

УДК 691.327.539.434

Закономерности деформирования и усталостного разрушения бетона в условиях статических малоцикловых нагружений центральной сжатием

Крусь Ю. А., канд. техн. наук

Національний університет водного господарства та природопольовання, Україна

Аннотация. Большинство строительных объектов в реальных условиях эксплуатации подвержены воздействию близких к разрушающим малоцикловым нагрузкам высокой интенсивности (сейсмических, снеговых, ветровых, транспортных и т. п.), которые вызывают специфическое деформирование высоконагруженных нелинейно деформируемых материалов (бетона, железобетона и др.). Это может привести к преждевременному снижению долговечности материалов и конструкций, а часто – к их непредвиденному и стремительному усталостному разрушению. Таким образом, затронутая проблема требует всестороннего и тщательного изучения и последующего учёта указанных факторов в практике проектирования. В представленной работе получены графические и им соответствующие математические зависимости основных прочностных и деформативных параметров мелкозернистого (цементно-песчаного) и крупнозернистого (на обычных заполнителях) бетонов в условиях высокоуровневых статических малоцикловых нагружений центральной сжатием. Их применение позволяет прогнозировать наступление малоцикловой усталости бетона, а также оценивать фактическое напряжённо-деформированное состояние сечений бетонных и железобетонных элементов на произвольных циклах нагружений вплоть до усталостного разрушения.

Ключевые слова: малоцикловые нагрузки высокой интенсивности, бетон, малоцикловая усталость, деформативные параметры, циклические диаграммы деформирования.

Введение. Ранее [1] была раскрыта природа малоцикловых статических нагрузок, определено их место в общем комплексе силовых воздействий на конструкции, здания и сооружения, описаны труднопрогнозируемые, неожиданные, стремительно происходящие и тяжёлые последствия (вплоть до аварий строительных объектов, верно запроектированных в соответствии с действующими нормами), к которым такого рода нагружения могут привести. К месту отметим недавнее частичное обрушение Шулявского железобетонного путепровода в г. Киеве, происшедшее 27 февраля 2017 г. (к счастью – без жертв), которое, по мнению специалистов, как раз и является классическим примером указанных аварий.

В статье [2] опубликованы результаты изучения механизма деформирования и усталостного разрушения центрально сжатого бетона в условиях близких к разрушающим высоким уровней малоцикловых статических нагружений, базирующиеся на данных собственных экспериментальных исследований [3] малоцикловой усталости мелкозернистого цементно-песчаного бетона (МЗБ)

и крупнозернистого бетона (КЗБ) на традиционных заполнителях. Также в публикациях [2, 3] представлена информация о режимах испытания стандартных призматических образцов из бетона на нижнем и верхнем относительных уровнях переменных напряжений, соответственно $\eta_b^{low} = \eta_{b,min}$ и $\eta_b^{top} = \eta_{b,max}$, а также о характеристике цикла напряжений $\rho_\sigma = \sigma_{b,min} / \sigma_{b,max}$, изложена методика их испытания, построения кривых малоциклового усталости бетона $\eta_{b,cyc} = R_{b,cyc} / R_b \sim n$ и определения его основных деформативных характеристик (модуля упругости $E_{b0,n}$, предельных коэффициентов упругости $\nu_{bR;n}$ и пластичности $\lambda_{bR;n}$, предельной сжимаемости $\varepsilon_{bR;n}$ и суммарной остаточной деформации $\sum \varepsilon_{b,pl;n}$) на произвольных n -ых циклах нагружения.

В продолжение выше изложенного данная статья посвящена математическому моделированию ранее описанных физических процессов [2, 3] для возможности их учёта при проектировании бетонных и железобетонных конструкций, эксплуатируемых в условиях рассматриваемых малоциклового нагружения.

Основная часть. Для большей наглядности, удобства при технической обработке и последующем практическом применении экспериментальные данные, фиксирующие влияние малоциклового нагружения на качественный и количественный характер деформирования и усталостного разрушения исследуемых бетонов в условиях центрального сжатия, проиллюстрированы на рис. 1–4 графиками междуциклового изменения основных деформативных параметров в виде относительных величин $E_{b0,l(tr);n} / E_{b0,l(tr);n=1}$, $\lambda_{bR,l(tr);n} / \lambda_{bR,l(tr);n=1}$, $\varepsilon_{bR,l(tr);n} / \varepsilon_{bR,l(tr);n=1}$ и $\sum \varepsilon_{b,pl,l(tr);n} / \varepsilon_{b,pl,l(tr);n=1}$ (здесь для различия продольного и поперечного направлений деформирования в обозначениях применяем нижние индексы соответственно “ l ” и “ tr ”). Иначе такие графические зависимости называют *циклическими диаграммами деформирования* материалов [4–9]. Отметим, что в обработку для каждой конкретной призмы брали лишь те опытные точки, которые отвечают этапу устойчивого деформирования соответствующего бетона на стадиях I и II (см. рис. 7 в публикации [2]).

Таблиця 1
Исследуемые параметры “у” и структура математических зависимостей вида $y=f(n)$ для аппроксимации циклических диаграмм деформирования бетона

Исследуемые параметры “у”	Структура зависимостей вида $y=f(n)$ для разных направлений деформирования бетона	
	продольное деформирование (“I”)	поперечное деформирование (“II”)
Мелкозернистый цементно-песчаный бетон (МЗБ)		
$E_{\delta 0,j}(\sigma)_{j,n} / E_{\delta 0,j}(\sigma)_{j,n-1}$	$y = l - a_{2,j}(\sigma) \frac{n-1}{n + b_{2,j}(\sigma)}$	(1)
$\lambda_{\delta R,j}(\sigma)_{j,n} / \lambda_{\delta R,j}(\sigma)_{j,n-1}$	$y = l - a_{3,j}(\sigma) \frac{n-1}{n + b_{3,j}(\sigma)}$	(2)
$\varepsilon_{\delta R,j}(\sigma)_{j,n} / \varepsilon_{\delta R,j}(\sigma)_{j,n-1}$	(3) $y = n \cdot \left(l - a_{4,j} \frac{n-1}{n - b_{4,j}} \right)$	(4)
$\Sigma \varepsilon_{\delta, p,i,j}(\sigma)_{j,n} / \Sigma \varepsilon_{\delta, p,i,j}(\sigma)_{j,n-1}$	$y = n \cdot \left(l - a_{5,j}(\sigma) \frac{n-1}{n + b_{5,j}(\sigma)} \right)$	(5)
Крупнозернистый бетон на обочинных заполнителях (КЗБ)		
$E_{\delta 0,j}(\sigma)_{j,n} / E_{\delta 0,j}(\sigma)_{j,n-1}$	$y = l - a_{2,j}(\sigma) \frac{n-1}{n + b_{2,j}(\sigma)}$	(6)
$\lambda_{\delta R,j}(\sigma)_{j,n} / \lambda_{\delta R,j}(\sigma)_{j,n-1}$	$y = n \cdot \left(l - a_{3,j}(\sigma) \frac{n-1}{n - b_{3,j}(\sigma)} \right)$	(7)
$\varepsilon_{\delta R,j}(\sigma)_{j,n} / \varepsilon_{\delta R,j}(\sigma)_{j,n-1}$	$y = n \cdot \left(l - a_{4,j}(\sigma) \frac{n-1}{n - b_{4,j}(\sigma)} \right)$	(8)
$\Sigma \varepsilon_{\delta, p,i,j}(\sigma)_{j,n} / \Sigma \varepsilon_{\delta, p,i,j}(\sigma)_{j,n-1}$	$y = n \cdot \left(l - a_{5,j}(\sigma) \frac{n-1}{n + b_{5,j}(\sigma)} \right)$	(9)

Примечание. В выражениях (1)–(9) $a_{2...5,j}(\sigma)$ – постоянные эмпирические коэффициенты, определяемые из условий минимума квадратичных абсолютных отклонений опытных точек (ε_{exp}) от соответствующих точек теоретических кривых ($\varepsilon_{\text{calc}}$); n – текущее число циклов нагружений.

Таблица 2

**Численные значения постоянных эмпирических коэффициентов
и статистические характеристики зависимостей (1)...(9)**

Шифр прямой	Исследуемый параметр	Продольное деформирование ("T")						Поперечное деформирование ("tr")							
		Постоянные коэффициенты		Статистические характеристики по нор- мальным вариационным рядам y_i^{exp}/y_i^{calc}				Постоянные коэффициенты		Статистические характеристики по нор- мальным вариационным рядам y_i^{exp}/y_i^{calc}					
		a_l	b_l	n, шт.	M	$\pm\sigma \times 10^2$	V, %	P, %	a_{tr}	b_{tr}	n, шт.	M	$\pm\sigma \times 10^2$	V, %	P, %
Мелкозернистый цементно-песчаный бетон (МЗБ)															
МЗБ-46 [0-0,95]	$E_{b0,l}(r)/E_{b0,l}(r)_{n=1}$	0,319	8,879	4	0,9999	0,3805	0,38	0,19	0,967	-0,165	4	1,0000	0,0863	0,09	0,04
	$\lambda_{bR,l}(r)/\lambda_{bR,l}(r)_{n=1}$	0,175	1,372	4	0,9991	4,8348	4,83	2,42	7,112	56,648	4	0,9945	7,3737	7,37	2,69
	$\varepsilon_{bR,l}(r)/\varepsilon_{bR,l}(r)_{n=1}$	0,995	0,063	4	0,9999	0,2827	0,28	0,14	0,464	2,894	4	1,0160	6,0000	5,94	2,97
	$\Sigma \varepsilon_{b,pl}(r)/\Sigma \varepsilon_{b,pl}(r)_{n=1}$	1,000	0,132	3	1,0000	0,1046	0,10	0,06	-0,028	-0,990	3	1,0230	7,2000	7,06	4,07
МЗБ-95 [0-0,96]	$E_{b0,l}(r)/E_{b0,l}(r)_{n=1}$	0,422	3,761	4	0,9996	0,8531	0,85	0,43	0,532	6,705	4	1,0000	0,1869	0,19	0,09
	$\lambda_{bR,l}(r)/\lambda_{bR,l}(r)_{n=1}$	2,744	0,227	4	1,0311	17,376	17,38	8,69	1,292	-0,339	4	0,9988	3,9858	3,99	2,00
	$\varepsilon_{bR,l}(r)/\varepsilon_{bR,l}(r)_{n=1}$	0,975	0,188	4	1,0002	0,9260	0,93	0,46	0,966	-0,284	4	0,9998	0,6302	0,63	0,32
	$\Sigma \varepsilon_{b,pl}(r)/\Sigma \varepsilon_{b,pl}(r)_{n=1}$	0,821	0,134	4	0,9980	3,8511	3,85	1,93	0,959	0,091	4	1,0009	5,3782	5,38	2,69
МЗБ-54 [0-0,95]	$E_{b0,l}(r)/E_{b0,l}(r)_{n=1}$	0,127	-0,176	9	0,9999	0,4801	0,48	0,16	1,056	0,092	9	0,9952	13,250	13,25	4,42
	$\lambda_{bR,l}(r)/\lambda_{bR,l}(r)_{n=1}$	1,376	-0,580	9	0,9990	7,1625	7,17	2,39	189,4	130,59	9	0,9974	12,577	12,61	4,20
	$\varepsilon_{bR,l}(r)/\varepsilon_{bR,l}(r)_{n=1}$	1,000	0,102	9	1,0000	0,1747	0,17	0,06	0,815	0,273	9	0,9983	2,0005	2,00	0,67
	$\Sigma \varepsilon_{b,pl}(r)/\Sigma \varepsilon_{b,pl}(r)_{n=1}$	0,911	0,339	9	1,0000	1,0139	1,01	0,34	0,933	4,704	9	0,9980	1,5910	1,59	0,53
МЗБ-28 [0-0,94]	$E_{b0,l}(r)/E_{b0,l}(r)_{n=1}$	0,254	-0,277	9	1,0002	0,7304	0,73	0,24	0,879	0,168	9	0,9989	3,1672	3,17	1,06
	$\lambda_{bR,l}(r)/\lambda_{bR,l}(r)_{n=1}$	1,668	-0,294	9	0,9978	5,7327	5,75	1,92	3,021	1,949	9	1,0090	7,8885	7,89	2,63
	$\varepsilon_{bR,l}(r)/\varepsilon_{bR,l}(r)_{n=1}$	0,999	0,152	9	1,0003	0,5029	0,50	0,17	0,961	-0,368	9	1,0006	3,2595	3,26	1,09
	$\Sigma \varepsilon_{b,pl}(r)/\Sigma \varepsilon_{b,pl}(r)_{n=1}$	0,989	0,035	11	1,0000	0,2392	0,24	0,07	0,909	0,363	11	1,0002	1,5453	1,55	0,47
МЗБ-32 [0-0,93]	$E_{b0,l}(r)/E_{b0,l}(r)_{n=1}$	0,198	3,350	11	0,9999	0,4107	0,41	0,12	0,960	0,370	11	1,0064	8,2191	8,22	2,48
	$\lambda_{bR,l}(r)/\lambda_{bR,l}(r)_{n=1}$	1,666	1,468	11	0,9980	6,1420	6,15	1,86	1,592	2,874	11	0,9987	0,3842	0,38	0,12
	$\varepsilon_{bR,l}(r)/\varepsilon_{bR,l}(r)_{n=1}$	1,000	0,066	11	1,0000	0,2611	0,26	0,08	0,822	1,798	11	0,9709	7,9066	7,91	2,38
	$\Sigma \varepsilon_{b,pl}(r)/\Sigma \varepsilon_{b,pl}(r)_{n=1}$	0,878	0,013	19	0,9996	1,1147	1,11	0,26	-2,582	-0,677	19	1,0033	1,3567	1,36	0,31
МЗБ-101 [0-0,91]	$E_{b0,l}(r)/E_{b0,l}(r)_{n=1}$	0,247	11,829	16	0,9999	0,8610	0,86	0,22	0,976	1,196	16	0,9924	6,7953	6,80	1,70
	$\lambda_{bR,l}(r)/\lambda_{bR,l}(r)_{n=1}$	1,257	2,068	16	0,9981	6,1895	6,20	1,55	3,989	20,265	16	0,9984	9,3293	9,34	2,34
	$\varepsilon_{bR,l}(r)/\varepsilon_{bR,l}(r)_{n=1}$	0,999	0,138	16	0,9999	0,5080	0,51	0,13	0,971	0,290	16	1,0059	6,8767	6,88	1,72
	$\Sigma \varepsilon_{b,pl}(r)/\Sigma \varepsilon_{b,pl}(r)_{n=1}$	0,986	0,504	45	1,0003	1,1589	1,16	0,17	0,931	3,790	45	1,0038	2,3109	2,31	0,34
Крупнозернистый бетон на обычных заполнителях (КЗБ)															
КЗБ-28 [0-0,95]	$E_{b0,l}(r)/E_{b0,l}(r)_{n=1}$	0,378	-0,873	2	1,0000	0,0000	0,00	0,00	0,382	-0,454	2	1,0000	0,0000	0,00	0,00
	$\lambda_{bR,l}(r)/\lambda_{bR,l}(r)_{n=1}$	0,891	0,862	2	1,0000	0,0000	0,00	0,00	0,723	0,898	2	1,0000	0,0000	0,00	0,00
	$\varepsilon_{bR,l}(r)/\varepsilon_{bR,l}(r)_{n=1}$	0,890	0,473	2	1,0000	0,0000	0,00	0,00	0,595	1,001	2	1,0000	0,0000	0,00	0,00
	$\Sigma \varepsilon_{b,pl}(r)/\Sigma \varepsilon_{b,pl}(r)_{n=1}$	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
КЗБ-36 [0-0,91]	$E_{b0,l}(r)/E_{b0,l}(r)_{n=1}$	0,549	-0,707	5	1,0005	0,0091	0,91	0,41	0,547	-0,688	5	1,0010	0,0161	1,61	0,72
	$\lambda_{bR,l}(r)/\lambda_{bR,l}(r)_{n=1}$	0,986	0,825	5	0,9931	0,2245	22,45	10,04	0,977	0,687	5	0,9972	0,0879	8,79	3,93
	$\varepsilon_{bR,l}(r)/\varepsilon_{bR,l}(r)_{n=1}$	0,958	0,515	5	0,9994	0,0200	2,00	0,89	0,964	0,760	5	1,0000	0,0235	2,35	1,05
	$\Sigma \varepsilon_{b,pl}(r)/\Sigma \varepsilon_{b,pl}(r)_{n=1}$	0,842	0,428	5	0,9976	0,0320	3,20	1,43	0,931	0,164	5	0,9999	0,0110	1,10	0,49
КЗБ-39 [0-0,89]	$E_{b0,l}(r)/E_{b0,l}(r)_{n=1}$	0,227	-0,701	9	0,9992	0,0041	0,41	0,13	0,112	-0,385	9	0,9990	0,0094	0,94	0,31
	$\lambda_{bR,l}(r)/\lambda_{bR,l}(r)_{n=1}$	0,973	0,830	9	1,0004	0,0729	7,29	2,43	0,987	0,601	9	0,9991	0,0256	2,56	0,85
	$\varepsilon_{bR,l}(r)/\varepsilon_{bR,l}(r)_{n=1}$	0,985	0,379	9	1,0001	0,0091	0,91	0,30	0,991	0,442	9	1,0001	0,0048	0,48	0,16
	$\Sigma \varepsilon_{b,pl}(r)/\Sigma \varepsilon_{b,pl}(r)_{n=1}$	0,963	0,569	12	0,9997	0,0131	1,31	0,38	1,000	0,349	12	0,9997	0,0131	1,31	0,38
КЗБ-40 [0-0,88]	$E_{b0,l}(r)/E_{b0,l}(r)_{n=1}$	0,129	2,081	11	0,9998	0,0045	0,45	0,13	0,268	-0,096	11	1,0006	0,0052	0,52	0,16
	$\lambda_{bR,l}(r)/\lambda_{bR,l}(r)_{n=1}$	0,987	0,522	11	0,9994	0,0269	2,69	0,81	0,987	0,558	11	0,9982	0,0317	3,17	0,95
	$\varepsilon_{bR,l}(r)/\varepsilon_{bR,l}(r)_{n=1}$	0,992	0,359	11	1,0007	0,0119	1,19	0,36	0,989	0,444	11	1,0007	0,0145	1,45	0,44
	$\Sigma \varepsilon_{b,pl}(r)/\Sigma \varepsilon_{b,pl}(r)_{n=1}$	0,955	0,336	19	0,9997	0,0130	1,30	0,30	0,945	0,434	19	0,9996	0,0153	1,53	0,35
КЗБ-46 [0-0,86]	$E_{b0,l}(r)/E_{b0,l}(r)_{n=1}$	0,155	4,311	14	0,9997	0,0035	0,35	0,09	0,349	2,005	14	0,9981	0,0275	2,75	0,73
	$\lambda_{bR,l}(r)/\lambda_{bR,l}(r)_{n=1}$	0,989	0,767	14	0,9991	0,0960	9,60	2,57	0,990	0,746	14	1,0002	0,0830	8,30	2,22
	$\varepsilon_{bR,l}(r)/\varepsilon_{bR,l}(r)_{n=1}$	0,995	0,377	14	1,0008	0,0124	1,24	0,33	0,990	0,396	14	1,0005	0,0182	1,82	0,49
	$\Sigma \varepsilon_{b,pl}(r)/\Sigma \varepsilon_{b,pl}(r)_{n=1}$	0,977	0,298	35	0,9994	0,0107	1,07	0,18	0,949	0,196	35	1,0001	0,0079	0,79	0,13

Примечания: 1. Тут y_i^{exp} і y_i^{calc} - соответственно опытные (exp) и расчётные (calc) значения любого деформационного параметра; n - т-к число циклов нагружений. 2. Эту таблицу смотреть совместно с рис. 1...4.

Математическую аппроксимацию проиллюстрированных на рис. 1–4 графических зависимостей выполняли выражениями вида “ $y = f(n)$ ” (здесь y – любой из выше указанных деформативных параметров), структура которых представлена в табл. 1 и которые максимально точно описывают экспериментальные данные, соответствуя физическому смыслу происходящих в исследуемых бетонах процессов.

Числовые значения постоянных эмпирических коэффициентов зависимостей (1)..(9) и статистики по нормальным вариационным рядам соотношений $y_{l(tr)}^{exp}/y_{l(tr)}^{calc}$ при продольном и поперечном деформированиях бетонов представлены в табл. 2.

Применяя известный закон деформирования бетона при однократном центральном сжатии до разрушения в форме (см. формулу (1) в работе [10])

$$\sigma_b = \frac{E_{b0}\varepsilon_b}{1 + \lambda_{bR} E_{b0}\varepsilon_b/R_b} = \frac{E_{b0}}{1/\varepsilon_b + \lambda_{bR} E_{b0}/R_b} \quad (10)$$

и математическую модель малоциклового усталости (усталостной прочности) центрально сжатого бетона в виде (см. формулу (2) и рис. 3 в публикации [3])

$$\eta_{b,cyc} = R_{b,cyc}/R_b = 1 - a_1 \frac{n_{cyc} - 1}{n_{cyc} + b_1} \quad (11)$$

(здесь a_1 и b_1 – постоянные эмпирические коэффициенты, определяемые из условия минимума квадратичных абсолютных отклонений опытных точек (*exp*) от соответствующих точек теоретической кривой (*calc*) и принимаемые из табл. 2 в статье [3]), адекватность полученных зависимостей (1)..(9) проверяли, определив теоретические значения суммарных максимальных продольных и поперечных деформаций $\sum \varepsilon_{b,max,l(tr);n}^{calc}$ на n -ых циклах загрузки из выражений:

– на 1-ом цикле загрузки (то есть при $n=1$):

$$\varepsilon_{b,max,l(tr);n=1} = \frac{\sigma_{b,max}}{E_{b0l(tr);n=1} \left(1 - \lambda_{bR,l(tr);n=1} \frac{\sigma_{b,max}}{R_b} \right)}; \quad (12)$$

– на последующих n -ых циклах загрузки:

$$\sum_{n=2}^n \varepsilon_{b,max,l(tr);n} = \sum_{m=1}^{m=n-1} \varepsilon_{b,pl,l(tr);m} + \varepsilon_{b,max,l(tr);n} \quad (13)$$

$$\text{Где } \varepsilon_{b,\max,l(tr);n} = \frac{\sigma_{b,\max}}{E_{b0,l(tr);n} \left(1 - \lambda_{bR,l(tr);n} \frac{\sigma_{b,\max}}{R_{b,\text{сус}}} \right)} \quad (14)$$

(здесь n и $m = n - 1$ – номера конкретных загрузочных циклов, соответственно текущего и ему предшествующего, то есть на 1 меньше), и сравнив их с зафиксированными в экспериментах соответствующими опытными данными $\sum \varepsilon_{b,\max,l(tr);n}^{\text{exp}}$.

Результаты проверки представлены в табл. 3 и на рис. 5 и свидетельствуют о вполне приемлемых статистических характеристиках по нормальным вариационным рядам соотношений $\sum \varepsilon_{b,\max,l(tr);n}^{\text{exp}} / \sum \varepsilon_{b,\max,l(tr);n}^{\text{calc}}$.

Коэффициенты вариации и показатели точности изменяются в таких пределах: соотношений $\sum \varepsilon_{b,\max,l;n}^{\text{exp}} / \sum \varepsilon_{b,\max,l;n}^{\text{calc}} - V=0,23...0,93 \%$ и $0,70...3,15 \%$, $P=0,07...0,42 \%$ и $0,16...1,29 \%$, соответственно для мелкозернистого (МЗБ) и крупнозернистого (КЗБ) бетонов; соотношений $\sum \varepsilon_{b,\max,tr;n}^{\text{exp}} / \sum \varepsilon_{b,\max,tr;n}^{\text{calc}} - V=0,73...5,43 \%$ и $1,09...3,10 \%$, $P=0,33...1,22$ и $0,3...0,8 \%$ – для тех же самых бетонов.

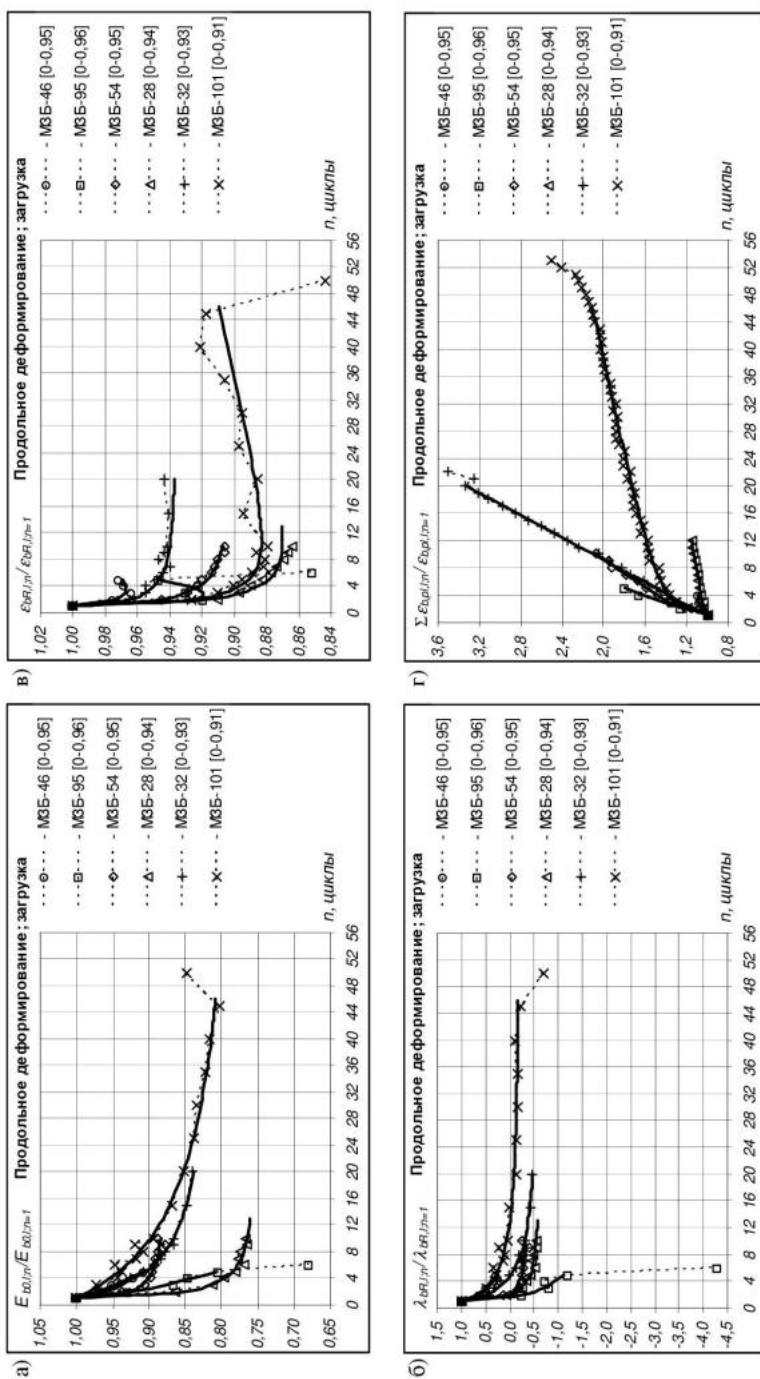


Рис. 1. Графическая интерпретация межциклового изменения характеристик нелинейного продольного деформирования мелкозернистого бетона М35 в условиях малоциклового центрального сжатия (циклические диаграммы продольного деформирования МЗБ)

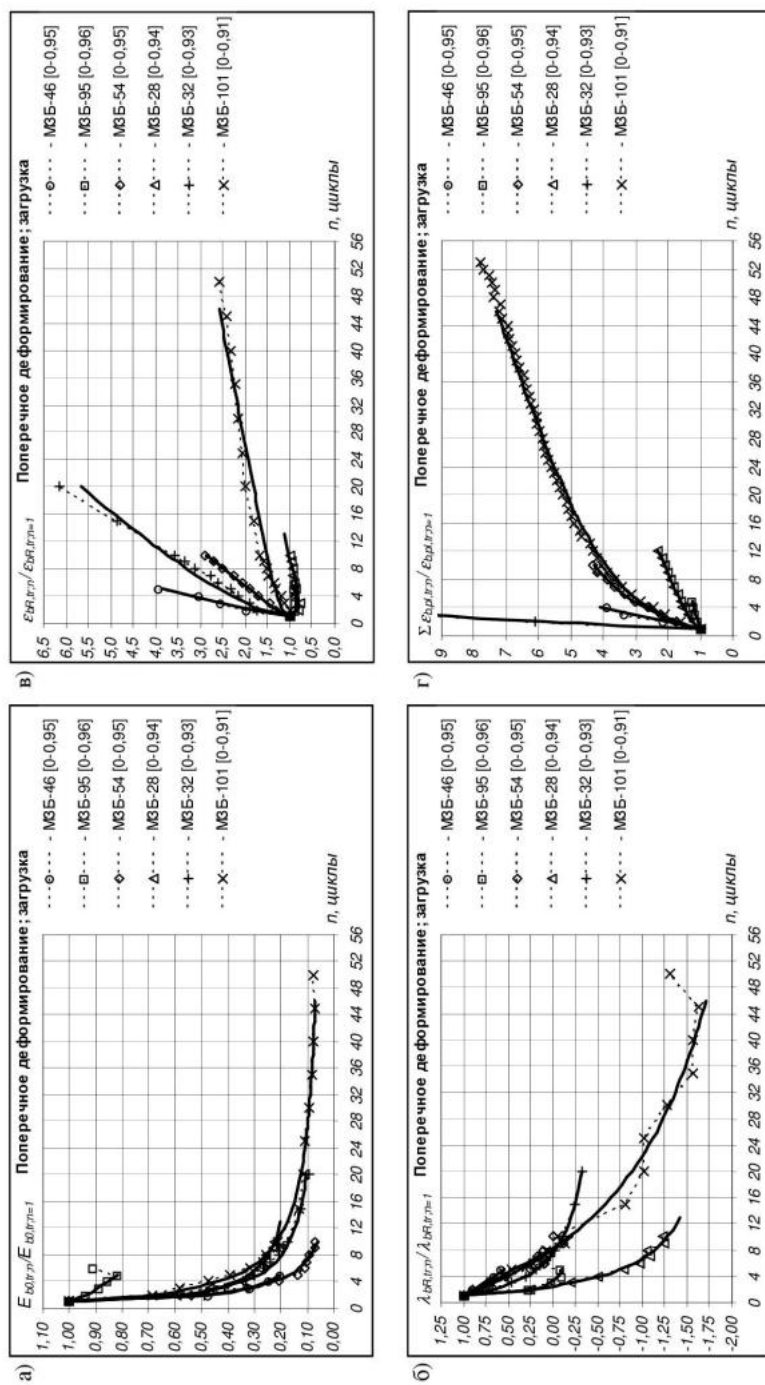


Рис. 2. Графическая интерпретация межциклового изменения характеристик нелинейного поперечного деформирования мелкозернистого бетона МЗБ в условиях малоциклового центрального сжатия (циклические диаграммы поперечного деформирования МЗБ)

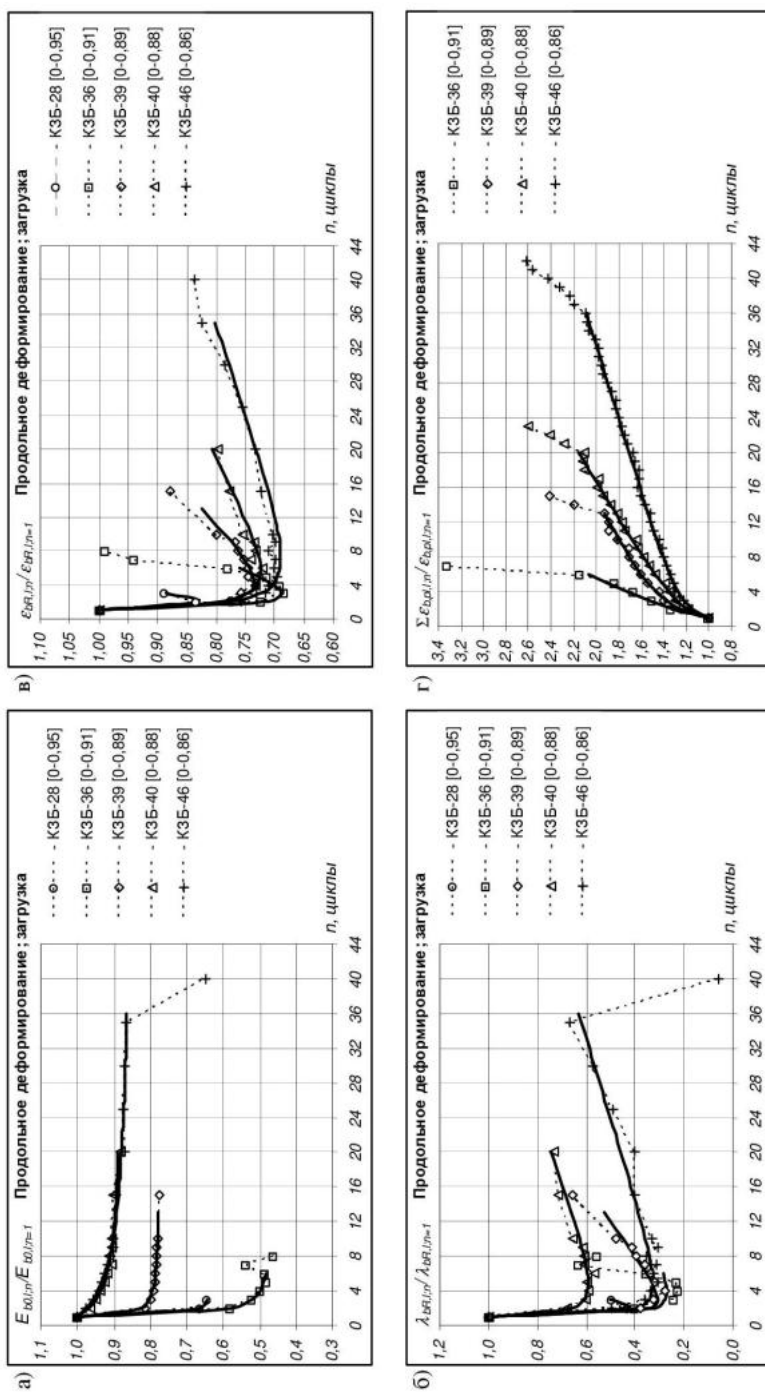


Рис. 3. Графічна інтерпретація міжциклового змінення характеристик нелінійного продольного деформування крупнозернистого бетону КЗБ в умовах малоциклового центрального сжаття (цикліческие діаграми продольного деформування КЗБ)

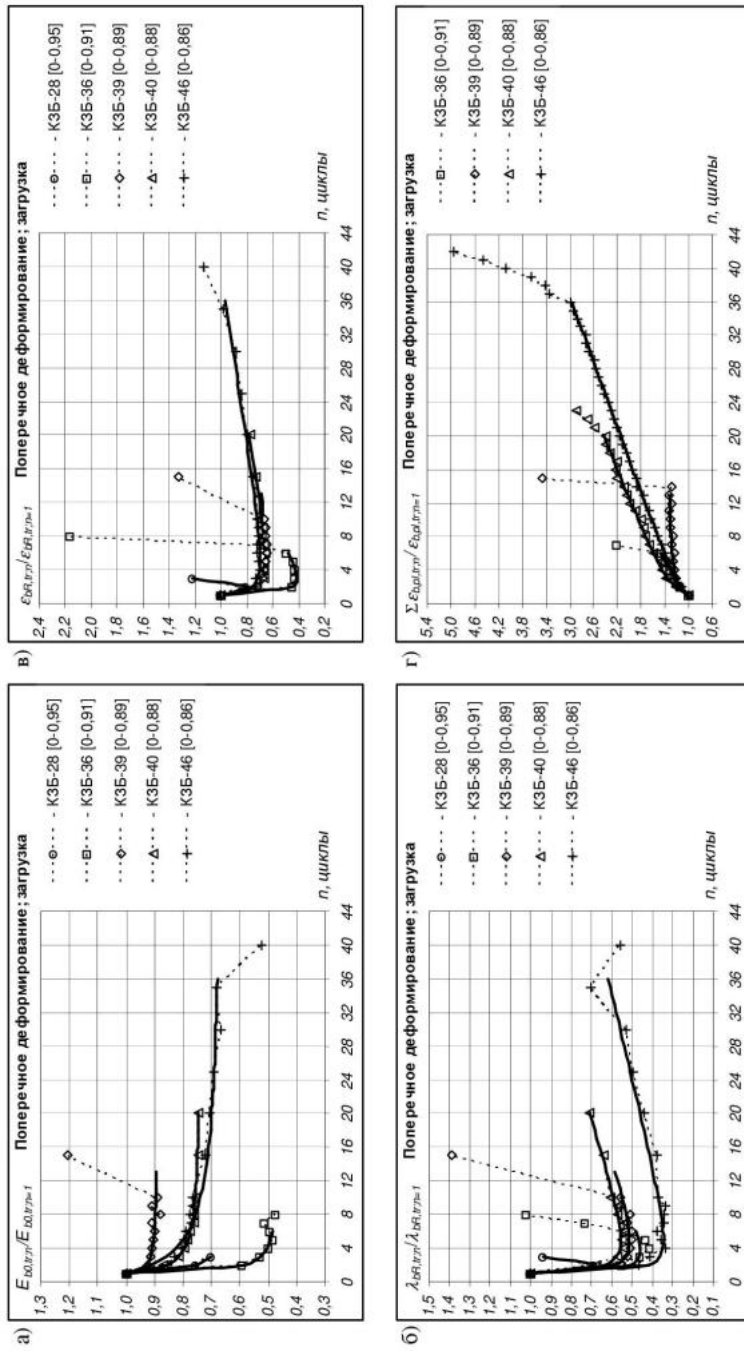


Рис. 4. Графическая интерпретация межциклового изменения характеристик нелинейного поперечного деформирования крупнозернистого бетона КЗБ в условиях малоциклового центрального сжатия (циклические диаграммы поперечного деформирования КЗБ)

Таблиця 3

Статистики по нормальным вариационным рядам соотношений

$$\sum \varepsilon_{b, \max, l(tr); n}^{exp} / \sum \varepsilon_{b, \max, l(tr); n}^{calc}$$

при продольном (“l”) и поперечном (“tr”) деформированиях
мелкозернистого и крупнозернистого бетонов в условиях малоциклового
центрального сжатия опытных призмических образцов

Шифр призмы	Статистики по нормальным вариационным рядам соотношений $\sum \varepsilon_{b, \max, l(tr); n}^{exp} / \sum \varepsilon_{b, \max, l(tr); n}^{calc}$									
	продольное деформирование (“l”)					поперечное деформирование (“tr”)				
	n, шт.	M	$\pm \sigma \times 10^2, \%$	V, %	P, %	n, шт.	M	$\pm \sigma \times 10^2, \%$	V, %	P, %
Мелкозернистый цементно-песчаный бетон (МЗБ)										
МЗБ-46 [0-0,95]	5	1,0038	0,9336	0,93	0,42	5	1,0008	2,4982	2,50	1,12
МЗБ-95 [0-0,96]	5	1,0019	0,6942	0,69	0,31	5	1,0004	0,7271	0,73	0,33
МЗБ-54 [0-0,95]	10	1,0001	0,2253	0,23	0,07	10	0,9941	1,1360	1,14	0,36
МЗБ-28 [0-0,94]	13	0,9990	0,2502	0,25	0,07	13	1,0047	1,6432	1,64	0,46
МЗБ-32 [0-0,93]	20	0,9990	0,3615	0,36	0,08	20	1,0071	5,4347	5,43	1,22
МЗБ-101 [0-0,91]	46	0,9990	0,4870	0,49	0,07	46	1,0063	2,6937	2,69	0,40
Крупнозернистый бетон на обычных заполнителях (КЗБ)										
КЗБ-36 [0-0,91]	6	1,00001	3,1499	3,15	1,29	6	0,99876	1,9530	1,95	0,80
КЗБ-39 [0-0,89]	13	1,00149	1,0847	1,08	0,30	13	0,99681	1,0864	1,09	0,30
КЗБ-40 [0-0,88]	20	1,00154	0,6988	0,70	0,16	20	0,99341	1,3253	1,33	0,30
КЗБ-46 [0-0,86]	36	1,00739	2,1414	2,14	0,36	36	1,00290	3,0996	3,10	0,52

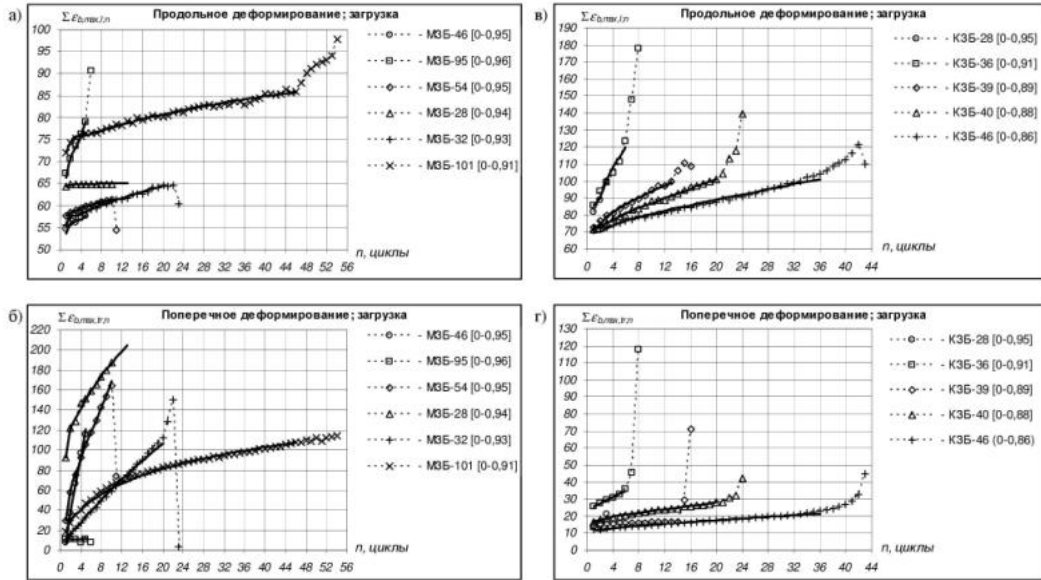


Рис. 5. Графическая интерпретация межциклового изменения суммарных максимальных относительных деформаций $\sum \varepsilon_{b,max,l(tr),n}$ при продольном (“l”) и поперечном (“tr”) деформированиях мелкозернистого и крупнозернистого бетонов (соответственно МЗБ и КЗБ) в условиях малоциклового центрального сжатия (циклические диаграммы продольного и поперечного деформирования МЗБ и КЗБ)

Выводы. Получены графические и им соответствующие математические зависимости основных прочностных и деформативных параметров мелкозернистого (цементно-песчаного) и крупнозернистого (на обычных заполнителях) бетонов в условиях близких к разрушающим высокоуровневым статических малоциклового нагружений центральным сжатием. Их применение позволяет прогнозировать наступление малоциклового усталости бетона.

Кроме того, они могут быть эффективно использованы в базирующихся на деформационной модели общих и универсальных расчётах изогнутых сжато-растянутых железобетонных элементов при действии малоциклового нагружения по всем группам предельных состояний (усталостной прочности, деформациям, образованию и раскрытию трещин), а также для более полной и достоверной оценки фактического неоднородного напряжённо-деформированного состояния сечений элементов (независимо от вида и класса применённых материалов (бетона и арматуры), формы поперечного сечения и распределения арматуры в его пределах и др.) на любых циклах нагружений, вплоть до усталостного разрушения непосредственно по значениям напряжений и относительных деформаций.

Представленные зависимости (1)..(9) имеют достаточно высокие аппроксимативные свойства, о чём свидетельствует хорошая сходимость опытных и теоретических данных.

Литература

- [1] Крусъ Ю. О. Малоциклові навантаження в комплексі впливів на будівельні конструкції, будівлі та споруди / Ю. О. Крусъ // Дороги і мости : зб. наук. праць ДерждорНДІ ім. М. П. Шульгіна. У 2-х томах: Т. І. – Київ, 2007. – Вип. 7. – С. 323–343.
- [2] Крусъ Ю. А. Механизм деформирования и усталостного разрушения бетона в условиях статических малоцикловых нагружений центральным сжатием / Ю. А. Крусъ // Зб. наук. праць Укрінсталькон ім. В. М. Шимановського / Під заг. ред. д.т.н, проф. О. В. Шимановського. – К. : Вид-во «Сталь», 2016. – Вип. 18. – С. 132–149.
- [3] Крусъ Ю. А. Малоцикловая усталость бетона при сжатии и растяжении в феноменологической постановке / Ю. А. Крусъ // Бетон и железобетон в Украине. – 2009. – № 3 (49). – С. 8–17.
- [4] Тихий М. Обзор проблемы малоциклового усталости железобетона / М. Тихий. – Прага, 1972. – 127 с.
- [5] Москвитин В. В. Циклические нагружения элементов конструкций / В. В. Москвитин. – М. : Наука, 1981. – 344 с.
- [6] Соппротивление деформированию и разрушению при малом числе циклов нагружения : сб. науч. трудов Гос. науч.-исслед. ин-та машиноведения АН СССР. – М. : Наука, 1967. – 171 с.
- [7] Махутов Н. А. Деформационные критерии разрушения и расчёт элементов конструкций на прочность / Н. А. Махутов. – М. : Машиностроение, 1981. – 272 с.
- [8] Серенсен С. В. Соппротивление материалов усталостному и хрупкому разрушению / С. В. Серенсен. – М. : Атомиздат, 1975. – 271 с.
- [9] Усталость и выносливость металлов : сб. статей / [Пер. с англ. В. К. Житомирского; Под ред. Г. В. Ужика]. – М. : Изд-во иностр. лит-ры, 1963. – 497 с.
- [10] Крусъ Ю. А. Энергетический метод определения предельной сжимаемости бетона / Ю. А. Крусъ, А. Ю. Крусъ // Будівельні конструкції : міжвід. наук.-техн. зб. – Київ : НДІБК, 2013. – Вип. 78. Кн. 2. – С. 22–33.

Закономірності деформування і втомного руйнування бетону в умовах статичних малоциклових навантажень центрального стиснення

Крусь Ю. О., канд. техн. наук

Національний університет водного господарства та природокористування, Україна

Анотація. Більшість будівельних об'єктів у реальних умовах експлуатації піддаються впливу близьких до руйнівних малоциклових навантажень високої інтенсивності (сейсмічних, снігових, вітрових, транспортних тощо), що спричиняє специфічне деформування високонавантажених нелінійно деформованих матеріалів (бетону, залізобетону та ін.). Це може призвести до передчасного зниження довговічності матеріалів і конструкцій, а часто – до їхнього непередбачуваного й стрімкого втомного руйнування. Отже, порушена проблема потребує всебічного й ретельного вивчення та подальшого врахування зазначених факторів у практиці проектування. У представленій роботі отримані графічні і їм відповідні математичні залежності основних міцнісних і деформативних параметрів дрібнозернистого (цементно-піщаного) і крупнозернистого (на звичайних заповнювачах) бетонів в умовах високорівневих статичних малоциклових навантажень центральним стисненням. Їхнє застосування дозволяє прогнозувати настання малоциклової втоми бетону, а також оцінювати фактичний напружено-деформований стан перерізів бетонних і залізобетонних елементів на довільних циклах навантажень, аж до втомного руйнування.

Ключові слова: малоциклове навантаження високої інтенсивності, бетон, малоциклова втома, деформативні параметри, циклічні діаграми деформування.

Regularities of deformation and fatigue destruction of concrete under conditions of static low-cycle loading by central compression

Yu. Krus, Cand. Sc. (Eng.)

National University of Water and Environmental Management, Ukraine

Abstract. The majority of building objects in real operation conditions are subject to influence of low-cycle loadings of high intensity, close to destructive ones (seismic, snow, wind, transport etc.), which causes specific deformation of highly loaded nonlinearly deformable materials (concrete, reinforced concrete etc.). It can result to premature decrease of durability of materials and construction, and often to their unforeseen and rapid fatigue failure. Thus, the mentioned problem demands a thorough and careful studying and subsequent consideration of indicated factors in design practice. In the presented paper graphical and corresponding to them mathematical dependences of basic strength and deformative parameters of fine-grained (cement-sandy) and coarse-grained (on conventional aggregates) concretes under conditions of high level static low-cycle loadings by central compression are obtained. Their application allows to predict occurrence of low-cycle fatigue of concrete, as well as to estimate the actual stress-strain state of cross-sections of concrete and reinforced concrete elements on arbitrary cycles of their loading up to fatigue failure.

Key words: low-cycle load of high intensity, concrete, low-cycle fatigue, deformation parameters, cyclic deformation diagrams.

Надійшла до редколегії 22.04.2017 р.