МАЛОЦИКЛОВОЇ ВТОМЛЕНОСТІ ЗРАЗКІВ ІЗ ДРІБНОЗЕРНИСТОГО ТА КРУПНОЗЕРНИСТИХ БЕТОНІВ

Проведено детальний аналіз існуючих експериментально-теоретичних досліджень за даною проблематикою. Наведено методику і результати експериментальних досліджень малоциклової втомленості зразків призм, виконаних із дрібнозернистого та крупнозернистих бетонів. Представлені фізико-механічні характеристики матеріалів, з яких були виготовлені дослідні зразки, зерновий склад піску, гранулометричний склад щебеню, клас та вид бетону. Описаний процес приготування кожного виду бетону, виготовлення і зберігання дослідних зразків, методика експериментальних досліджень бетонних зразків малоцикловими навантаженнями-розвантаженнями. Наведені результати випробувань зразків призм, виконаних з дрібнозернистого та крупнозернистих бетонів з фіксацією верхнього та нижнього рівнів циклічного навантаження і кількості циклів прикладання навантаження-розвантаження зразків до їх руйнування. Отримані дрібно-лінійні функції в залежності «верхній рівень циклічного навантаження $\eta_{\text{сус}}$ – кількість циклів до руйнування – $n_{\text{сус}}$, побудовані гіперболічні криві малоциклової втомленості дрібнозернистого та крупнозернистих бетонів, визначені межі малоциклової втомленості кожного виду бетону. Проведений аналіз роботи вказаних бетонів при дії циклічних навантажень високих рівнів.

Ключові слова: дрібнозернистий бетон; крупнозернистий бетон; циклічні навантаження; рівень навантаження; кількість циклів навантаження; малоциклова втомленість.

Вступ. На будівельні конструкції під час експлуатації діють малоциклові навантаження різних рівнів. Внаслідок впливу

циклових навантажень в конструкціях може відбуватись руйнування особливого характеру, при цьому проходить необмежене зростання деформацій матеріалу конструкції при прикладанні повторних навантажень, які не перевищують граничного одноразового навантаження. Тобто під час виконання розрахунків міцності конструкцій на дію малоциклових навантажень одним із пріоритетних завдань є встановлення рівнів та кількості циклів повторних навантажень, при яких буде відбуватися стабілізація деформацій. Під час експлуатації будівельні конструкції та їх елементи можуть сприймати перевантаження, тобто повторні циклічні навантаження будуть перевищувати розрахункові значення. Такі дії, після прикладання певної кількості циклів навантаження, можуть викликати в будівельній конструкції значне зростання пластичних деформацій, а саме набуття граничного стану при впливі повторних циклічних навантажень (малоциклової втомленості).

Аналіз останніх публікацій. В роботах [4; 5; 6; 7] доведено, що зміна структури бетону за рахунок крупності заповнювачів, призводить до зміни рівнів навантажень, які відповідають нижній і верхній межі мікротріщиноутворення. В наведених роботах було досліджено, що крупна фракція, як структурний елемент бетону, є концентратором напружень, викликає виникнення полів напружень на контактній матриці та заповнювача, і саме на цих контактах утворюються мікротріщини [8].

Мета роботи – це експериментально-теоретичні дослідження роботи дрібно- та крупнозернистих бетонів на вплив малоциклових навантажень-розвантажень високих рівнів, визначення межі малоциклової втомленості кожного виду бетону.

Методика експериментальних досліджень. Для більш ґрунтовного вивчення малоциклової втомленості бетонів в науково-дослідній лабораторії кафедри промислового, цивільного будівництва та інженерних споруд були виготовлені та досліджені зразки з важких бетонів на традиційних заповнювачах – «крупнозернистий бетон» (КЗБ-1; КЗБ-2) і зразки, виготовлені з бетону, де в якості заповнювача приймався лише пісок – «дрібнозернистий бетон» (ДЗБ). Передбачалось, що зразки, виконані із дрібнозернистого бетону є більш однорідним матеріалом і результати їх випробувань будуть більш достовірними.

Бетонні зразки були виготовлені із шлакопортландцементу

Здолбунівського цементно-шиферного комбінату класу В 30. Заповнювачем при виготовленні цементно-піщаного бетону (ДЗБ) приймали кварцовий пісок, видобутий в Полянському кар'єрі Славутського району Хмельницької області з модулем крупності $M_{кр} = 1,8...2,2$ і об'ємною масою 1410–1460 кг/м³, пісок був ретельно відмитий від глинистих та пилюватих домішок і висушений. Величини зернового складу піску для дослідних зразків бетонів ДЗБ і КЗБ-1 наведені в таблиці 1.

Таблица 1

Залишки на ситах	Розміри отворів сит (мм)					Пройшло через сито 0,14 мм
	2,5	1,25	0,63	0,315	0,14	
в грамах	-	-	155,4	521,4	312,2	11,0
частинні,%	-	-	15,4	52,14	31,22	1,10
повні,%	-	-	15,4	67,68	98,80	-

Дрібним заповнювачем для зразків бетону КЗБ-2 був прийнятий кварцовий пісок з Костопільського кар'єру с. Любаша Рівненської області. Характеристики піску були визначені відповідно до [1]. Величина модуля крупності піску склала $M_{кр} = 1,18$, насипна вага – 1320 кг/м³, питома вага – 2590 кг/м³. Зерновий склад піску наведений в табл. 2.

Таблица 2

Залишки на ситах	Розміри отворів сит (мм)					Пройшло через сито 0,14 мм
	2,5	1,25	0,63	0,315	0,14	
в грамах	-	4,0	31,0	296,0	484,0	18,5
частинні,%	-	0,4	3,1	29,6	48,4	1,85
повні,%	-	0,4	3,5	33,1	81,5	-

В якості крупного заповнювача в зразках із КЗБ-1 був використаний щебінь гранітний Вирівського кар'єру Сарненського району Рівненської області фракції 5–20 мм, з дробимістю в циліндрі 10,7%, щільністю 33,7%, питоною вагою 1310–1410 кг/м³. Крупним заповнювачем для дослідних зразків призм із бетону КЗБ-2 був прийнятий щебінь Клесівського кар'єру Сарненського району Рівненської області. Характеристики щебеню визначали згідно до [2]. Фракція щебеню Б-20, з найменшою і найбільшою крупністю зерен щебеню відповідно склала 5 і 20 мм. Насипна вага – 1350 кг/м³,

питома вага – 2700 кг/м³, вологість – 0,8%. Гранулометричний склад щебеню наведений в табл. 3.

Таблиця 3

Гранулометричний склад щебеню

Залишки на ситах	Розміри отворів сит (мм)				Пройшло через сито 2,5 мм
	20	10	5	2,5	
в грамах	105	563	255	45	32
частинні,%	10,5	5,63	25,5	4,5	3,2
повні,%	10,5	66,8	92,3	96,8	-

Добавкою для виготовлення зразків з крупнозернистого бетону був прийнятий модифікований «Дофен». Склад бетонів для виготовлення зразків призм наведений в табл. 4.

Таблиця 4

Склад крупнозернистого бетону

Вид бетону	Цемент кг/м ³	Пісок кг/м ³	Щебінь кг/м ³	Вода л/м ³	Добавка л/м ³	Осадка конуса, см
Дрібнозернистий цементно-піщаний (ДЗБ)	400	1500	-	200 В/Ц= =0,5	-	7–8
Крупнозернистий (КЗБ-1)	340	665	1150	150 В/Ц= =0,44	-	7–8
Крупнозернистий (КЗБ-2)	416	464	1280	180 В/Ц= =0,43	24	5–9

Суміш бетону (ДЗБ) виготовляли в умовах лабораторії кафедри. Спочатку перемішували сухі компоненти цементу і піску, далі поступово додавали необхідну кількість води так, щоб усадка конуса була 7–8 см. Суміш бетону (КЗБ-1) виготовляли в бетонному цеху Рівненського ДБК в бетонозмішувачі, об'ємом 1500 л, бетонна суміш (КЗБ-2) була виготовлена на Рівненському заводі залізобетонних конструкцій.

Зразки бетонних призм мали такі розміри: 4x4x16 см – (ДЗБ), 10x10x40 см – (КЗБ-1) і 15x15x60 см – (КЗБ-2), виготовлялись в горизонтальних формах [3]. Бетони призм з ДЗБ і КЗБ-2 ущільнювали на вібростолі лабораторії кафедри, а зразків з бетону КЗБ-1 – на вібромайданчику формовочного цеху ДБК. Тверділи

відформовані зразки, виконані з ДЗБ і КЗБ-2 в металевих формах, покритих вологою тканиною в умовах лабораторії при температурі повітря 16–18° С і відносній вологості 53–71%, твердіння зразків з КЗБ-1 відбувалось в пропарювальній камері заводу ДБК. Після цього зразки з КЗБ-1 і КЗБ-2 діставали з опалубки і перебували в температурно-вологісних умовах лабораторії кафедри, зразки призм з ДЗБ після виймання з форм опалубки міцніли у вологому середовищі на протязі 28 діб, далі зразки зберігались в умовах лабораторії кафедри.

Бетонні призми 4x4x16 см, виконані з ДЗК були випробовані на вплив малоциклових стискаючих навантажень в спеціально виготовленій пружинній установці. Зразки бетонних призм 10x10x40 см з КЗБ-1 і 15x15x60 см з КЗБ-2 досліджували циклічними навантаженнями на гідравлічному пресі П-250 Армавірського заводу. Перед дослідженням призми центрували при навантаженні 0,15–0,20 R_b, намагались досягати при цьому, щоб поздовжні деформації, виміряні на гранях призм, не відрізнялись між собою більш ніж на ±10%. Зразки завантажували до заданого верхнього рівня з постійною швидкістю напружень (0,6±0,2 МПа/с), навантаження прикладали ступенями рівними 10% від очікуваного руйнівного навантаження. На кожному ступені навантаження виконувалась витримка протягом 4–5 хвилин, щоб відбулось виділення пластичних деформацій. Так само ступенями проводилось розвантаження зразків до нижнього рівня, який приймали рівним нулю. Кількість циклів прикладання навантаження на бетонні зразки призм при випробуваннях не обмежували, її фіксували числом циклів, які витримував зразок до свого руйнування. Щоб виключити можливий вплив зростання міцності бетону у часі, випробування зразків виконували у значному віці – 410–536 діб (ДЗБ); 143–178 діб (КЗБ-1); 350–371 і 601 доби (КЗБ-2). При встановленому нижньому рівні навантаження, який був рівний нулю, верхній рівень малоциклового навантаження приймали: для зразків з (ДЗБ) – 0,87–0,96 R_b; з (КЗБ-1) – 0,82–0,95 R_b і з (КЗБ-2) – 0,78–0,88 R_b. Дві призми з КЗБ-2 були випробувані малоцикловими навантаженнями з рівнем навантаження у діапазоні 0–0,6 R_b у віці 598 і 601 доби. При проведенні експериментальних досліджень фіксували: величину верхнього рівня малоциклового навантаження; кількість циклів навантаження – розвантаження до моменту руйнування зразка.

Результати експериментальних досліджень. Результати

випробувань призм, досліджених на малоциклові навантаження наведені в таблиці 5. Для описання формул малоциклової втомленості бетонів дослідних призм була прийнята дрібно-лінійна функція у вигляді залежності $\eta_{\text{сус}} - n_{\text{сус}}$:

для ДЗБ:

$$\eta_{\text{сус}} = 1 - 0,094(n_{\text{сус}} - 1)/(n_{\text{сус}} + 2,499); \quad (1)$$

для КЗБ-1:

$$\eta_{\text{сус}} = 1 - 0,159(n_{\text{сус}} - 1)/(n_{\text{сус}} + 3,606); \quad (2)$$

для КЗБ-2:

$$\eta_{\text{сус}} = 1 - 0,253(n_{\text{сус}} - 1)/(n_{\text{сус}} + 11,490). \quad (3)$$

З отриманих залежностей (1–3) видно, що при граничних значеннях вони набуватимуть фізичного змісту, так при $n_{\text{сус}} \rightarrow \infty$ значення $\eta_{\text{сус}} = 0,906; 0,841$ і $0,747$ відповідатимуть межах малоциклової втомленості відповідно для ДЗБ; КЗБ-1 і КЗБ-2. Малоциклова втомленість бетонів, отримана відповідно до залежностей (1–3) являє собою криву гіперболічного типу в осях координат «рівень напружень $\eta_{\text{сус}}$ – кількість циклів навантаження $n_{\text{сус}}$ », які витримував зразок до руйнування (рисунок).

Таблиця 5

Результати досліджень призм з ДЗБ, КЗБ-1 і КЗБ-2 на малоциклову втомленість

Дрібнозернистий бетон (ДЗБ)		Крупнозернистий бетон (КЗБ-1)		Крупнозернистий бетон (КЗБ-2)	
Верхній рівень малоциклового навантаження $\eta_{\text{тор}}$	Кількість циклів до руйнування $n_{\text{сус}}$	Верхній рівень малоциклового навантаження $\eta_{\text{тор}}$	Кількість циклів до руйнування $n_{\text{сус}}$	Верхній рівень малоциклового навантаження $\eta_{\text{тор}}$	Кількість циклів до руйнування $n_{\text{сус}}$
0,96	6	0,95	7	0,88	31
0,96	6	0,95	3	0,88	16
0,95	4	0,93	5	0,86	21
0,95	2	0,93	2	0,86	16
0,95	5	0,92	7	0,85	18
0,95	11	0,91	8	0,85	12
0,94	13	0,90	14	0,82	25
0,94	18	0,89	7	0,82	42
0,93	23	0,89	16	0,80	32
0,93	5	0,89	3	0,80	26
0,92	5	0,89	31	0,80	22
0,92	5	0,88	24	0,78	64
0,92	2	0,87	8	0,78	76
0,91	5	0,86	17	0,78	89
0,91	2	0,86	43	0,60	40*
0,91	54	0,84	5	0,60	30*
0,90	25	0,82	42		

0,90	>100	0,82	13		
0,88	38	0,82	4		
0,87*	>500				

* зразки свідомо доведені до руйнування

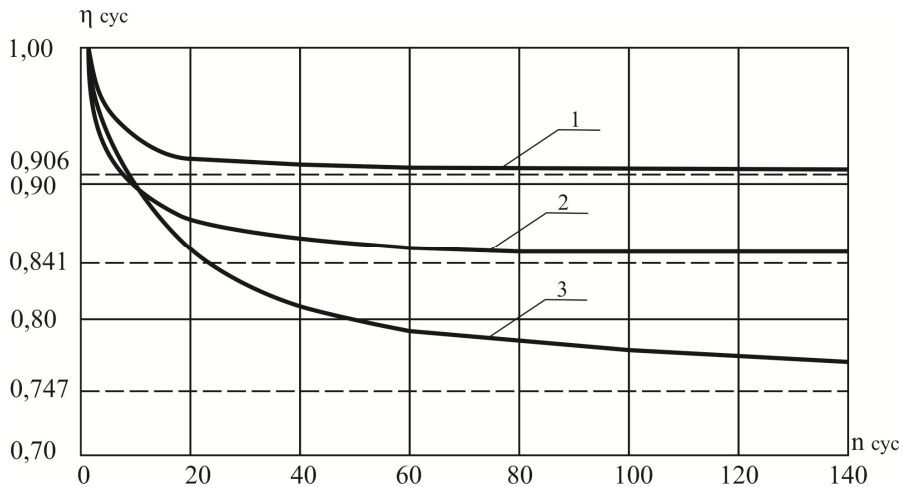


Рисунок. Малоциклова втомленість бетонів ДЗБ (1); КЗБ – 1 (2); КЗБ – 2 (3)

Висновки. 1) Наведено методику виготовлення і експериментальних досліджень зразків призм, виконаних із дрібнозернистого та крупнозернистого бетонів малоцикловими навантаженнями високих рівнів.

2) Отримані дрібно-лінійна функції у вигляді залежності «рівень циклічного навантаження $\eta_{\text{сyc}}$ – кількість циклів навантажень-розвантажень зразка до руйнування $n_{\text{сyc}}$ ».

3) Встановлені межі малоциклової втомленості досліджених бетонів при $n_{\text{сyc}} \rightarrow \infty$ значення $\eta_{\text{сyc}} = 0,906; 0,841$ і $0,747$ відповідно для ДЗБ; КЗБ-1 і КЗБ-2.

4) Побудовані криві гіперболічного типу в осях координат «рівень напружень $\eta_{\text{сyc}}$ – кількість циклів навантаження $n_{\text{сyc}}$ », які витримував зразок до руйнування.

5) Наявність крупного заповнювача в бетонах зразків з КЗБ-1 і КЗБ-2, а також хімічні процеси, що відбуваються в цементній складовій КЗБ-2, обумовлені дією добавки «Дофен» на цементну складову, усадка бетону, знижують межу малоциклової втомленості. Більш однорідна структура матеріалу і відсутність крупного заповнювача в зразках, виконаних з КЗБ, викликають підвищення.

1. ДСТУ Б В. 2.7-232. Пісок для будівельних робіт. Методи випробувань. Київ, 2010. 31 с. 2. ДСТУ Б В. 2.7-71-98. Щебінь і гравій із щільних гірських порід і відходів промислового виробництва для будівельних робіт. Методи фізико-механічних випробувань (ГОСТ 8269.0-97). Київ, 1999. 46 с. 3. ДСТУ Б В. 2.8-38:2011. Форми для виготовлення контрольних зразків бетону. Технічні умови (ГОСТ 22685-89 MOD). Київ, 2011. 47 с. 4. Голуб А. В. Особенности прочностных и деформативных свойств бетона со шлаком ТЭС и их учет при расчете железобетонных конструкций : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Минск, 1990. 22 с. 5. Яшин А. В. О некоторых деформативных особенностях бетона при сжатии. В кн.: *Теория железобетона*. М. : Стройиздат, 1972. С. 131–137. 6. Бабич Е. М., Крусь Ю. А., Панчук Ю. Н. Методика и результаты экспериментальных исследований малоциклового усталости тяжелого бетона. *Совершенствование строительных материалов, технологий и методов расчета конструкций в новых экономических условиях* : тезы докл. межд. науч.-практич. конф. Сумы, 1994. С. 172–173. 7. Бабич Е. М., Крусь Ю. А., Панчук Ю. М. Работа мелкозернистого бетона в условиях малоциклового статического нагружения. *Изв. вузов. Сер. Строительство*. 1995. № 8. С. 26–32. 8. Панчук Ю. М. Експериментальні дослідження пружно-пластичних властивостей крупнозернистого бетону за малоциклових навантажень високих рівнів. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди* : зб. наук. статей. Рівне, 2012. Вип. 23. С. 372–377. 9. Берг О. Я. Физические основы теории прочности бетона и железобетона. М. : Госстройиздат, 1961. 96 с.

REFERENCES:

1. DSTU B V. 2.7-232. Pisok dlia budivelnykh robot. Metody vyprobuvan. Kyiv, 2010. 31 s. 2. DSTU B V. 2.7-71-98. Shchebin i hravii iz shchilnykh hirsykykh porid i vidkhodiv promyslovoho vyrobnytstva dlia budivelnykh robot. Metody fizyko-mekhanichnykh vyprobuvan (HOST 8269.0-97). Kyiv, 1999. 46 s. 3. DSTU B V. 2.8-38:2011. Formy dlia vyhotovlennia kontrolnykh zrazkiv betonu. Tekhnichni umovy (HOST 22685-89 MOD). Kyiv, 2011. 47 s. 4. Holub A. V. Osobennosti prochnostnykh y deformatyvnykh svoistv betona so shlakom TES y ykh uchet pry raschete zhelezobetonnykh konstruktsyi : avtoref. dys. ... kand. tekhn. nauk. Mynsk, 1990. 22 s. 5. Yashyn A. V. O nekotorykh deformatyvnykh osobennostiakh betona pry szhatyy. V kn.: *Teoryia zhelezobetona*. M. : Stroyzdat, 1972. S. 131–137. 6. Babych E. M., Krus Yu. A., Panchuk Yu. N. Metodyka y rezultaty eksperymentalnykh yssledovanyi malotsyklovoi ustalosty tiazheloho betona. *Sovershenstvovanie stroitelnykh materialov, tekhnologii i metodov rascheta konstruktsii v novykh ekonomicheskikh usloviakh* : tezy dokl. mezhd. nauch.-praktich. konf. Sumy, 1994. S. 172–173. 7. Babych E. M., Krus Yu. A., Panchuk Yu. M. Rabota melkozernystoho betona v usloviyakh

malotsyklovoho statycheskoho nahruzheniya. *Yzv. vuzov. Ser. Stroitelstvo*. 1995. № 8. S. 26–32. **8.** Panchuk Yu. M. Eksperymentalni doslidzhennia pruzhno-plastychnykh vlastyvopei krupnozernystoho betonu za malotsyklovykh navantazhen vysokykh rivniv. *Resursoekonomni materialy, konstruktsii, budivli ta sporudy* : zb. nauk. stattei. Rivne, 2012. Vyp. 23. S. 372–377. **9.** Berh O. Ya. Fyzycheskye osnovy teoryy prochnosti betona y zhelezobetona. M. : Hosstroiyzdat, 1961. 96 s.

Panchuk Yu. M., Candidate of Engineering (Ph.D.), Associate Professor, Dovbenko V. S., Candidate of Engineering (Ph.D.), Associate Professor, Deineka O. Yu., Candidate of Engineering (Ph.D.), Associate Professor (National University of Water and Environmental Engineering, Rivne), **Petrenko O. V., Candidate of Engineering (Ph.D.), Senior Lecturer** (Lviv Polytechnic National University)

METHODOLOGY AND RESULTS OF SHORT CYCLE FATIGUE RESEARCH OF SAMPLES MADE OF FINE-GRAINED AND COARSE-GRAINED CONCRETE

A detailed analysis of the existing experimental and theoretical studies on this issue was carried out. The purpose of the work is experimental and theoretical research on the performance of fine- and coarse-grained concrete on the influence of high-level low-cycle loads-unloads, determination of the limit of low-cycle fatigue of each type of concrete. The methodology and results of experimental studies of low-cycle fatigue of prism samples made of fine-grained and coarse-grained concrete are given. The physical and mechanical characteristics of the materials from which the test samples were made, the grain composition of sand, the granulometric composition of crushed stone, the class and type of concrete are presented. The physical and mechanical characteristics of the materials from which the test samples were made, the grain composition of sand, the granulometric composition of crushed stone, the class and type of concrete are presented. The process of preparation of each type of concrete, production and storage of experimental samples, method of experimental studies of concrete samples with low-cycle loading and unloading is described. The results of tests of prism samples made of fine-grained and coarse-grained concrete with fixation of the upper and lower levels of the cyclic load and the number of load-unloading

cycles of the samples before their destruction are presented. Obtained fine-linear functions depending on the "upper level of cyclic loading η_{cyc} – the number of cycles to failure – n_{cyc} , hyperbolic curves of low-cycle fatigue of fine-grained and coarse-grained concretes, determined limits of low-cycle fatigue of each type of concrete. An analysis of the work of the specified persons was carried out. Further experimental and theoretical studies of the performance of concrete will be conducted in this direction.

***Keywords:* fine-grained concrete; coarse-grained concrete; cyclic loads; load level; number of load cycles; low-cycle fatigue.**