

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ

А. О. ЕПОЯН

ПРОЧНОСТЬ И ДЕФОРМАЦИИ ЛЕГКИХ БЕТОНОВ НА
ВУЛКАНИЧЕСКИХ ЗАПОЛНИТЕЛЯХ ПРИ МНОГОКРАТНО
ПОВТОРНОЙ НАГРУЗКЕ*

(С о о б щ е н и е 2)

1. В предыдущем сообщении [1] были изложены результаты экспериментального исследования прочности и деформаций легких бетонов при статическом сжатии с кубиковой прочностью 200—500 кг/см² на литоидной пемзе и невспученном перлите. В настоящем сообщении приводятся результаты экспериментального исследования усталостной прочности легких бетонов. Характеристика материалов, составы бетонов и методика измерения деформаций приведены в [1]. Бетонные призмы испытывались под многократно повторной нагрузкой на 50-тонном и 100-тонном гидрпрессах типа ГРМ с пульсаторами.

Опыты проводились над призмами 10×10×40 см из литоидно-пемзобетона с прочностью 220 кг/см² и перлитобетона с прочностью заполнителя 420 кг/см². Одновременно испытывались образцы из тяжелого бетона на базальтовом щебне. Характеристика испытанных образцов приводится в табл. 1. Характеристика цикла повторной нагрузки (отношение минимального напряжения цикла к максимальному) была принята в пределах от $\rho=0,13$ до $\rho=0,95$. Призмная прочность бетона испытанных групп образцов колебалась в пределах $R_{пр}=200-450$ кг/см². База испытаний была принята равной 2 млн. циклам повторений нагрузки. Частота приложения повторной нагрузки в опытах составляла 400—670 циклов в минуту. Результаты испытаний приведены на рисунках 1—3 и в табл. 1.

Данные по выносливости испытанных образцов из тяжелого бетона оказались близкими с результатами обстоятельных экспериментально-теоретических исследований О. Я. Берга [2, 3]. В легких бетонах также, как и в тяжелых при $\rho = \text{const}$, наблюдалось уменьшение усталостной прочности с увеличением числа циклов повторной нагрузки. Уменьшение усталостной прочности наблюдалось даже при 8—10 млн. циклов нагружения, т. е. далеко за пределом принятой базы испытаний.

* Научный руководитель проф. В. В. Пинаджян.

Таблица 1

Наименование бетона	Серия образцов	Призменная прочность $R_{пр}$ кг/см ²	Возраст в сутках в период испытания		Характеристика цикла ρ	Коэффициенты к формуле (1)		Предел выносливости при $N=2 \cdot 10^6$		Относительный предел выносливости при ρ		
			начало	конец		A_1	B_1	$R'_{пр}$ кг/см ²	$R_{уор}$	0	0,1	0,2
Тяжелый бетон	Б-2-2	220	176	226	0,4	220	11,9	145	0,66	0,53	0,56	0,6
	Б-2-1	216	605	625	0,2	216	14,0	128	0,53	0,53	0,56	0,59
Легкий бетон на литондной пем-зе	Л-4,5-1	453	201	236	0,2	453	29,5	267	0,59	0,56	0,56	0,59
	Л-4-1	394	200	243	0,2	394	27,3	222	0,56	0,49	0,53	0,56
	Л-3-2	338	247	318	0,2	328	23,8	188	0,55	0,48	0,52	0,55
	Л-3-1	323	932	950	0,2	323	23,2	177	0,55	0,47	0,51	0,55
	Л-2,5-3	302	155	217	0,4	302	18,4	186	0,62	0,46	0,50	0,54
	Л-2,5-1	297	160	230	0,2	297	22,3	157	0,53	0,45	0,49	0,53
	Л-2,5-4	245	250	320	0,95	245	6,2	205	0,84			
	Л-2,5-4	242	250	320	0,6	242	10,2	178	0,74	0,56	0,59	0,62
	Л-2-3	200	52	88	0,2	200	18,0	86,5	0,43	0,33	0,38	0,43
	Л-2-3	205	52	88	0,6	205	11,7	131	0,64			
	Л-2-2	200	657	697	0,2	200	16,0	99	0,49	0,41	0,45	0,49
Легкий бетон на невулченном перлите	П-5-2	449	472	547	0,17	449	27,3	278	0,62			
	П-5-4	445	390	485	0,38	445	22,1	305	0,69	0,58	0,61	0,63
	П-5-4	443	390	485	0,6	443	17,1	336	0,76			
	П-2-1	253	301	336	0,6	253	12,3	176	0,69	0,45	0,49	0,53
	П-2-1	251	301	336	0,4	251	14,2	162	0,64			
	П-2-3	199	480	524	0,32	199	13,9	111	0,56			
	П-2-3	199	480	524	0,45	199	12,2	111	0,61	0,41	0,46	0,50
	П-2-3	198	480	524	0,13	198	16,7	92,2	0,47			

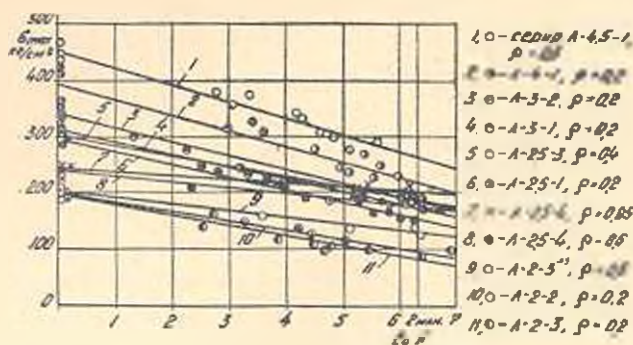


Рис. 1. Диаграмма выносливости легкого бетона на литонд-ной пемзе.

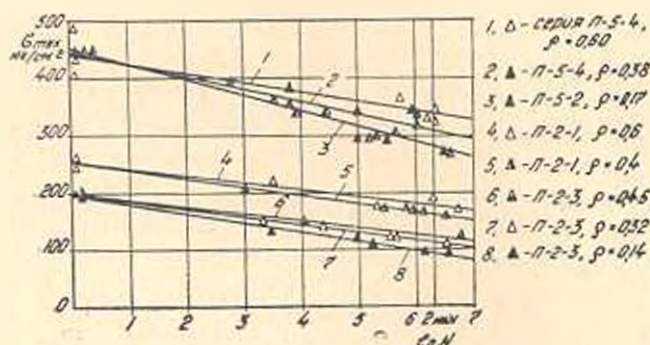


Рис. 2. Диаграмма выносливости легкого бетона на перлите.

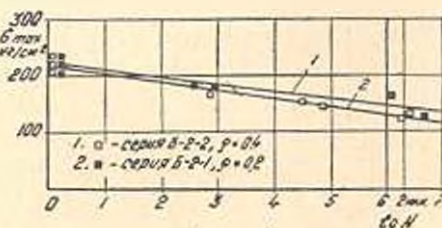


Рис. 3. Диаграмма выносливости тяжелого бетона.

Для установления экспериментальной зависимости между максимальным напряжением цикла и числом повторений нагрузки проведены корреляционные прямые. Как видно из рисунков 1 и 2, эти зависимости выражаются уравнением:

$$\sigma_{\max} = A_1 - B_1 \lg N, \quad (1)$$

где A_1 и B_1 — постоянные (при $R_{np} = \text{const}$; $\rho = \text{const}$), значения которых приведены в табл. 1. Величина $\sigma_{\max}$ в выражении (1) в дальнейшем принимается за ограниченный предел усталости, соответствующий 2 м.лн. циклам нагружения. Анализ результатов испытаний показал, что при одинаковой призмочной прочности тяжелого и легкого бетонов и одинаковой характеристике циклов повторной нагрузки имеет место более интенсивное уменьшение прочности легких бето-

нов с увеличением числа циклов нагружений. Опыты показали, что амплитуда изменения циклической нагрузки сильнее отражается на предел выносливости легкого бетона по сравнению с тяжелым.

Зависимость между относительным пределом выносливости $\sigma_{\max}/R_{\text{пр}}$ и характеристикой цикла может быть представлена линейно и выражена уравнением:

$$\sigma_{\max}/R_{\text{пр}} = k_y = A_2 + B_2 p, \quad (2)$$

где A_2 и B_2 — постоянные, значения которых приведены в табл. 2.

Таблица 2

Вид бетона	Серия образцов	Средняя призматическая прочность кг/см^2	Постоянные формулы (2)		Относительный предел выносливости при $p=0$	
			A_2	B_2	по формуле (2)	по [2] для тяжелого бетона
Легкий	П-5-2	446	0,58	0,28	0,58	0,60
	П-5-4					
	П-2-1	252	0,46	0,39	0,46	0,53
	П-2-3	198	0,41	0,44	0,41	0,51
	Л-2-3*	203	0,33	0,52	0,33	0,51
Тяжелый	Л-2,5-4	243	0,56	0,29	0,56	0,53
	Б-2-2	216	0,53	0,32	0,53	0,52
	Б-2-1					

* Образцы испытаны в трехмесячном возрасте бетона.

В табл. 2 относительные пределы выносливости при $p=0$ вычислены по формуле (2) и сопоставлены с данными, определенными по формуле О. Я. Берга [2]. Из табл. 2 видно, что относительный предел выносливости легких бетонов при одинаковых $R_{\text{пр}}$ и p несколько меньше, чем для тяжелого бетона. Кроме того, уменьшение характеристики цикла повторной нагрузки в легком низкопрочном бетоне приводит к более резкому, по сравнению с тяжелым бетоном, снижению величины $\sigma_{\max}/R_{\text{пр}}$. Зависимость относительного предела выносливости от характеристики цикла повторной нагрузки представлена на рис. 4.

В экспериментальных исследованиях выносливости бетона имеются противоречивые результаты в отношении влияния абсолютной величины статической кратковременной прочности бетона на его относительный предел выносливости. По данным О. Я. Берга при повышении призматической прочности тяжелого бетона от 200 до 450 кг/см^2 при $p=0$ относительный предел выносливости повышается примерно в 1,2 раза. Это обстоятельство является следствием повышения уровня напряжений микротрещинообразования с увеличением прочности бетона [2, 3]. Другие исследователи приходят к выводу, что относительный предел выносливости не зависит от прочности бетона [4].

На рис. 5 приведены экспериментальные данные О. Я. Берга и автора. Зависимость, отвечающая опытам автора, может быть представлена линейно, уравнением:

$$k_y (p=\text{const}) = A_3 R_{\text{пр}} + B_3, \quad (200 \leq R_{\text{пр}} \leq 450). \quad (3)$$

Здесь, при $\rho = 0$ для литондиопемзобетона $A_3 = 45 \times 10^{-5}$, $B_3 = 0,32$; для перлитобетона $A_3 = -64 \times 10^{-5}$, $B_3 = 0,29$.

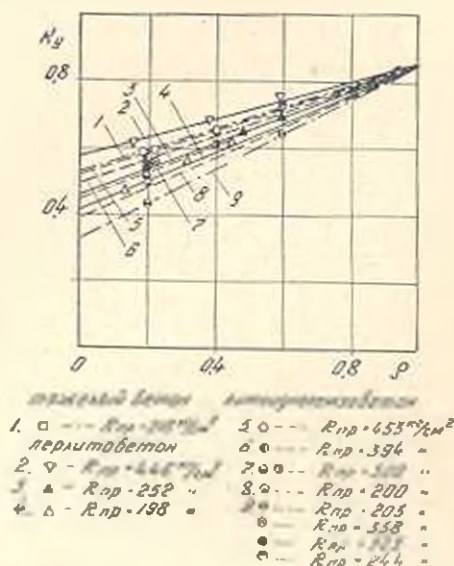


Рис. 4. Зависимость относительного предела выносливости бетона от характеристики цикла повторной нагрузки ρ .

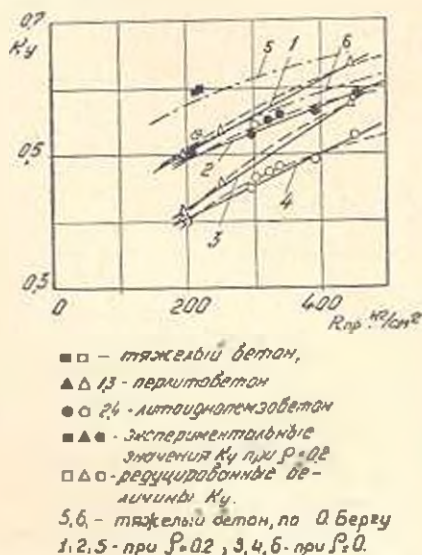


Рис. 5. Зависимость относительного предела выносливости бетона от призмочной прочности при характеристике цикла $\rho = 0,2$ (кривые 1 и 2) и $\rho = 0$ (кривые 3 и 4).

В силу (2) и (3) и, имея в виду, что $k_y = m_{л.л} = 0,85$ при $\rho = 1$ и $k_y = k_{y(\rho=0)}$ при $\rho = 0$ связь между относительным пределом выносливости, призмочной прочностью бетона и характеристикой цикла можно выразить уравнением:

$$k_{y\rho} = m_{л.л} \cdot \rho + k_{y(\rho=0)} \cdot (1 - \rho). \quad (4)$$

где $k_{y(\rho=0)}$ определяется из (3) при $\rho = 0$.

Анализ формулы (4) и экспериментальных данных, приведенных в табл. 1, показывает, что при повышении прочности легкого бетона на литондиопемзе от 200 до 500 кг/см^2 относительный предел выносливости k_y при $\rho = 0$ повышается в 1,33 раза, а для перлитобетона — в 1,46 раза. При этом, для обоих видов легкого бетона при прочности 200 кг/см^2 величина k_y почти одинакова, а при прочности 500 кг/см^2 величина k_y для перлитобетона на 10% выше, чем для литондиопемзобетона и одинакова с тяжелым бетоном.

На рис. 6 представлены кривые относительных пределов выносливости при $\rho = 0$, микротрещинообразования и их соотношения в зависимости от прочности литондиопемзобетона и перлитобетона при их трехмесячном и двухгодичном возрасте. Связь между относительным пределом выносливости и напряжениями микротрещинообразования можно выразить формулой:

$$k_{y(\rho=0)} = \frac{x_1 R_{пр}^2 + x_2 R_{пр} + x_3}{R_{пр}^2} (\text{alg} R_{пр} \dots b \pm c). \quad (5)$$

Здесь $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ — опытные коэффициенты, величины которых приведены в табл. 3; a, b, c — опытные величины, значения которых приведены в [1].

А. А. Гвоздев [5] и Р. Джонс [6] возникновение продольных трещин в бетоне при его сжатии объясняют неодинаковыми упруго-пластическими свойствами компонентов бетона и появлением на границах между ними значительных напряжений, приводящих к сдвигу. В тяжелых бетонах, в которых прочность заполнителя больше, чем прочность бетона ($R_3 > R_6$), более податливым обычно является цементный камень и выносливость этих бетонов предопределяется свойствами цементного камня.

В подавляющем большинстве случаев в легком бетоне $R_3 < R_6$ и заполнитель при повторных нагрузках в основном работает за пределом микротрещинообразования и выходит из строя раньше, чем бетон в целом.

Разрушение высокопрочных легких бетонов происходило внезапно, при трещинах, незаметных невооруженным глазом.

Результаты экспериментальных исследований легких бетонов на усталость сопоставлены в таблицах 4 и 5 с аналогичными данными для тяжелого бетона, полученными в ЦНИИС [2, 7]. Как известно, последние были использованы при составлении действующих ныне нормативных положений. Сопоставление сделано при одинаковых кубиковой (табл. 4) и призматической (табл. 5) прочностях, учитывая, что отношения $R_{пр}/R_{куб}$ для легких и тяжелых бетонов неодинаковы. Характеристика цикла повторной нагрузки принята разной $\rho = 0,1$. Из табл. 4 видно, что при одинаковой призматической прочности относительный предел выносливости легких бетонов на естественных заполнителях ниже, чем у тяжелого бетона. При одинаковой же кубиковой прочности бетонов (табл. 5) призматический предел выносливости ($R_{пр}$) легких бетонов больше, чем у тяжелого на 38%, при кубиковой прочности 200 кг/см² и на 6—14% при кубиковой прочности 500 кг/см². Это обстоятельство

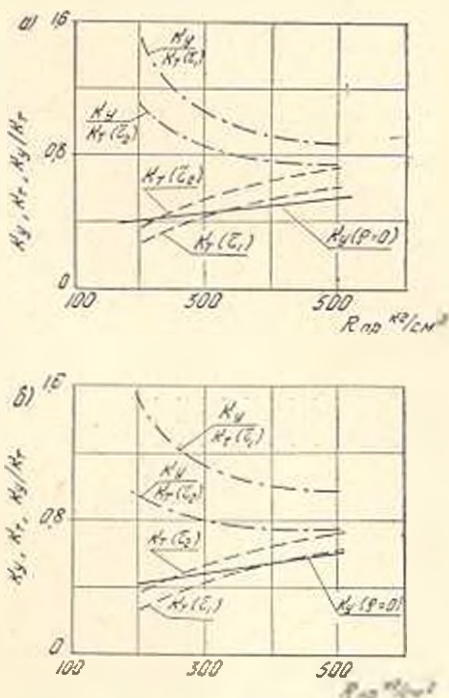


Рис. 6. Зависимость относительного предела выносливости $k_p (p=0,1)$ и относительного предела микротрещинообразования k от призматической прочности бетонов, а — диатомопемзабетон; б — перлитобетон; $k_p (—)$ — относительный предел микротрещинообразования в возрасте бетона $t \approx 3$ месяца; $k_p (---)$ — то же, при $t \approx 2$ года.

Таблица 3

Бетон	Возраст бетона при определении	Коэффициенты формулы (5)		
		α_1	α_2	α_3
Литондиопемзобетон	3 месяца	0,842	— 63,0	38500
	2 года	0,717	— 32,2	21300
Перлитобетон	3 месяца	1,049	— 123,6	43500
	2 года	0,810	— 66,1	18300

Таблица 4

Вид бетона	Относительный предел выносливости k_y при призмной прочности					
	200	250	300	350	400	450
Тяжелый	0,54	0,57	0,58	0,60	0,62	0,63
На литондной пемзе	0,45	0,47	0,49	0,51	0,53	0,56
На перлите	0,46	0,49	0,52	0,55	0,58	0,60

Таблица 5

Вид бетона	Характеристики	Кубиковая прочность (разм. $10 \times 10 \times 10$ см) в кг/см ²						
		200	250	300	350	400	450	500
Тяжелый	$R_{пр}$	124	162	200	238	277	315	353
	k_y	0,49	0,52	0,54	0,56	0,58	0,59	0,60
	$R_{пр}$	61	84	108	134	160	186	213
На литондной пемзе	$R_{пр}$	187	226	264	302	340	378	417
	k_y	0,45	0,46	0,48	0,49	0,51	0,53	0,54
	$R_{пр}$	84	105	127	149	174	199	226
На перлите	$R_{пр}$	187	226	264	302	340	378	417
	k_y	0,45	0,48	0,50	0,52	0,54	0,56	0,59
	$R_{пр}$	85	108	131	157	184	213	244

является следствием того, что отношение призмной прочности к кубиковой для легких бетонов выше, чем для тяжелых.

По результатам проведенных экспериментальных работ и полученных закономерностей определялись призмный предел выносливости легких бетонов с учетом роста их прочности во времени при $\rho = 0,1$, на базе 2 млн. циклов нагружений. Результаты подсчетов представлены в табл. 6. Согласно табл. 6 рекомендуется относительный предел выносливости при характеристике цикла $\rho = 0,1$ принимать для литондиопемзобетона $k_{y,6} = 0,80$, для перлитобетона $k_{y,6} = 0,85$.

Таблица 6

Марка бетона		200	250	300	350	400	500
Призменная прочность $R_{пр} = 0,81 R_{д.34}$ в кг/см ²		196	236	277	318	358	439
Коэффициент нарастания прочности во времени k_t		1,60	1,55	1,50	1,45	1,40	1,30
Призменная прочность с учетом времени $R_{пр(1)} = k_t \times R_{пр}$		314	364	415	461	502	570
Относительный предел выносливости $k_{y(1)}$	Литондиопемзобетон	0,50	0,52	0,54	0,56	0,58	0,60
	Перлитобетон	0,53	0,56	0,58	0,61	0,64	0,68
Призменный предел выносливости $R'_{пр} = k_{y(1)} \times R_{пр(1)}$	Литондиопемзобетон	157	189	224	258	291	342
	Перлитобетон	163	204	240	281	321	388
$k_{сб} = \frac{R'_{пр(1)}}{R_{пр}}$	Литондиопемзобетон	0,80	0,80	0,81	0,81	0,81	0,78
	Перлитобетон	0,83	0,86	0,87	0,88	0,90	0,88

В связи с этим коэффициенты снижения прочности $k_{сб}$ легких бетонов при других значениях ρ на базе 2 млн. повторений нагрузки с учетом роста прочности бетона рекомендуется принимать по табл. 7. В этой же таблице приведены величины $k_{сб}$ для тяжелого бетона, принятые в действующих нормативных положениях.

Таблица 7

Вид бетона	Значение $k_{сб}$ при ρ равном					
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
На литондной пемзе	0,80	0,85	0,89	0,94	0,98	1
На перлите	0,85	0,89	0,93	0,97	1	—
Тяжелый (по СНиП II—В.1-62, табл. 3)	0,75	0,8	0,85	0,9	0,95	1

Ա. Ն. ԵՓՈՅԱՆ

ՀՐԱՐԵԱՅԻՆ ԼՅԻՉՆԵՐՈՎ ԹԵԹԵՎ ԲԵՏՈՆՆԵՐԻ ԱՄՐՈՒԹՅՈՒՆԸ ԵՎ
ԴԵՖՈՐՄԱՑԻԱՆԵՐԸ ԲԱԶՄԱԿԻ ԿՐԿՆՎՈՂ ԲԵՌՆՎԱՆՔԻ ԴԵՊՔՈՒՄ

Ա մ փ ո փ ու մ

Առաջին հաղորդման [1] մեջ շարադրված էին Ա. Ն. Եփոյանի կողմից կատարված աստտիկորեն աղյուղ կարճատև սեղմման ժամանակ 200—500 կգ/սմ² խորանարդային ամրությամբ թեթև բետոնների ամրության և զեֆորմացիաների փորձարարական հետազոտումների արդյունքները:

Այս հաղորդման մեջ բերվում են թեթև բետոնների հոդնաձային ամրության փորձարարական հետազոտությունների արդյունքները: Այդ բետոններում օգտագործված են Հայկական հանրապետության լցիչներ՝ լիթոիդային պեմզա 220 կգ/սմ² ամրությամբ և պերլիտ բնական վիճակում, 442 կգ/սմ² ամրությամբ: Փորձարկումների բազան ընդունված է բնոնաձուրման 2 միլիոն ցիկլ կրկնություն, Կրկնվող բեռների հաճախականությունը եղել է 400—670 ցիկլ մեկ րոպեում: Հոգնաձայնության փորձարկման են ենթարկվել 187 բետոնն պրիզմա:

Փորձարարական հետազոտումների հիման վրա թեթև բետոնների ամրության իյնցման գործակցի՝ k_1 , արժեքները կրկնվող բեռների ցիկլի բնութագրի ? տարբեր չափերի ժամանակ բերված են աղյուսակ 7-ում: Այդ զորժակիցների միջոցով կարելի է որոշել թեթև բետոնների հոգնաձայնի ամրության սահմանները:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Епоян А. О. Прочность и деформации легких бетонов на вулканических заполнителях при многократной повторной нагрузке. Сообщение I. Известия АН АрмССР, серия ТII, т. XVII, № 5, 1964.
2. Бург О. Я., Писанко Г. Н., Хромен Ю. И. Предложения по величинам расчетных сопротивлений на выносливость бетонов высоких марок. Н.-г. отчет, ЦНИИС 1961.
3. Бург О. Я. Физические основы теории прочности бетона и железобетона, Трансжелдориздат, 1961.
4. Скрамтаев Б. Г., Шубенкин П. Ф., Баженов Ю. М. Исследование выносливости бетонов. Журн. "Бетон и железобетон", № 12, 1964.
5. Гвоздев А. А. Расчет несущей способности конструкций по методу предельного равновесия. Стройиздат, 1949.
6. Jones R. Mechanical properties of non-metallic brittle materials, London, 1958.
7. Бург О. Я. Исследование прочности железобетонных конструкций при воздействии на них многократной повторной нагрузки. Тр. ЦНИИС, вып. 19, Трансжелдориздат, 1956.