

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ

А. В. БЕЛУБЕКЯН

К ВОПРОСУ СОПРОТИВЛЕНИЯ БЕТОННЫХ И
 ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК ПРИ КРУЧЕНИИ

1. В практике проектирования железобетонных конструкций случай сложного нагружения, сопровождающийся закручиванием элементов, встречается довольно часто. В связи с этим представляет интерес выявление роли чистого кручения на несущую способность элементов. Первые систематические исследования прочности железобетонных элементов при чистом кручении были выполнены в 1910—1912 годах [1]. В дальнейшем в этом направлении были проведены многочисленные исследования.

Все известные автору экспериментальные исследования по чистому кручению и в частности [2] и [3] относятся к элементам из тяжелого железобетона. В 1968 г. в Центральной испытательной лаборатории АИСМ, автором, под руководством проф. В. В. Пинаджяна, проводились экспериментальные исследования кручения армированных балок из легкого бетона на литондной пемзе, в связи с широким применением этого вида бетона в ответственных несущих конструкциях. Эксперименты проводились на специальном стенде, описанном в [4]. Было испытано три типа балок прямоугольного сечения, схемы армирования которых показаны на рис. 1.

Балки армировались сварными каркасами. В качестве продольной арматуры применялась горячекатанная сталь периодического профиля класса А—II диаметром 16 мм. Хомуты изготавливались из стали класса А—I диаметром 6 мм. Для изготовления опытных балок применялся портландцемент Араратского завода без добавок, активностью 500, и литондная пемза Джраберского месторождения с объемным весом щебня $\gamma_{\text{ш}} = 810 \text{ кг/м}^3$ и песка $\gamma_{\text{п}} = 1100 \text{ кг/м}^3$. Составы бетонов, приведенные в табл. 1, были рекомендованы лабораторией гидротехнического бетона АИСМ.

Опытные образцы балок изготавливались в металлических формах. Одновременно изготавливались контрольные бетонные кубы с размерами ребер 15 см и бетонные призмы размерами $10 \times 10 \times 40 \text{ см}$. Все образцы освобождались из форм на третьи сутки и до 28-дневного возраста хранились во влажных опилках, а затем в закрытом помещении. По данным испытания на растяжение контрольных стальных образцов предел текучести и предел прочности для продольной арматуры получились равными и соответственно: $\sigma_{\text{т}} = 3500 \text{ кгс/см}^2$, $\sigma_{\text{пр}} = 6000 \text{ кгс/см}^2$; хомутов — $\sigma_{\text{т}} = 3530 \text{ кгс/см}^2$, $\sigma_{\text{пр}} = 4450 \text{ кгс/см}^2$.

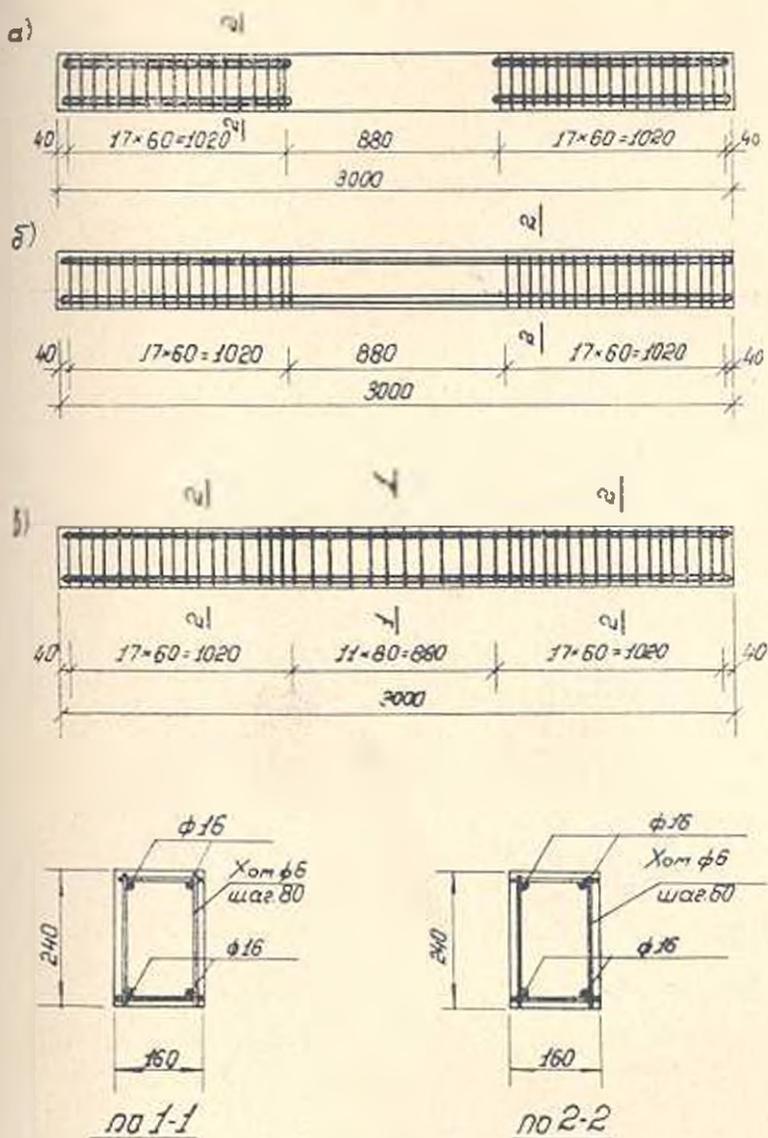


Рис. 1. Схемы армирования балок: а) Балки Б-II-9; Б-II-10; Б-IV-9; Б-IV-10. б) Балки Б-III-1; Б-III-2. в) Балки Б-I-2; Б-II-1; Б-IV-1; Б-IV-7.

Таблица 1

Составы легкого бетона

Проектная марка бетона	Расход материала на 1 м ³ бетона, в кг			
	цемент	песок	щебень	воза
150	240	470	770	250
350	475	610	470	250

В железобетонных балках в процессе их испытания измерялись углы поворота сечений, деформации продольной и поперечной арматуры. Углы поворота сечений балок определялись на концах элементов и в местах изменения шага хомутов (рис. 1) путем замера перемещений сечений с точностью 0,01 мм при помощи прогибомеров ПАО—6. Деформации всех продольных стержней измерялись в трех сечениях, находящихся друг от друга на расстоянии 25 см, при помощи датчиков сопротивления с базой 20 мм, приклеенных на ребрах арматуры. Деформации хомутов измерялись в трех сечениях при помощи датчиков, приклеенных на всех ветвях хомутов. Датчики сопротивления были гидроизолированы и концы их были выведены за пределы сечения балок. Деформации арматуры регистрировали при помощи автоматических измерителей деформаций АИ-1 с точностью 1×10^{-3} .

2. Образцы, показанные на рис. 1 а, в средней трети не были армированы. При кручении эти образцы разрушались по плоскому сечению, наклоненному под углом 45° к продольной оси балки (рис. 2). В



Рис. 2. Характер разрушения бетонных балок при кручении.

рассматриваемом случае имело место разрушение образцов, которое наступало сразу же после появления первых видимых трещин на поверхности бетона.

В табл. 2 приведены геометрические и прочностные характеристики балок с неармированными бетонными сечениями, испытанных при чистом кручении. Там же приведены результаты, полученные другими экспериментаторами. Прочность на сжатие испытанных автором образцов определялась сжатием до разрушения бетонных кубов, а прочность на растяжение определялась испытанием бетонных призм на раскол. Величина предела прочности на растяжение определялась по формуле:

$$R_s = \frac{2P}{\pi a^3}$$

В предпоследней графе табл. 2 приведены величины разрушающих крутящих моментов, вычисленных по известной формуле Надаи [5]:

Таблица 2

Результаты испытания бетонных балок на кручение

№ балок	Опыт	Вид бетона	b см	h см	R кгс/см ²	R _к кгс/см ²	M _к кгс. м	M _л кгс. м	M _у M _л
1 2	ДАЕ [1]		30	30	241	18,6	1730	1670	1,03
			25	42	244	18,6	1480	1430	1,03
4R7-1 5R7-1 6R7-1 4RW-1 5RW-1 6RW-1	Наваратна- раяна [2]	Тяже- лый	10,2	10,2	560	34,0	118	121	0,98
10,2			12,7	560	34,0	142	164	0,87	
10,2			15,24	560	34,0	191	208	0,92	
10,2			10,2	560	34,0	110	121	0,92	
10,2			12,7	560	34,0	178	164	1,09	
10,2			15,24	560	34,0	198	208	0,95	
Б-II-9 Б-II-10 Б-IV-9 Б-IV-10	АНСМ	Лег- кий	16,0	24,0	360	16,3	420	390	1,07
16,0			24,0	268	14,3	375	342	1,1	
16,0			21,0	143	11,6	280	276	1,01	
16,0			24,0	143	11,6	280	276	1,01	

$$M_1 = \frac{1}{2} b^2 \left(b - \frac{b}{3} \right) R_{к} \quad (1)$$

где b и h — соответственно ширина и высота сечения образцов. Как видно из последней графы табл. 2, формула (1) дает результаты, хорошо согласующиеся с экспериментальными данными. Имея в виду, что предельный крутящий момент бетонных образцов по формуле Надаи находится в прямой зависимости от $R_{к}$, можно прийти к выводу, что несущая способность балок из легкого бетона на литонидной пемзе марок 150 и выше должна быть несколько меньше несущей способности аналогичных балок из тяжелого бетона тех же марок, т. к. $R_{к}$ для легкого бетона на литонидной пемзе меньше, чем для тяжелого бетона [6], [7] и др.

3. В образцах из легкого бетона, армированных только продольной арматурой (рис. 1 б), трещины в зоне разрушения при кручении развивались по двум горизонтальным и одной вертикальной граням балок (рис. 3). Геометрические и прочностные характеристики испы-

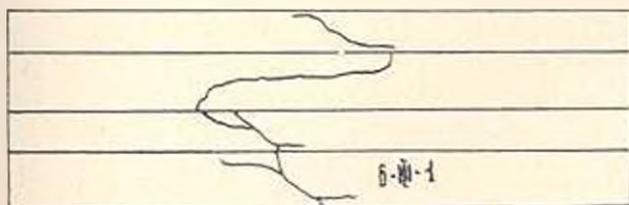


Рис. 3. Расположение трещин на гранях балки Б-II-1, армированной только продольной арматурой.

танных балок приведены в первых десяти графах табл. 3. Там же приведены результаты аналогичных опытов Наваратнараяна [1]. Разру-

Таблица 3

Результаты испытания на кручение бетонных балок, армированных только продольной арматурой

№№ балок	Опыты	Вид бето-на	b см	h см	R кг/см ²	R _к кг/см ²	Продольная армат.		M _к кгс. м	M ₁ по (1) кгс. м	M _к /M ₁
							диаметр мм	к-во			
1	ДАЕ [1]	Тяжелый	30	30	244	18,6	18	4	1880	1670	1,12
2			30	30	244	18,6	18	8	1970	1670	1,18
3			21	42	241	18,6	18	4	1570	1430	1,09
4			21	42	214	18,6	18	6	1630	1430	1,14
Б-III-1 В-III-2	АНСМ	Легкий	16	24	310	15,6	16	4	380	374	1,01
			16	24	310	15,6	16	4	360	374	0,96

шение балок наступало сразу же после появления первых трещин, при этом судя по показаниям датчиков в продольной арматуре в момент разрушения возникли незначительные растягивающие напряжения. Анализ табличных данных показывает, что величины разрушающих нагрузок для образцов с продольным армированием мало отличаются от разрушающих нагрузок для неармированных балок. И в этом случае формула предельного крутящего момента А. Надаи дает удовлетворительные результаты.

4. В образцах, армированных поперечной и продольной арматурой, разрушение носило более пластичный характер. Здесь крутящий момент трещинообразования оказался меньше предельного крутящего момента, при этом в стадии разрушения образцов напряжения в поперечной арматуре достигали предела текучести.

На рис. 4 и 5 показана зависимость между крутящими моментами и напряжениями в продольной арматуре и в хомутах для трех балок армированных продольной и поперечной арматурой. Момент трещинообразования при кручении балок определялся по точкам резкого перелома кривых, показанных на рис. 4 и 5. После трещинообразования, как видно из этих кривых, происходило перераспределение усилий между бетоном и арматурой, при этом напряжения в арматуре резко возрастали и в хомутах в стадии разрушения достигали предела текучести. Геометрические и прочностные характеристики испытанных балок приведены в табл. 4. Там же приведены результаты опытов ДАЕ [1] и опытов Наваратнараяна [2], Паидита [3].

В табл. 5 экспериментальные данные сопоставлены с расчетными, при этом расчетный крутящий момент трещинообразования M_1 вычислялся по формуле (1), а разрушающий крутящий момент M_2 вычислялся по формулам, приведенным в [8].

В табл. 5 $M_{т.к.}$ — опытная величина момента трещинообразования балки при кручении; M_k — опытная величина предельного крутящего момента.

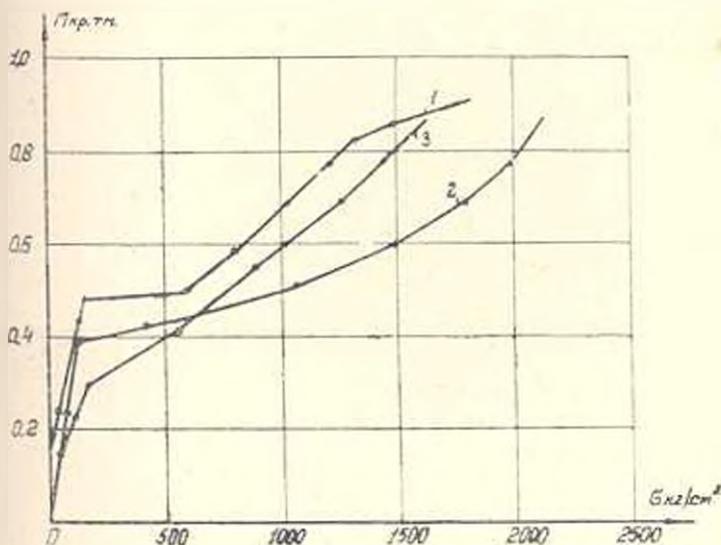


Рис. 4. Средние напряжения в продольной арматуре балок, армированных продольными стержнями и хомутами. 1. Балка из тяжелого бетона Б-I—2. 2. Балка из легкого бетона Б-II—1. 3. Балка из легкого бетона Б-IV—7.

Таблица 4
Геометрические и прочностные характеристики балок, армированных продольной и поперечной арматурой

№ балок	Опыты	Вид бетона	b см	h см	R кгс/см ²	R _р кгс/см ²	σ _с кгс/см ²	τ _с кгс/см ²	σ _{ср} кгс/см ²	τ _{ср} кгс/см ²	η см	
1	ДАЕ [1]	тяжелый	30,0	30,0	244	18,6	3813	38,6	4080	1,37	10	
4RT-1	Павловтарна [1]	тяжелый	10,2	10,2	560	34,0	—	—	4212	0,34	7,62	
4RT-2			10,2	10,2	560	34,0	—	—	4212	0,34	7,62	
4RT-3			10,2	10,2	560	34,0	—	—	4212	0,34	7,62	
5RT-1			10,2	12,7	560	34,0	—	—	4212	0,31	7,62	
5RT-2			10,2	12,7	560	34,0	—	—	4212	0,34	7,62	
5RT-3			10,2	12,7	560	31,0	—	—	4212	0,34	7,62	
6RT-1			10,2	15,2	560	34,0	—	—	4212	0,34	7,62	
6RT-2			10,2	15,2	560	34,0	—	—	4212	0,31	7,62	
6RT-3			10,2	15,2	560	31,0	—	—	4212	0,34	7,62	
B-1	Пасадит [3]	тяжелый	15,5	31	450	32,5	4100	4,7	4030	1,25	15,24	
C-4			16,5	31	510	35,0	3500	6,1	4030	1,25	11,4	
D-4			15,7	31	450	29,4	3640	18,1	4030	1,25	11,4	
E-3			15,7	31	415	29,8	4100	4,7	4030	1,25	11,4	
B-I-2	ЛИСМ	тяжелый	16,0	24,0	325	20,0	3500	14,1	3530	1,0	8	
B-II-1			легкий	16,2	24,0	410	17,0	3500	14,1	3530	1,0	8
B-IV-1				16,0	24,0	157	12,1	3500	14,1	3530	1,0	8
B-IV-7				16,0	24,0	229	13,1	3500	14,1	3530	1,0	8



Рис. 5 Средние напряжения в хомутах балок, армированных продольными стержнями и хомутами. 1. Балка из тяжелого бетона Б-I—2. 2. Балка из легкого бетона Б-II—1. 3. Балка из легкого бетона Б-IV—7.

Таблица 5
Сопоставление экспериментальных и расчетных величин крутящих моментов балок, армированных продольной и поперечной арматурой

№ балок	Экспериментальная величина крутящего момента, кгс·м		Расчетная величина крутящего момента, кгс·м		$\frac{M_{1,2}}{M_1}$	$\frac{M_2}{M_1}$
	$M_{1,2}$	M_2	трещинообразования M_1 по формуле (1)	предельная M_2 по формулам [8]		
1	2180	2870	1670	1900	1,3	1,51
4RT-1	141	189	121	—	1,16	—
4RT-2	141	181	121	—	1,16	—
4RT-3	130	162	121	—	1,07	—
5RT-1	156	187	164	—	0,95	—
5RT-2	156	195	164	—	0,95	—
5RT-3	158	183	164	—	0,97	—
6RT-1	218	258	208	—	1,05	—
6RT-2	239	311	208	—	1,15	—
6RT-3	218	249	208	—	1,05	—
B-4	—	970	—	430	—	2,25
C-4	—	1270	—	630	—	2,0
D-4	—	1660	—	630	—	2,64
E-3	—	1370	—	580	—	2,4
B-I-2	510	910	480	555	1,06	1,63
B-II-1	420	570	415	555	1,01	1,57
B-IV-1	300	735	290	555	1,03	1,48
B-IV-7	330	825	312	555	1,06	1,32

Анализ данных, приведенных в табл. 5, показывает, что момент трещинообразования балок армированных продольной и поперечной арматурой при кручении можно определять по формуле А. Надаи. Между экспериментальными величинами предельных крутящих мо-

ментов и расчетными величинами, вычисленными по формулам [8], имеется существенное расхождение, поэтому эти формулы по мнению автора нуждаются в уточнении.

Резюмируя изложенное в статье, отметим, что предельный крутящий момент бетонных балок, а также балок армированных только продольной арматурой с достаточной точностью можно определить по формуле (1), предложенной А. Надаи. Момент трещинообразования при кручении балок армированных продольной и поперечной арматурой, также можно определить по формуле (1).

Несущая способность балок на кручение может быть увеличена при одновременном их армировании продольными стержнями и хомутами. Армирование балок только продольными стержнями существенного эффекта не дает.

Эреванский политехнический институт
им. К. Маркса, АН СМ

Поступило 20.1.1969.

Ա. Վ. ԲԵԼՈՒՅԵԱՆ

ԻՑՏՈՆՅԱ ԵՎ ԵՐԿԱՔՐԵՏՈՆՅԱ ՀԵՆՈՒՆՆԵՐԻ ԿՐՈՂՈՒՄԻՆԻՑԱՆ ՀԱՐՑԻ ՄԱՍԻՆ
ԱՂՈՐԴԱԿԱՆ ԿԵԿՓՈՒՄ

Ա. Վ Վ Ե Բ Ե Ա Ն

Հողվածում բերվում են լիմիտային պեմզայով մեթն բետոնից ամրանա-
փորված ու առանց ամրանի հեծանների կրողունակության և ճարակահու-
թյան փորձառական հետազոտությունների արդյունքները:

Նշվում է, որ բետոնի հեծանի սլորոց մոմենտը, ինչպես նաև ամրանափոր-
ված հեծանների ճարտաչափման մոմենտը յա՛վ նկարագրվում է Ա. Նազայի
բանաձևով:

Փորձարկման հետազոտությունների արդյունքներով, որոնք բերված են
հողվածում, նշվում է, որ որման դեպքում երկաթբետոնյա հեծանների կրող-
ունակության որոշման գործող նորմատիվներում եղած բանաձևը կարիք է
զգում ճիշտան:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Deutscher Ausschuss für Eisenbeton, Widerstand gegen Verddrehung, II, 16, Berlin, 1912.
2. Navaratnaranjan V. A New Approach to the Ultimate Strength of concrete in pure torsion. JACI, 1968, Proc. 65, No 2.
3. Pandit G. S., Warwaruk I. Reinforced Beams in Combined Bending and Torsion. JACI, 1968, Proc. 65, № 4.
4. Бельбуэян А. В. Экспериментальное исследование несущей способности балок из легкого железобетона при совместном действии изгиба и кручения. Известия АН АрмССР (серия технических наук), т. XXI, № 5, 1968.
5. Надаи А. Пластичность и разрушение твердых тел. М., 1954.
6. Номинян С. Г. Исследование деформаций обычных и предварительно напряженных изгибаемых элементов из высокопрочных легких бетонов на естественных заполнителях. (Автореферат диссертации). М., 1966.
7. Аюлян А. В. Прочность бетонов на легких заполнителях при растяжении и изгибе. «Промышленность Армении», № 11, 1968.
8. Инструкция по проектированию железобетонных конструкций. Госстрой СССР. М., 1968.