

ДЕФОРМУВАННЯ Й РУЙНУВАННЯ ДРІБНОЗЕРНИСТОГО БЕТОНУ В УМОВАХ МАЛОЦИКЛОВИХ НАВАНТАЖУВАНЬ

Крусь Ю.О., к.т.н., доц., Крусь О.Ю., інж.

Національний університет водного господарства та природокористування, Рівне, Україна

Цю статтю слід розглядати як логічне продовження раніше опублікованих у [1] власних методики проведення та результатів експериментально-теоретичних досліджень специфічного характеру деформування й руйнування крупнозернистого бетону (КЗБ) на традиційних щеленевих заповнювачах в умовах статичних малоповторних циклічних навантажувальних високих рівнів.

Отже, особливості поздовжнього й поперечного деформувань та механізм руйнування центрально стисненого бетону при дії малоциклових навантажень вивчали, використовуючи дані про роботу призмових зразків із дрібнозернистого цементно-піщаного бетону (ДЗБ) (див. дослідні зразки ДЗБ-І-2 у табл. 1 публікації [2]). До опрацювання брали лише ті декілька зразків, результати випробувань яких на малоциклову втомленість дають найменшу розбіжність між експериментальними значеннями рівнів циклічної міцності й відповідними теоретичними величинами, обчисленими за формулою (3) у публікації [2], тобто дослідні точки малоциклової втомленості яких найкращим чином “лягають” на розрахункові криві Веллера (див. табл. 2 і рис. 3 у публікації [2]). Інформація про режими випробовування зазначених зразків у м’якорережимних умовах малоциклових навантажувальних (тобто при стандартній швидкості зміни напружень $V_{\sigma} = d\sigma_b/dt = const$ на циклах завантажувальних-розвантажувальних) та експериментальні дані про циклічну довговічність досліджуваного бетону представлені в таблиці.

Для наочності послідовну зміну від циклу до циклу характеристик нелінійного деформування бетону проілюструємо на роботі призмового зразка ДЗБ-101, що при випробуванні витримав максимальну кількість циклів до руйнування ($n_{cyc} = 54$ цикли при $\eta_b^{top} = 0,91$; див. таблицю).

Графіки діаграм $\sigma_b \sim \varepsilon_{b,l(tr)}$ та $E'_{b,l(tr)} = \sigma_b / \varepsilon_{b,l(tr)} \sim \eta_b = \sigma_b / R_{b,cyc}$ при поздовжньому й поперечному деформуваннях бетону (задня розрізнення напрямків деформування в позначеннях застосовуємо індекси відповідно “l” і “tr”) наведені на рис. 1. Прямі лінії залежностей $E'_{b,l(tr)} \sim \eta_b$ побудовані для випадків приведення завантажувальних віток

кривих $\sigma_b \sim \varepsilon_{b,(tr)}$ до одного й того ж самого початку координат, тобто з виключенням залишкових деформацій, накопичених між окремими циклами. Крім того, на рис. 2 представлені зміни сумарних максимальних $\Sigma \varepsilon_{b,max}$ і залишкових $\Sigma \varepsilon_{b,pl}$ деформацій та їхніх поциклових приростів відповідно $\Delta(\Sigma \varepsilon_{b,max})$ і $\Delta(\Sigma \varepsilon_{b,pl})$ при поздовжньому й поперечному деформуваннях.

Режими випробування дослідних зразків статико-повторними малоцикловими навантаженнями та експериментальні дані про циклічну довговічність дрібнозернистого бетону

Шифр дослідної призми	Режим випробування малоцикловими навантаженнями			Кількість циклів до руйнування $N_{сус}$, цикли
	нижній рівень напружень η_b^{hw}	верхній рівень напружень η_b^{top}	характеристика циклу напружень ρ_σ	
ДЗБ-46	0	0,95	0	5
ДЗБ-95	0	0,96	0	6
ДЗБ-54	0	0,95	0	11
ДЗБ-28	0	0,94	0	13
ДЗБ-32	0	0,93	0	23
ДЗБ-101	0	0,91	0	54

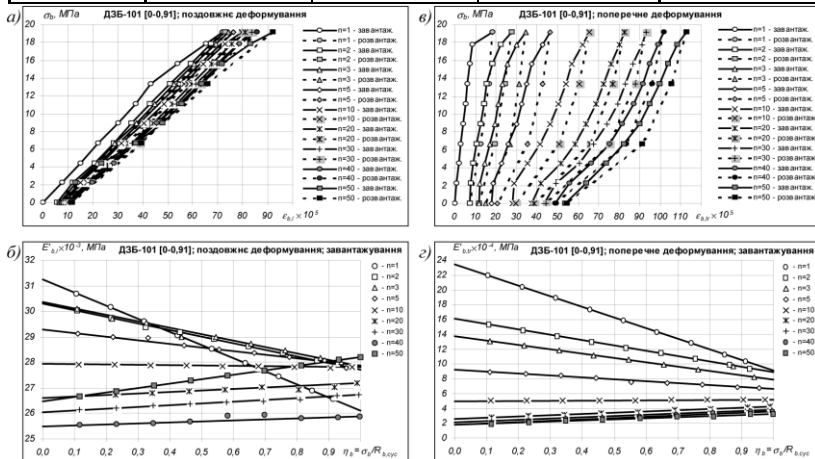


Рис. 1. Поциклові діаграми поздовжнього (а, б) і поперечного (в, г) деформувань дрібнозернистого бетону у координатних осях $\sigma_b \sim \varepsilon_b$ (а, в) і $E'_b \sim \eta_b$ (б, г)

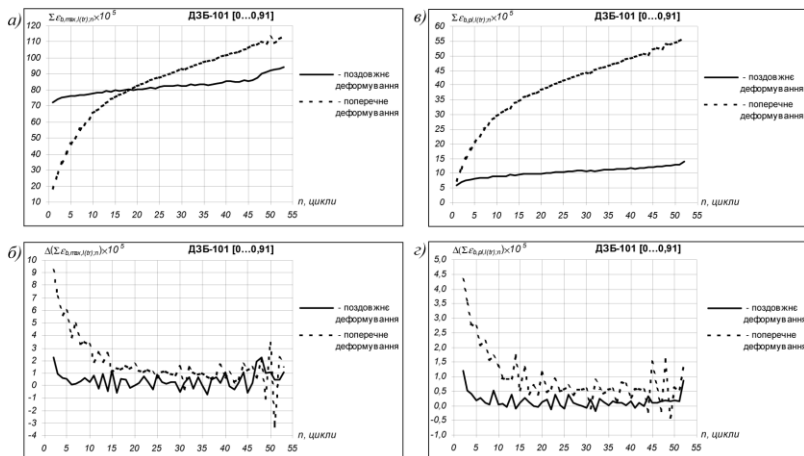


Рис. 2. Зміна сумарних максимальних $\Sigma \varepsilon_{b,max}$ (а) і залишкових $\Sigma \varepsilon_{b,pl}$ (в) відносних деформацій дрібнозернистого бетону та їхніх поциклових приростів відповідно $\Delta(\Sigma \varepsilon_{b,max})$ (б) і $\Delta(\Sigma \varepsilon_{b,pl})$ (г)

Аналіз діаграм $\sigma_b \sim \varepsilon_{b,l(tr)}$ (рис. 1,а,в), $\Sigma \varepsilon_{b,max,l(tr)} \sim n$ (рис. 2,а) і $\Sigma \varepsilon_{b,pl,l(tr)} \sim n$ (рис. 2,в) дозволяє виразно виокремити три послідовні стадії деформування бетону, а саме такі: **стадія I** ущільнення структури; **стадія II** відносної стабілізації деформування; **стадія III** розущільнення структури з наступним руйнуванням матеріалу.

Як бачимо, стадія I відносно протяжна, триваючи з 1-го по 10-й цикл. При цьому сумарні максимальні поздовжні стискаючі та поперечні розтягаючі деформації (рис. 2,а), що на 1-му циклі завантажування складали $\Sigma \varepsilon_{b,max,l;n} = 72,06 \times 10^{-5}$ і $\Sigma \varepsilon_{b,max,tr;n} = 18,45 \times 10^{-5}$, до 10-го циклу зросли відповідно до $77,80 \times 10^{-5}$ і $65,32 \times 10^{-5}$, тобто в 1,08...3,54 рази. Сумарні залишкові деформації (рис. 2,в), маючи після 1-го циклу завантажування-розвантажування значення $\Sigma \varepsilon_{b,pl,l;n} = 5,75 \times 10^{-5}$ і $\Sigma \varepsilon_{b,pl,tr;n} = 7,30 \times 10^{-5}$, після 5-го циклу становлять відповідно $9,01 \times 10^{-5}$ і $29,39 \times 10^{-5}$, збільшившись у 1,57...4,03 рази. Прирости сумарних максимальних поздовжніх і поперечних деформацій (рис. 2,б) від величин $\Delta(\Sigma \varepsilon_{b,max,l;n}) = 2,27 \times 10^{-5}$ і $\Delta(\Sigma \varepsilon_{b,max,tr;n}) = 9,23 \times 10^{-5}$ після 2-го циклу зменшуються відповідно до $0,27 \times 10^{-5}$ і $3,31 \times 10^{-5}$ після 10-го циклу, тобто в 2,79...8,41 рази. Прирости сумарних залишкових поздовжніх і поперечних деформацій (рис. 2,з), складаючи після 2-го циклу відповідно $\Delta(\Sigma \varepsilon_{b,pl,l;n}) = 1,20 \times 10^{-5}$ і $\Delta(\Sigma \varepsilon_{b,pl,tr;n}) = 4,32 \times 10^{-5}$, після 10-го циклу набувають значень відповідно $0,04 \times 10^{-5}$ і $1,38 \times 10^{-5}$, зменшившись у 3,13...30 разів.

Інтенсивне накопичення залишкових деформацій ДЗБ на стадії I супроводжується зменшенням жорсткості бетону та зростанням його

пружних властивостей (рис. 1,б і рис. 1,в відповідно для поздовжнього й поперечного деформувань). Так, початкові модулі пружності при поздовжньому й поперечному деформуваннях бетону, що на 1-му циклі мають значення $E_{b0,l}=31,24 \times 10^3$ і $E_{b0,tr}=23,47 \times 10^4$ МПа, до 10-го циклу зменшуються відповідно до $27,94 \times 10^3$ і $5,01 \times 10^4$ МПа (знижуються в 1,12...4,68 рази); граничні коефіцієнти пластичності, будучи у вихідному стані на 1-му циклі $\lambda_{bR,l}=0,164$ і $\lambda_{bR,tr}=0,611$, набувають значень відповідно 0,005 і -0,030 на 10-му циклі. Як бачимо, $\lambda_{bR,l}$ зменшується в 32,8 рази, а $\lambda_{bR,tr}$, знижуючись, навіть набуває від'ємного значення. Відзначимо особливість, що відрізняє деформування ДЗБ і стосується зміни граничної деформівності $\varepsilon_{bR,l(tr)}$ (для поздовжнього деформування - стисливості, а для поперечного - розтяжності). У той самий час, коли при деформуванні ДЗБ у поздовжньому напрямку гранична стисливість, становлячи на 1-му циклі $\varepsilon_{bR,l}=80,35 \times 10^{-5}$, на 10-му циклі зменшується до $\varepsilon_{bR,l}=70,68 \times 10^{-5}$ (знижується в 1,14 рази), при деформуванні у поперечному напрямку гранична розтяжність має стійку тенденцію до збільшення, змінюючись від $\varepsilon_{bR,tr}=22,96 \times 10^{-5}$ до $\varepsilon_{bR,tr}=38,09 \times 10^{-5}$ (зростає в 1,82 рази) за тих же самих перших 10 циклів стадії I. Упродовж усієї I-ої стадії при поздовжньому деформуванні завантажувальні вітки діаграми $\sigma_b \sim \varepsilon_{b,l}$ обернені до вертикальної осі напружень, розвантажувальні - до горизонтальної осі деформацій (див. рис. 1,а). При поперечному ж деформуванні, тенденції якої від самого початку не відрізнялись від деформування у поздовжньому напрямку, починаючи з 5-го циклу, спостерігаємо появу незначного вигину завантажувальних і відповідних розвантажувальних віток діаграми $\sigma_b \sim \varepsilon_{b,tr}$ до осі деформацій, що помітно зростає до 10-го циклу (див. рис. 1,в).

Виявлені тенденції засвідчують, що для ДЗБ із точки зору фізики процесу під час стадії I має місце ущільнення структури матеріалу за рахунок "вибирання" пластичних деформацій гелевої складової частини цементного каменя та інтенсивного й усебічного мікротріщиноутворення, про що свідчить деформування бетону відповідно у поздовжньому й поперечному напрямках.

Стадія II для ДЗБ триває з 10-го по 46-й цикл повторних навантажувальних і характеризується відносною стабілізацією пластичного деформування. Тут спостерігаємо малопомітне зростання сумарних максимальних поздовжніх деформацій і помітно значно інтенсивніше зростання сумарних максимальних поперечних деформацій (рис. 2,а) від величин $\Sigma \varepsilon_{b,max,l;n}=77,80 \times 10^{-5}$ і $\Sigma \varepsilon_{b,max,tr;n}=65,32 \times 10^{-5}$ на 10-му циклі завантажування відповідно до $85,93 \times 10^{-5}$ і $107,73 \times 10^{-5}$ на 46-му циклі,

тобто в 1,10...1,65 рази. З аналогічною тенденцією змінюються сумарні залишкові поздовжні й поперечні деформації (рис. 2,в), зростаючи від $\Sigma \varepsilon_{b,pl,l;n}=9,01 \times 10^{-5}$ і $\Sigma \varepsilon_{b,pl,tr;n}=29,57 \times 10^{-5}$ після 10-ти циклів завантажування-розвантажування відповідно до $12,20 \times 10^{-5}$ і $52,69 \times 10^{-5}$ після 46-ти циклів, тобто в 1,35...1,78 рази. За майже прямолінійного зростання сумарних максимальних і залишкових деформацій їхні міжциклові прирости змінюються хвилеподібно. Так, прирости сумарних максимальних поздовжніх і поперечних деформацій змінюються у межах $\Delta(\Sigma \varepsilon_{b,max,l;n})=(-0,72...1,18) \times 10^{-5}$ і $\Delta(\Sigma \varepsilon_{b,max,tr;n})=(-0,29...3,31) \times 10^{-5}$ навколо середніх значень відповідно $0,23 \times 10^{-5}$ і $1,24 \times 10^{-5}$ (рис. 2,б), а прирости сумарних залишкових поздовжніх і поперечних деформацій варіюють у діапазонах $\Delta(\Sigma \varepsilon_{b,pl,l;n})=(-0,19...0,38) \times 10^{-5}$ і $\Delta(\Sigma \varepsilon_{b,pl,tr;n})=(-0,21...1,72) \times 10^{-5}$ навколо відповідних середніх величин $0,09 \times 10^{-5}$ і $0,66 \times 10^{-5}$ (рис. 2,з). Як бачимо, тенденції зростання сумарних максимальних і залишкових деформацій у поперечному напрямку помітно інтенсивніші за аналогічні тенденції при поздовжньому деформуванні, а діапазони коливань приростів сумарних максимальних і залишкових деформацій у поперечному напрямку значно ширші за аналогічні межі при поздовжньому деформуванні. Це свідчить, що упродовж стадії II відносно стабільне ущільнення ДЗБ зумовлене, головним чином, повільним руйнуванням структури через утворення й розвиток мікротріщин. Стадії II умовної стабілізації притаманна відносна незмінність більшості основних пружно-пластичних характеристик ДЗБ, про що свідчить близькість розташування графіків поциклових діаграм його деформування у координатних осях $E'_b \sim \eta_b$ (рис. 1,б,з). При цьому з 10-го до 45-го циклу завантажування значення початкових модулів пружності, зберігаючи притаманний стадії I характер зміни, із значно меншою інтенсивністю понижуються від $E_{b0,l}=27,94 \times 10^3$ і $E_{b0,tr}=5,01 \times 10^4$ МПа відповідно до $25,07 \times 10^3$ і $1,72 \times 10^4$ МПа, тобто у 1,11...2,91 рази; величини граничних коефіцієнтів пластичності, зберігаючи набуту на стадії I тенденцію, зменшуються від $\lambda_{bR,l}=0,005$ і $\lambda_{bR,tr}=0,030$ відповідно до $-0,036$ і $-0,998$, тобто в 8,00...27,72 рази; величина зафіксованої при поздовжньому деформуванні граничної стисливості, інтенсивно зменшуючись упродовж I-ої стадії, змінює напрямок, засвідчивши деяке зростання від $\varepsilon_{bR,l}=70,68 \times 10^{-5}$ до $73,70 \times 10^{-5}$, тобто в 1,04 рази; величина притаманної поперечному деформуванню граничної розтяжності, маючи такий самий характер зміни, як і під час стадії I, збільшується від $\varepsilon_{bR,tr}=38,09 \times 10^{-5}$ до $55,72 \times 10^{-5}$, тобто в 1,46 рази.

Слід відзначити, що, маючи однаковий якісний характер, процес трансформування гістерезисних петель при поздовжньому й поперечному деформуваннях ДЗБ відрізняється кількісними показниками. Так,

упродовж більшої частини стадії II кривизна гістерезисних петель при поздовжньому деформуванні за їхньої мінімальної ширини майже відсутня (рис. 1,а), засвідчуючи практичне призупинення приросту пластичних деформацій і наближену до пружної роботу бетону. Лише наприкінці II-ої стадії спостерігаємо дещо більше звичайного зростання сумарних максимальних деформацій $\Sigma \varepsilon_{b,max,l}$, що спричиняє деяке збільшення ширини петель пластичного гістерезису. Завантажувальні вітки поздовжнього деформування (тобто діаграм $\sigma_b \sim \varepsilon_{b,l}$) мають малопомітне S-подібне окреслення з незначним вигинанням за напрямком до осі деформацій на початкових ступенях завантажування й подальшою зміною кривизни опуклістю до осі напружень при більш високому рівні навантаження; розвантажувальні вітки зберігають практично прямолінійну форму. Поперечне деформування, виразне окреслення петлі пластичного гістерезису якого сформувалось ще наприкінці I-ої стадії деформування (після перших 10-ти циклів), характеризується поступовим зменшенням ширини гістерезисної петлі. Завантажувальні вітки поперечного деформування (тобто діаграм $\sigma_b \sim \varepsilon_{b,tr}$), що із входженням у стадію II мали початковий вигин у бік осі напружень, наприкінці стадії набувають S-подібного окреслення з незначним вигинанням за напрямком до осі деформацій. Розвантажувальні ж вітки упродовж усієї стадії вигинаються до осі деформацій, причому кут їхнього нахилу у місці перетину із зазначеною віссю із збільшенням кількості циклів зменшується. Сам факт наявності хоча й незначних змін при поперечному деформуванні (на відміну від поздовжнього деформування, при якому усі зміни, практично, призупинились) засвідчує, що ущільнення матеріалу триває та відбувається за рахунок структурного руйнування - усебічного утворення й розвитку мікротріщин.

Висновок

Комплексний аналіз виявлених ознак засвідчує, що основним фізичним процесом упродовж деформування ДЗБ на II-ій стадії є перерозподіл зусиль із більш напружених місць на місця менш напружені та вирівнювання поля напружень між структурними компонентами бетону (цементною матрицею і дрібним заповнювачем) переважно за рахунок розвитку мікротріщин відриву, початково утворених ще на попередній стадії, у поздовжньому й поперечному напрямках. Про всебічний характер утворення й розвитку тріщин свідчить факт обертання завантажувальних віток кривих $\sigma_b \sim \varepsilon_{b,l(tr)}$ на початкових ступенях силового впливу (рис. 1,а,в) опуклістю до осі деформацій. Очевидно, що до початку останньої III-ої стадії деформування ДЗБ являє собою розпушений в усіх напрямках матеріал, пронизаний розвиненими поз-

довжніми й поперечними мікротріщинами. За останні 8 циклів завантажувань-розвантажувань (із 46-го до 54-го циклу) спостерігаємо більш інтенсивне, ніж мало місце під час стадії II, зростання сумарних максимальних поздовжніх стискаючих і поперечних розтягаючих деформацій (рис. 2,а) від величин $\Sigma \varepsilon_{b,max,l;n}=85,93 \times 10^{-5}$ і $\Sigma \varepsilon_{b,max,tr;n}=107,73 \times 10^{-5}$ на 46-му циклі відповідно до $97,80 \times 10^{-5}$ і $114,48 \times 10^{-5}$ на 54-му циклі, тобто в 1,06...1,14 рази. У цей же самий час збільшуються сумарні залишкові поздовжні й поперечні деформації (рис. 2,б) від $\Sigma \varepsilon_{b,pl,l;n}=12,20 \times 10^{-5}$ і $\Sigma \varepsilon_{b,pl,tr;n}=52,69 \times 10^{-5}$ відповідно до $14,41 \times 10^{-5}$ і $56,84 \times 10^{-5}$, тобто в 1,08...1,18 рази. Як бачимо з рис. 2,а,б, загалом по відношенню до 1-го циклу сумарні деформації $\Sigma \varepsilon_{b,max,l(tr);n}$ і $\Sigma \varepsilon_{b,pl,l(tr);n}$ на останньому 54-му циклі зросли відповідно в 1,36...6,21 і 2,51...7,79 рази. Значне розширення діапазонів коливань приростів сумарних максимальних і залишкових поздовжніх і поперечних деформацій (рис. 2,б,в) у порівнянні з аналогічними змінами під час попередньої II-ої стадії відповідно до $\Delta(\Sigma \varepsilon_{b,max,l;n})=(0,22...3,66) \times 10^{-5}$ і $\Delta(\Sigma \varepsilon_{b,max,tr;n})=(-3,27...3,40) \times 10^{-5}$ та $\Delta(\Sigma \varepsilon_{b,pl,l;n})=(0,09...0,86) \times 10^{-5}$ і $\Delta(\Sigma \varepsilon_{b,pl,tr;n})=(-0,42...1,60) \times 10^{-5}$ вказує на “розхитування” структури бетону та її розуцільнення, причому значно більшою мірою - за рахунок всебічного утворення й розвитку мікротріщин, про що засвідчують помітно інтенсивніші зміни в бетоні при поперечному деформуванні.

Безсистемність зафіксованих показників виміральної апаратури на завершальній III-ій стадії роботи ДЗБ не дає можливості проаналізувати поциклові зміни параметрів $E_{b0,l(tr)}$; $\lambda_{bR,l(tr)}$ і $\varepsilon_{bR,l(tr)}$. Очевидно, такий стан бетону слід вважати нестабільним. Його супроводжує інтенсивне об'єднання розвинених мікротріщин у протяжні видимі на око поверхневі макротріщини, які після їхнього значного розкриття спричиняють швидке руйнування розпушеної структури матеріалу зразка.

На відміну від одноразового стиснення, коли досліджуваний призмий зразок із ДЗБ руйнується внаслідок супроводжуваного характерним клацанням (звуку розтріскування) крихкого розділення його наскрізними вертикальними макротріщинами на 2 або 4 практично однакових призматичних блоки, руйнування бетону після дії малоциклових навантажень має гучний крихкий вибухоподібний характер, а від бетону у переважній кількості випадків залишається лише невелика купка дуже дрібних уламків повністю розтрощеного матеріалу.

Треба сказати, що тристадійність є загальним випадком роботи бетону при дії малоциклових навантажень, причому тривалість кожної зі стадій залежить від верхнього (максимального) рівня змінного напруження циклу $n_b^{top} = n_{b,max}$. Так, усі призми з ДЗБ, що випробувані при

$\eta_b^{top} = 0,91 \dots 0,96$ і незмінній характеристиці циклу напружень $\rho_\sigma = 0$ (див. таблицю), проходять повністю три стадії деформування (рис. 3). Стадія I при цьому триває 2...4 цикли, стадія II - 2...16 циклів, стадія III - 1...8 циклів. Лише в одному випадку призма із ДЗБ, що піддавалася максимальному змінному напруженню циклу з рівнем $\eta_b^{top} = 0,95$, після характерного досить усталеного деформування в стадії II неочікувано зазнає миттєвого руйнування, засвідчуючи настання III-ої стадії. Відзначимо, що в більшості випадків для ДЗБ стадія II умовної стабілізації деформування, якщо вона має місце, є найпротяжнішою.



Рис. 3. Тривалість окремих стадій (I, II і III) деформування дрібнозернистого бетону залежно від режиму випробувань дослідних призмових зразків в умовах малоциклових навантажувальних центрального стиснення до руйнування

Summary

Are submitted the results of research of a physical nature of deforming and destruction of fine-grained concrete in conditions of the low-cyclic loadings, giving bases mathematically to simulate the deduced processes and allowing to take into account the considered force influences at designing of concrete and reinforce-concrete constructions.

1. Крусь Ю.О., Крусь О.Ю. Деформування й руйнування бетону в умовах повторних малоциклових навантажувальних//Будівельні конструкції: Міжвід. наук.-техн. зб. - Київ: НДІБК, 2011. - Вип. 74. Кн. 1. - С. 629-639. 2. Крусь Ю.А. Малоцикловая усталость бетона при сжатии и растяжении в феноменологической постановке//Бетон и железобетон в Украине. - 2009. - № 3(49). - С. 8-17.