

УДК 691.327.539.434

УЗАГАЛЬНЕНІ ЦИКЛІЧНІ ДІАГРАМИ ДЕФОРМУВАННЯ БЕТОНУ В УМОВАХ ПОВТОРНИХ МАЛОЦИКЛОВИХ НАВАНТАЖУВАНЬ ЦЕНТРАЛЬНИМ СТИСНЕННЯМ

ОБОБЩЁННЫЕ ЦИКЛИЧЕСКИЕ ДИАГРАММЫ ДЕФОРМИРОВАНИЯ БЕТОНА В УСЛОВИЯХ ПОВТОРНЫХ МАЛОЦИКЛОВЫХ НАГРУЖЕНИЙ ЦЕНТРАЛЬНЫМ СЖАТИЕМ

GENERALIZED CYCLIC DIAGRAMS OF CONCRETE DEFORMING IN THE CONDITIONS OF REPEATED LOW CYCLIC LADENINGS BY CENTRAL COMPRESSION

Крусъ Ю.О., канд. техн. наук, доцент (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)

Крусъ Ю.А., канд. техн. наук, доцент (Национальный университет водного хозяйства и природопользования, г. Ривне)

Krus Y.A., candidate of technical sciences, associate professor (National university of water management and nature resources use, Rivne)

Побудовані узагальнені математичні моделі циклічних діаграм деформування бетону. Їхнє застосування дозволяє прогнозувати основні деформативні характеристики бетону за довільних кількості циклів малоповторювальних навантажувальних і максимальних рівнях циклічних напружень.

Построены обобщённые математические модели циклических даграмм деформирования бетона. Их использование позволяет прогнозировать основные деформативные характеристики бетона при произвольных числе циклов малоповторных нагрузжений и максимальных уровнях циклических напряжений.

The generalized mathematical models of cyclic diagrams of concrete deforming are constructed. Their use allows to predict the concrete basic deforming characteristics at arbitrary number of cycles little repeated leadenings and maximal levels of cyclic stresses.

Ключові слова:

Бетон, малоциклові навантажування, діаграма деформування бетону
Бетон, малоцикловые нагружения, диаграмма деформирования бетона
Concrete, little repeated leadenings, diagram of concrete deforming

Стан питання та задачі дослідження. Численні спостереження засвідчують, що в реальних умовах переважна більшість зовнішніх навантажень випадково чи періодично повторюються з чергуванням завантажувальних і розвантажувальних, тобто мають змінний характер як у часі, так і за своїми значеннями. Серед змінних впливів вирізняють так звані **малоциклові навантаження** з невеликою кількістю повторювань за гарантований термін служби будівлі або споруди у десятки, сотні, а деколи й тисячі разів (в усіх випадках набагато менше, ніж регламентовані будівельними нормами для багатоциклових навантажень 2×10^6 циклів) [1]. До таких можуть бути віднесені як навантаження природного походження (снігові; вітрові; сейсмічні; хвильові; льодові при прориві заторів; навантаження, що спричинені деформаціями основи та ін.), так і деякі технологічні (у силосах елеваторів для збереження сипких матеріалів; на перекриття від ваги людей і ремонтних матеріалів у зонах обслуговування й ремонту обладнання; від ваги складованих матеріалів; тиск від гідравлічного удару в період нормальної експлуатації тощо).

Накопичений досвід переконує, що дія повторних малоциклових навантажень, спричиняючи специфічне деформування й руйнування нелінійно деформівних матеріалів та виготовлених із них конструкцій, може призвести до неочікуваних і тяжких наслідків, аж до аварій вірно запроектованих згідно з чинними будівельними нормами будівель і споруд. Отже, задача досліджень полягає у розробці математичних моделей основних деформативних характеристик бетону при дії малоповторних циклічних навантажень задля можливості їхнього застосування при розрахунку бетонних і залізобетонних конструкцій, що експлуатуються в умовах розглядуваних силових впливів.

Основна частина. Раніше [2] були опубліковані результати вивчення особливостей поздовжнього й поперечного деформування та механізму руйнування центрально стисненого бетону при дії повторних малоциклових навантажень високих рівнів, що базуються на даних власних експериментальних досліджень [3] малоциклової втомленості важкого крупнозернистого бетону (КЗБ) на традиційних щелепних заповнювачах. Також у публікації [2] надана інформація про режими випробування стандартних призмових зразків із бетону (нижній і верхній відносні рівні змінних напружень відповідно $\eta_b^{low} = \eta_{b,min}$ і $\eta_b^{top} = \eta_{b,max}$ та характеристику циклу напружень $\rho_\sigma = \eta_{b,min} / \eta_{b,max}$), викладена методика їхнього випробування й визначення основних деформативних характеристик бетону (модуля пружності $E_{b0,n}$, коефіцієнтів пружності $\nu_{bR,n}$ і пластичності $\lambda_{bR,n}$, граничної стисливості $\varepsilon_{bR,n}$ і сумарної залишкової відносної деформації $\Sigma \varepsilon_{b,pl,l(tr),n}$) на довільних n -их циклах завантажування.

Задля більшої наочності, зручності при технічному опрацюванні та подальшому практичному застосуванні отримані експериментальні дані, що фіксують вплив повторних малоциклових навантажувальних на якісний та кількісний характер деформування й руйнування досліджуваного бетону, проілюстровані на рис. 1 і 2 графіками міжциклової зміни його деформативних параметрів у вигляді відносних величин $E_{b0,l(tr),n} / E_{b0,l(tr),n=1}$, $\lambda_{bR,l(tr),n} / \lambda_{bR,l(tr),n=1}$,

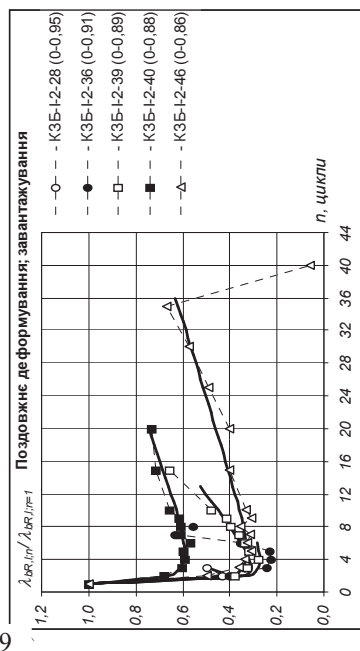
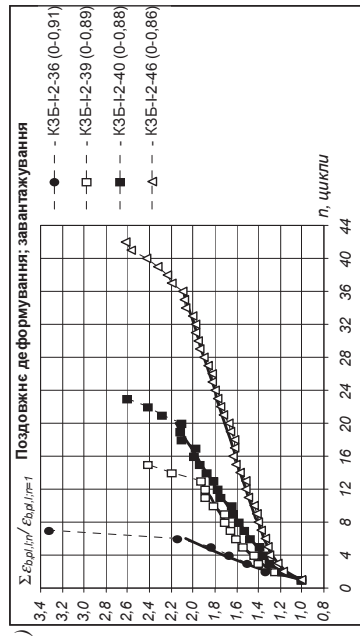
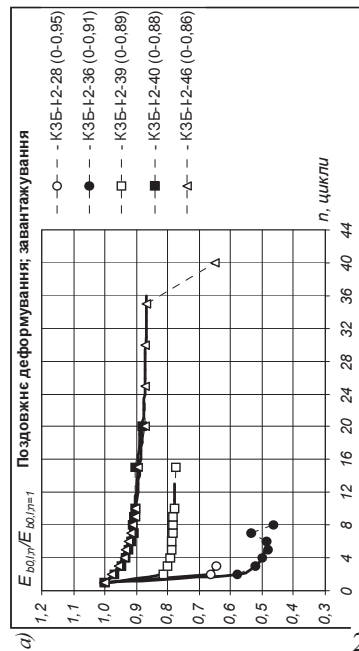
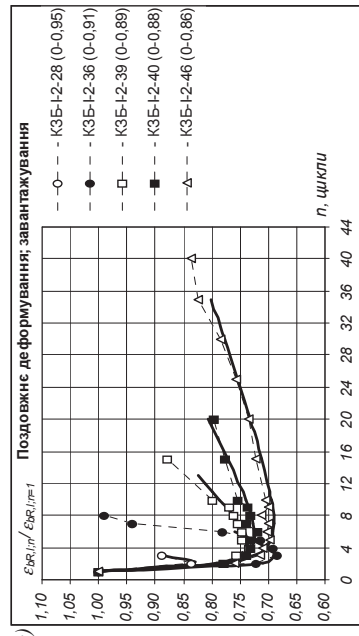


Рис. 1. Графічна ілюстрація міжциклової зміни характеристик нелінійного поздовжнього деформування бетону при дії повторних малоциклових стискаючих навантажень високих рівнів (або інакше - циклічні діаграми поздовжнього деформування бетону)

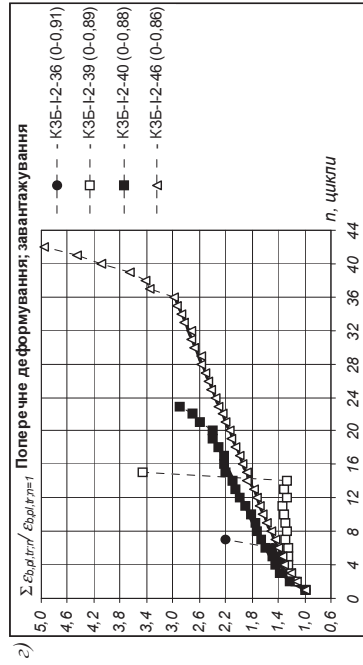
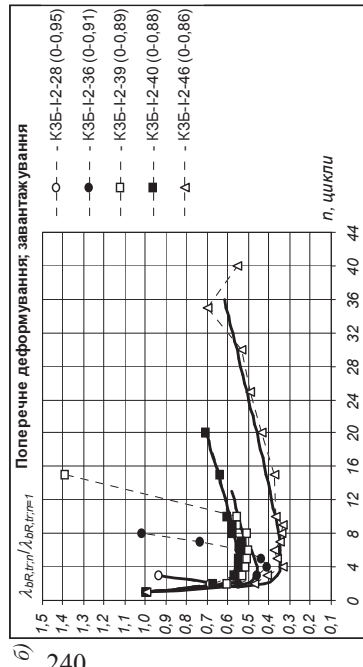
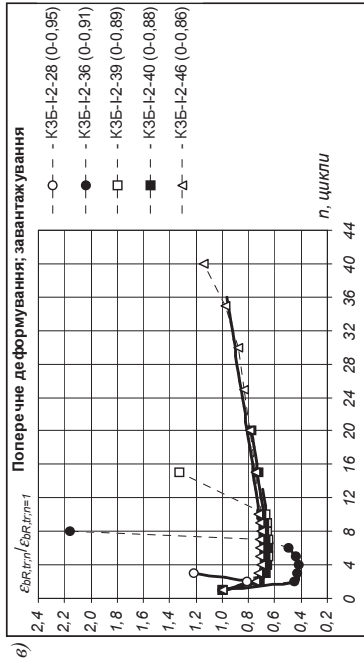
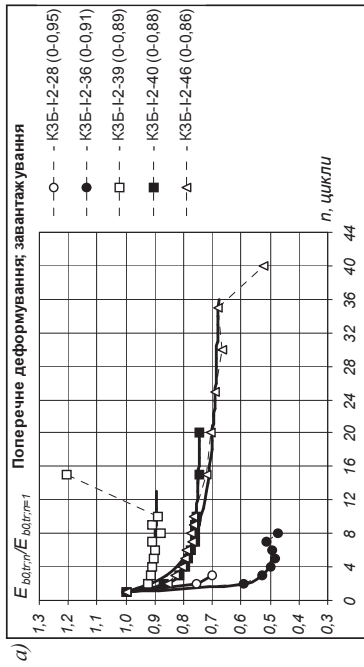


Рис. 2. Графічна ілюстрація міжциклової зміни характеристик нелінійного поперечного деформування бетону при дії повторних малоциклових стискаючих навантажень високих рівнів (або інакше - циклічні діаграми поперечного деформування бетону)

$\varepsilon_{bR,l(tr);n} / \varepsilon_{bR,l(tr);n=1}$ і $\sum \varepsilon_{b,pl,l(tr);n} / \varepsilon_{b,pl,l(tr);n=1}$ залежно від біжучої кількості циклів навантажування n (тут задля розрізнення поздовжнього й поперечного напрямків деформування в позначеннях застосовуємо нижні індекси відповідно “ l ” і “ tr ”). Інакше такі графічні залежності називають **циклічними діаграмами деформування** матеріалу (див. [1,4]).

Математичні моделі циклiчних діаграм деформування бетону на етапі його стійкої роботи (на стадіях I і II; див. рис. 4 у публікації [2]), представляємо виразами

$$E_{b0,l(tr);n} / E_{b0,l(tr);n=1} = 1 - a_{2,l(tr)} \frac{n-1}{n + b_{2,l(tr)}}; \quad (1)$$

$$\lambda_{bR,l(tr);n} / \lambda_{bR,l(tr);n=1} = n \cdot \left(1 - a_{3,l(tr)} \frac{n-1}{n - b_{3,l(tr)}} \right); \quad (2)$$

$$\varepsilon_{bR,l(tr);n} / \varepsilon_{bR,l(tr);n=1} = n \cdot \left(1 - a_{4,l(tr)} \frac{n-1}{n - b_{4,l(tr)}} \right); \quad (3)$$

$$\sum \varepsilon_{b,pl,l(tr);n} / \varepsilon_{b,pl,l(tr);n=1} = n \cdot \left(1 - a_{5,l(tr)} \frac{n-1}{n + b_{5,l(tr)}} \right), \quad (4)$$

де $a_{2\dots 5,l(tr)}$ і $b_{2\dots 5,l(tr)}$ - сталі емпіричні коефіцієнти, які визначаються з умов мінімуму квадратичних абсолютних відхилень дослідних точок (exp) від відповідних точок теоретичних кривих ($calc$).

Числові значення сталих коефіцієнтів залежностей (1)...(4) та статистики нормальних варіаційних рядів співвідношень $y_{l(tr);n}^{exp} / y_{l(tr);n}^{calc}$ (тут $y_{l(tr);n}$ - будь-який з розглядуваних параметрів) наведені в табл. 1.

Математичні моделі **узагальнених циклiчних діаграм деформування**, які дозволяти б прогнозувати основні деформативні параметри бетону за довільного максимального рівня змінних напружень на 1-му циклі $\eta_{b,cyc} = \eta_{b,max;n=1} = \sigma_{b,max} / R_b > \eta_{b,crc}^{top}$ (тут $\eta_{b,crc}^{top}$ - верхня відносна границя мікротріщиноутворення бетону), отримаємо, представивши сталі емпіричні коефіцієнти $a_{2\dots 5,l(tr)}$ і $b_{2\dots 5,l(tr)}$ у формулах (1)...(4) функціональними залежностями “ $a_{2\dots 5,l(tr)} = f(\eta_{b,cyc})$ ” і “ $b_{2\dots 5,l(tr)} = f(\eta_{b,cyc})$ ”. Структура таких залежностей наведена в табл. 2 у вигляді виразів (5)...(12), а їхня графічна інтерпретація - на рис. 3.

Числові значення емпіричних коефіцієнтів залежностей (5)...(12) та статистики нормальних варіаційних рядів співвідношень $a_{l(tr);n}^{exp} / a_{l(tr);n}^{calc}$ і $b_{l(tr);n}^{exp} / b_{l(tr);n}^{calc}$ представлені в табл. 3, засвідчуючи задовільну збіжність експериментальних і розрахункових значень досліджуваних параметрів. Осереднені величини коефіцієнтів варіації й показників точності становлять: для співвідношень a_1^{exp} / a_1^{calc} і b_1^{exp} / b_1^{calc} - $V=13,10\%$ і $P=5,96\%$; для співвідношень $a_{tr}^{exp} / a_{tr}^{calc}$ і $b_{tr}^{exp} / b_{tr}^{calc}$ - $V=9,81\%$ і $P=4,59\%$.

Таблиця 1

Числові значення сталей емпіричних коефіцієнтів $a_{(n)}$ і $b_{(n)}$ і статистичні характеристики залежностей (1)...(4)

Шифр	Досліджувані параметри "у"	Поздовжнє деформування ("Г")						Поперечне деформування ("Г")							
		Сталі коефіцієнти			Статистичні характеристики по $y_{гр}^{exp}/y_{гр}^{calc}$			Сталі коефіцієнти			Статистичні характеристики по $y_{гр}^{exp}/y_{гр}^{calc}$				
		a	b	n, шт.	M	σ	V, %	P, %	a	b	n, шт.	M	σ	V, %	P, %
КЗБ-1-2-28 [0-0,95]	$E_{b0,1}(n)_{гр}/E_{b0,1}(n)_{гр}=1$	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
	$\lambda_{bR,1}(n)_{гр}/\lambda_{bR,1}(n)_{гр}=1$	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
	$E_{bR,1}(n)_{гр}/E_{bR,1}(n)_{гр}=1$	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
	$\Sigma E_{b,pl,1}(n)_{гр}/E_{b,pl,1}(n)_{гр}=1$	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
КЗБ-1-2-36 [0-0,91]	$E_{b0,1}(n)_{гр}/E_{b0,1}(n)_{гр}=1$	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
	$\lambda_{bR,1}(n)_{гр}/\lambda_{bR,1}(n)_{гр}=1$	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
	$E_{bR,1}(n)_{гр}/E_{bR,1}(n)_{гр}=1$	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
	$\Sigma E_{b,pl,1}(n)_{гр}/E_{b,pl,1}(n)_{гр}=1$	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-1-2-39 [0-0,89]	$E_{b0,1}(n)_{гр}/E_{b0,1}(n)_{гр}=1$	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
	$\lambda_{bR,1}(n)_{гр}/\lambda_{bR,1}(n)_{гр}=1$	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
	$E_{bR,1}(n)_{гр}/E_{bR,1}(n)_{гр}=1$	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
	$\Sigma E_{b,pl,1}(n)_{гр}/E_{b,pl,1}(n)_{гр}=1$	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-1-2-40 [0-0,88]	$E_{b0,1}(n)_{гр}/E_{b0,1}(n)_{гр}=1$	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
	$\lambda_{bR,1}(n)_{гр}/\lambda_{bR,1}(n)_{гр}=1$	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
	$E_{bR,1}(n)_{гр}/E_{bR,1}(n)_{гр}=1$	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
	$\Sigma E_{b,pl,1}(n)_{гр}/E_{b,pl,1}(n)_{гр}=1$	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-1-2-46 [0-0,86]	$E_{b0,1}(n)_{гр}/E_{b0,1}(n)_{гр}=1$	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
	$\lambda_{bR,1}(n)_{гр}/\lambda_{bR,1}(n)_{гр}=1$	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
	$E_{bR,1}(n)_{гр}/E_{bR,1}(n)_{гр}=1$	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
	$\Sigma E_{b,pl,1}(n)_{гр}/E_{b,pl,1}(n)_{гр}=1$	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

Примітки. 1. Тут $y_{гр}^{exp}$ і $y_{гр}^{calc}$ - відповідно дослідні та розрахункові значення будь-якого деформативного параметра. 2. Цю таблицю дивитись разом з рис. 1 і 2.

Таблиця 2

Сталі емпіричні коефіцієнти $a_{l(tr)}$ і $b_{l(tr)}$ та структури залежностей вигляду “ $a_{l(tr)}=f(\eta_{b,cyc})$ ” і “ $b_{l(tr)}=f(\eta_{b,cyc})$ ” для застосування при моделюванні узагальнених циклічних діаграм (1)...(4) поздовжнього та поперечного деформування бетону

Досліджувані параметри “у”	Структура залежностей вигляду “ $a_{l(tr)}=f(\eta_{b,cyc})$ ” і “ $b_{l(tr)}=f(\eta_{b,cyc})$ ” для поздовжнього й поперечного деформування бетону
$E_{b0,l(tr);n}/E_{b0,l(tr);n=1}$	$a_{2,l(tr)} = (1 - \eta_{b,cyc}) \cdot e^{c_{2,l(tr)}(\eta_{b,cyc} - d_{2,l(tr)})}$ (5)
	$b_{2,l(tr)} = g_{2,l(tr)} \cdot (1 - \eta_{b,cyc})^{k_{2,l(tr)}} - 1$ (6)
$\lambda_{bR,l(tr);n}/\lambda_{bR,l(tr);n=1}$	$a_{3,l(tr)} = c_{3,l(tr)} \frac{1 - \eta_{b,cyc}}{d_{3,l(tr)} - \eta_{b,cyc}}$ (7)
	$b_{3,l(tr)} = 1 - g_{3,l(tr)} \frac{1 - \eta_{b,cyc}}{k_{3,l(tr)} - \eta_{b,cyc}}$ (8)
$\varepsilon_{bR,l(tr);n}/\varepsilon_{bR,l(tr);n=1}$	$a_{4,l(tr)} = c_{4,l(tr)} \frac{1 - \eta_{b,cyc}}{d_{4,l(tr)} - \eta_{b,cyc}}$ (9)
	$b_{4,l(tr)} = 1 - g_{4,l(tr)} \frac{1 - \eta_{b,cyc}}{k_{4,l(tr)} - \eta_{b,cyc}}$ (10)
$\Sigma \varepsilon_{bpl,l(tr);n}/\varepsilon_{bpl,l(tr);n=1}$	$a_{5,l(tr)} = c_{5,l(tr)} \frac{1 - \eta_{b,cyc}}{d_{5,l(tr)} - \eta_{b,cyc}}$ (11)
	$b_{5,l(tr)} = g_{5,l(tr)} \frac{1 - \eta_{b,cyc}}{k_{5,l(tr)} - \eta_{b,cyc}} - 1$ (12)

Примітка. У співвідношеннях (5)...(12) $c_{2...5,l(tr)}$, $d_{2...5,l(tr)}$, $g_{2...5,l(tr)}$ і $k_{2...5,l(tr)}$ - сталі емпіричні коефіцієнти, які визначаються з умов мінімуму квадратичних абсолютних відхилень дослідних точок від відповідних точок теоретичних кривих.

Адекватність узагальнених математичних моделей циклічних діаграм деформування бетону, які передбачають сумісне використання співвідношень (1)...(4) із виразами (5)...(12), перевіряли, застосовавши відомий закон деформування бетону при його стандартному одноразовому завантажуванні до руйнування у вигляді (див. формулу (33) у публікації [5])

$$\varepsilon_b = \frac{\sigma_b}{E_{b0} [1 - (1 - \nu_{bR})(\sigma_b/R_b)]} = \frac{\sigma_b}{E_{b0} [1 - \lambda_{bR}(\sigma_b/R_b)]}, \quad (13)$$

обчисливши значення сумарних максимальних відносних деформацій досліджуваного бетону $\Sigma \varepsilon_{b,max,l(tr);n}^{calc}$ на n -их циклах завантажування з виразів на 1-му циклі завантажування (тобто при $n=1$)

$$\varepsilon_{b,max,l(tr);n=1} = \frac{\sigma_{b,max}}{E_{b0,l(tr);n=1} [1 - \lambda_{bR,l(tr);n=1}(\sigma_{b,max}/R_b)]}; \quad (14)$$

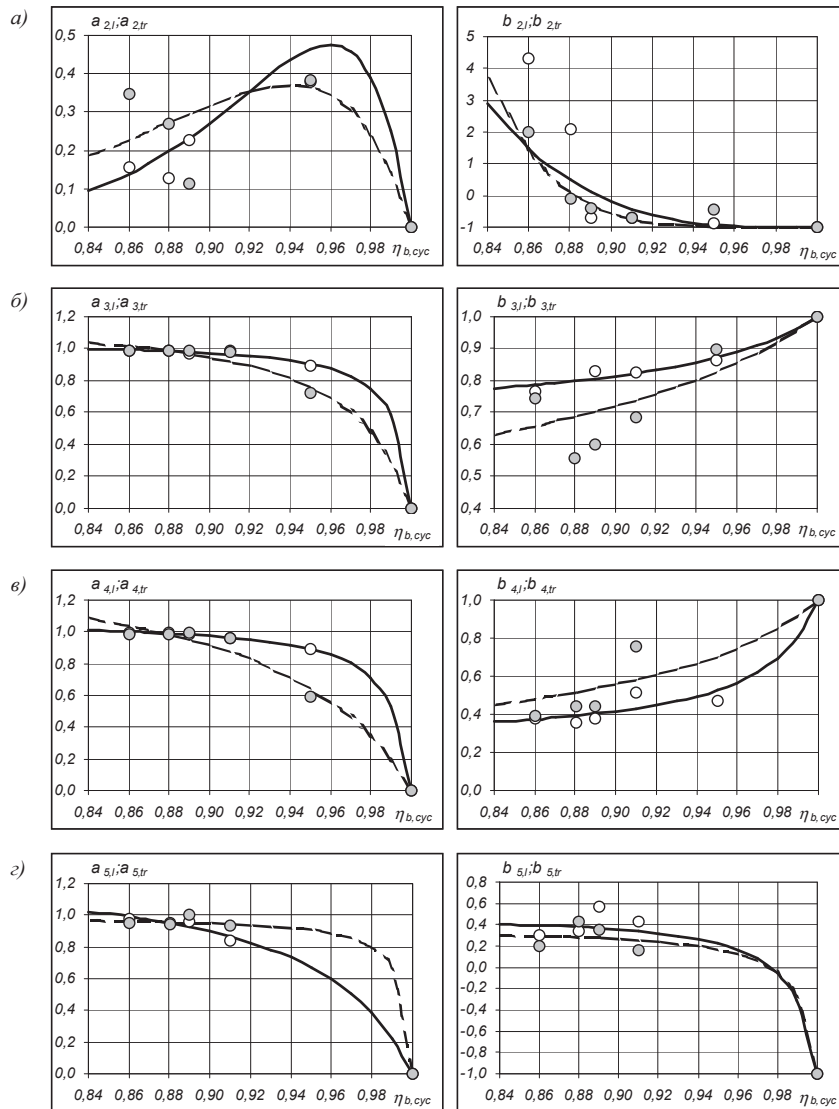


Рис. 3. Графічна інтерпретація впливу інтенсивності малоциклових напружень $\eta_{b,cyc}$ на коефіцієнти $a_{i(tr)}$ і $b_{i(tr)}$ залежностей (5) і (6) (а), (7) і (8) (б), (9) і (10) (в), (11) і (12) (г) при поздовжньому й поперечному деформуваннях бетону при його повторному завантажуванні: \circ ; \bullet - дослідні точки відповідно при поздовжньому й поперечному деформуваннях; — ; - - теоретичні криві відповідно при поздовжньому й поперечному деформуваннях

Таблиця 3
Числові значення сталих емпіричних коефіцієнтів $c_{(n)}, d_{(n)}, g_{(n)}, k_{(n)}$ і статистичні характеристики залежностей (5)...(12)

Досліджувані параметри "у"	Поздовжнє деформування ("Г")						Поперечне деформування ("П")							
	Сталі емпіричні коефіцієнти			Статистичні характеристики по a_i^{exp}/a_i^{calc} і b_i^{exp}/b_i^{calc}			Сталі емпіричні коефіцієнти			Статистичні характеристики по a_i^{exp}/a_i^{calc} і b_i^{exp}/b_i^{calc}				
	ДВН "a _{2,l} "	c _{2,l}	d _{2,l}	n, шт.	M	V, %	P, %	ДВН "a _{2,ir} "	c _{2,ir}	d _{2,ir}	n, шт.	M	V, %	P, %
$E_{p0,l(n);n}/E_{p0,l(n);n=1}$	ДВН "a _{2,l} "	24,770	0,860	5	1,0151	9,71	4,34	ДВН "a _{2,ir} "	16,683	0,831	5	1,0253	11,08	4,95
	ДВН "g _{2,l} "	1827085						ДВН "g _{2,ir} "	4634·10 ⁴		4	1,0190	21,76	10,88
	ДВН "b _{2,l} "	3,356						ДВН "b _{2,ir} "	5,014					
	ДВН "a _{3,l} "	1,050						ДВН "a _{3,ir} "	1,274		5	0,9994	4,30	1,92
$\lambda_{pR,l(n);n}/\lambda_{pR,l(n);n=1}$	ДВН "a _{3,l} "	1,008						ДВН "a _{3,ir} "	1,032					
	ДВН "b _{3,l} "	0,340						ДВН "b _{3,ir} "	0,750		6	0,9629	13,24	5,41
	ДВН "g _{3,l} "	1,083						ДВН "g _{3,ir} "	1,166					
	ДВН "k _{3,l} "	1,071						ДВН "k _{3,ir} "	1,583					
$E_{pR,l(n);n}/E_{pR,l(n);n=1}$	ДВН "a _{4,l} "	1,010						ДВН "a _{4,ir} "	1,073		5	1,0021	7,11	3,18
	ДВН "g _{4,l} "	0,759						ДВН "g _{4,ir} "	0,890		4	0,9878	8,60	4,30
	ДВН "b _{4,l} "	1,030						ДВН "b _{4,ir} "	1,100					
	ДВН "c _{4,l} "	1,344						ДВН "c _{4,ir} "	0,995		5	0,9996	2,80	1,25
$\Sigma E_{p,l(n);n}/E_{p,l(n);n=1}$	ДВН "a _{5,l} "	1,050						ДВН "a _{5,ir} "	1,005					
	ДВН "g _{5,l} "	1,513						ДВН "g _{5,ir} "	1,375		4	1,0099	9,62	4,81
	ДВН "b _{5,l} "	1,012						ДВН "b _{5,ir} "	1,009					
	ДВН "k _{5,l} "	1,012						ДВН "k _{5,ir} "	1,009					

на подальших n -их циклах завантажування (тобто при $n > 1$)

$$\sum_{n=2}^n \varepsilon_{b,max,l(tr);n} = \sum_{m=1}^{m=n-1} \varepsilon_{b,pl,l(tr);m} + \varepsilon_{b,max,l(tr);n} \quad (15)$$

де

$$\varepsilon_{b,max,l(tr);n} = \frac{\sigma_{b,max}}{E_{b0,l(tr);n} \left[1 - \lambda_{bR,l(tr);n} \left(\sigma_{b,max} / R_{b,cyc} \right) \right]} \quad (16)$$

(тут n і $m=n-1$ - номери відповідно біжучого та йому передуючого (тобто на 1 менше) циклів завантажування; $R_{b,cyc}$ - міцність, яка відповідає малоцикловій втомленості бетону та визначається за формулою (2) із публікації [3]; $E_{b0,l(tr);n}$, $\lambda_{bR,l(tr);n}$ і $\Sigma \varepsilon_{b,pl,l(tr);n}$ - основні деформативні характеристики бетону при повторних малоциклових навантаженнях, які визначаються за відповідними формулами (1)...(4) із табл. 1 з урахуванням співвідношень (5)... (12) із табл. 3) та порівнявши їх із зафіксованими в експериментах відповідними дослідними даними $\sum \varepsilon_{b,max,l(tr);n}^{exp}$. Результати перевірки засвідчують про цілком прийнятні статистичні характеристики по нормальних варіаційних рядах співвідношень $\sum \varepsilon_{b,max,l(tr);n}^{exp} / \sum \varepsilon_{b,max,l(tr);n}^{calc}$. Коефіцієнти варіації й показники точності коливаються в таких межах: для співвідношень $\sum \varepsilon_{b,max,l;n}^{exp} / \sum \varepsilon_{b,max,l;n}^{calc}$ - $V=0,70...3,15\%$ і $P=0,16...1,29\%$; для співвідношень $\sum \varepsilon_{b,max,tr;n}^{exp} / \sum \varepsilon_{b,max,tr;n}^{calc}$ - $V=1,09...3,10\%$ і $P=0,3...0,8\%$).

Висновок. Побудовані узагальнені математичні моделі циклічних діаграм деформування важкого бетону на традиційних заповнювачах, які дозволяють прогнозувати основні деформативні характеристики бетону $E_{b0,l(tr);n}$, $\lambda_{bR,l(tr);n}$, $\varepsilon_{bR,l(tr);n}$ і $\Sigma \varepsilon_{b,pl,l(tr);n}$ при його поздовжньому та поперечному деформуваннях за довільних кількості циклів навантажувань n і максимальних рівнів змінних напружень $\eta_{b,cyc} = \eta_{b,max;n=1}$. Отримані моделі найкращим чином апроксимують експериментальні результати, про що засвідчує прийнятна збіжність дослідних і розрахункових даних, і відповідають фізичному змісту роботи бетону. 1. Бабич Є.М., Крусь Ю.А. Бетонні та залізобетонні елементи в умовах малоциклових навантажень. - Рівне: Вид-во РДТУ, 1999. - 119 с. 2. 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. 3. Крусь Ю.А. Малоцикловая усталость бетона при сжатии и растяжении в феноменологической постановке//Бетон и железобетон в Украине. - 2009. - № 3(49). - С. 8-17. 4. Крусь Ю.О. Класичні уявлення про роботу пружно-пластичних матеріалів в умовах циклічних навантажувальних//Діагностика, довговічність та реконструкція мостів: Зб. наук. праць. - Львів: Каменяр, 2007. - Вип. 9. - С. 56-79. 5. Бабич Є.М., Крусь Ю.О. До питання побудови діаграми деформування бетону та визначення коефіцієнта повноти епюри напружень//Ресурсоекономі матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Зб. наук. праць. - Рівне: Вид-во РДТУ, 2001. - Вип. 6. - С. 94-104.