

Сравнительный анализ формул российских и зарубежных норм для расчета прочности стенок двутавровых балок со стальным и композитным поперечным армированием

С.В. Усанов, М.М. Тамов

Кубанский государственный технологический университет

Аннотация: В статье представлены результаты сравнительного анализа формул российских и зарубежных норм для расчета прочности стенок двутавровых балок со стальным и композитным поперечным армированием. Известно, что на прочность стенки оказывают влияние свойства поперечной композитной полимерной арматуры (АКП), в частности ее относительно низкий модуль упругости. При расчете стенки по прочности как отечественные, так и зарубежные нормы проектирования не делают различия между конструкциями с композитным и стальным поперечным армированием. Для оценки точности формул норм был выполнен расчет по выборке, составленной из результатов наших испытаний и опытов других авторов. При расчете по методике СП 295 и Eurocode 2 получены завышенные значения сопротивления стенки с АКП. Формулы норм для прочности стенок, дающие существенный запас при расчете балок со стальным поперечным армированием, также завышают сопротивление балок и для образцов с композитным поперечным армированием.

Ключевые слова: прочность стенки, двутавровые балки, поперечное армирование, нормы проектирования, базальтокомпозитная арматура, стальная арматура.

Применение композитной полимерной арматуры (АКП) в качестве альтернативы традиционной стальной арматуре началось в нашей стране и за рубежом более полувека назад для конструкций, предназначенных для эксплуатации в агрессивной среде [1]. В течение длительного времени использование АКП было крайне ограничено из-за высокой стоимости ее производства и дефицитности волокон [2]. За последние десятилетия спрос на композитную арматуру увеличивается, и ожидается дальнейшее увеличение объемов применения АКП в строительстве [3].

На применение АКП в качестве поперечного армирования бетонных конструкций оказывают влияние следующие ее особенности: пониженное сопротивление криволинейных участков хомутов, относительно низкий модуль упругости, отсутствие физического предела текучести при высоком временном сопротивлении растяжению, низкий «нагельный» эффект [4].

Отечественные нормы проектирования конструкций, армированных АКП (СП 295.1325800.2017 «Конструкции бетонные, армированные полимерной композитной арматурой. Правила проектирования»), не содержат формул для расчета прочности стенок по сжатым бетонным полосам. Этот расчет необходимо выполнять по формуле для проектирования железобетонных конструкций. Методика расчета на поперечную силу норм США [5] предполагает исключение возможности раздробления бетона стенки ограничением максимальных расчетных усилий в поперечной арматуре. Таким образом, в области расчета стенки по прочности, нормы проектирования не делают различия между конструкциями с композитным и стальным поперечным армированием. Между тем, характеристики поперечного армирования в значительной мере влияют на прочность тонких стенок балок в зоне действия поперечных сил [6].

Для оценки точности формул, принятых в нормах проектирования, был выполнен расчет по выборке, составленной из результатов наших испытаний балок с композитной поперечной арматурой [7] и опытов других авторов (М.М. Тамов [8], F. Leonhardt [9], B.V. Rangan [10], Г.С. Алиев [11], А.Р. Абдуллаев [12]) с балками со стальным поперечным армированием (таблица 1). Расчет производили по п. 6.1.22 СП 295 (ссылается на формулу 8.55 СП 63.13330.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения»), формуле п. 8.2.3 норм США для конструкций с АКП (ACI 440.1R [5]), а также по формуле 7.58 норм проектирования мостов СП 35.13330.2011 «Мосты и трубы» и по формулам 6.8 и 6.11 (для вертикального и наклонного расположения стержней соответственно) Еврокода 2 [13]. Формулы СП 35 и Еврокода 2 применяют для проектирования конструкций со стальной арматурой. Тем не менее, результат расчета по ним также

представляет интерес, учитывая вышеупомянутый принцип распространения формул норм для железобетонных конструкций на конструкции с АКП.

Таблица №1

Фактические и расчетные разрушающие нагрузки балок

№ п/п	Автор	Шифр балки	Q_{exp} , кН	$\frac{Q_{SP295}}{Q_{SP63}}$, кН	Q_{ACI} , кН	Q_{SP35} , кН	Q_{EC2} , кН
1	Тамов М.М. [8]	Б1	88,7	74,65	26,01	59,33	47,50
2		Б2	68,1	62,95	23,88	53,71	40,06
3		Б6	81,8	69,73	25,14	57,13	44,38
4		Б19	52,1	65,52	24,36	55,06	41,70
5		Б23	48,9	58,03	22,93	50,94	36,93
6		Б24	61,9	74,65	26,01	59,33	47,50
7		Б25	59,6	72,07	25,55	58,21	45,87
8		Б27	62,9	62,95	23,88	59,82	40,06
9		Б28	78,1	72,07	25,55	64,84	45,87
10		Б29	82,7	75,82	26,21	66,63	48,25
11		Б30	84,1	77,22	26,45	67,26	49,14
12	Leonhardt F. [9]	NR8	120,0	89,78	46,80	100,08	57,13
13		NR10	225,0	143,05	59,07	143,74	91,04
14		NT8-1	210,0	119,87	54,07	126,18	76,28
15		NT10	165,0	102,11	49,91	111,23	64,98
16		T1	800,0	580,17	236,51	578,49	369,22
17		T2	1160,0	524,39	224,85	538,14	471,95
18	Усанов С.В. [7]	Б1	54,9	63,21	23,93	48,14	55,20
19		Б2	57,6	63,94	24,07	50,01	54,08
20		Б3	77,4	66,69	24,58	52,87	58,71
21		Б5	61,7	57,35	22,79	47,41	93,48
22		Б6	62,1	59,55	23,23	51,77	105,28
23		Б7	76,2	67,24	24,68	58,35	104,60
24		Б8	70,5	59,00	23,12	57,36	104,31
25		Б9	42,7	63,76	24,04	48,41	57,17
26		Б10	47,1	63,76	24,04	49,92	54,58
27		Б11	51,2	68,71	24,95	53,82	54,60
28		Б13	48,1	59,00	23,12	48,31	80,01
29		Б14	50,3	59,00	23,12	51,46	98,29
30		Б16	55,4	56,43	22,61	55,67	70,59
31		Б18	48,7	71,82	25,51	53,57	64,60
32		Б21	42,8	64,86	24,24	50,96	90,63
33		Б23	46,3	60,10	23,33	55,27	78,99
34		Б24	56,2	67,24	24,68	61,48	96,69
35		Б11Э	65,1	67,61	24,75	61,70	60,70
36		Б12Э	74,5	67,61	24,75	62,50	59,92
37	Б19Э	62,5	69,44	25,08	62,67	60,08	
38	Rangan B.V. [10]	I-1	453,1	428,70	144,04	366,15	272,82
39		I-3	369,1	311,77	113,34	286,55	198,41
40		I-4	416,0	362,12	123,11	313,05	230,45
41	Алиев Г.С. [11]	БТ-II-1(а)	102,5	66,53	32,73	72,65	42,34
42		БТ-II-1(б)	95,0	68,11	33,51	74,38	43,35

43		БО-III-3	106,9	80,19	37,19	85,48	51,03
44	Абдуллаев А.Р. [12]	БД-I-3д	114,9	100,46	44,20	104,48	63,93

В таблице 2 даны средние отношения полученных расчетных значений Q_{pred} разрушающей поперечной силы к опытным значениям Q_{exp} . Как видно, для балок со стальной поперечной арматурой наибольшая разница с фактической несущей способностью получается при применении формулы норм США: для исследованной выборки она недооценивает прочность стенки примерно в 3,1 раза. При этом все расчетные значения, вычисленные по этой формуле, оказались ниже соответствующих опытных значений. Для других рассмотренных формул норм среднее значение отношения Q_{exp}/Q_{pred} не превышает 1,9. Теоретическое значение Q_{pred} в нескольких случаях расчета по СП 295/СП 63 и СП 35 получается выше Q_{exp} . Наибольший разброс значений Q_{exp}/Q_{pred} получен при расчете по методике СП 295/СП 63.

Таблица № 2

Результаты расчета прочности стенки

Параметр	СП 295, СП 63	ACI 440.1R [5]	СП 35	Еврокод 2 [13]
Среднее значение Q_{exp}/Q_{pred} для балок со стальными хомутами	1,24	3,08	1,3	1,9
Коэффициент вариации	0,268	0,210	0,200	0,222
Среднее значение Q_{exp}/Q_{pred} для балок с композитными хомутами	0,9	2,4	1,06	0,81
Коэффициент вариации	0,189	0,186	0,164	0,302
Среднее значение Q_{exp}/Q_{pred} для всей выборки	1,09	2,77	1,19	1,41
Коэффициент вариации	0,290	0,237	0,212	0,462

Для образцов с композитным поперечным армированием в результате расчетов по нормам США так же, как и при расчете железобетонных балок, получена существенная недооценка прочности стенки (в среднем в 2,4 раза). Такие запасы могут возникать вследствие того, что вычислениями по формуле ACI, ограничивающей напряжения в поперечной арматуре,

исключают не только разрушение по наклонным полосам, но и чрезмерное раскрытие наклонных трещин. Иначе обстоит дело с остальными рассмотренными формулами норм проектирования, назначением которых является только обеспечение прочности стенки. Формула СП 35 в среднем дает небольшой запас по отношению к опытным значениям – отношение Q_{exp}/Q_{pred} равно 1,06. При этом, средний запас для железобетонных балок при применении этой формулы был примерно на 25% выше. Формулы СП 295 / СП 63 и Eurocode 2 завышают сопротивление стенки с АКП – отношения Q_{exp}/Q_{pred} для них равны, соответственно, 0,9 и 0,81.

Таким образом, формулы норм для прочности стенок, дающие существенный запас при расчете балок со стальным поперечным армированием, завышают сопротивление балок с композитным поперечным армированием.

Литература

1. Степанова В.Ф. Арматура композитная полимерная. М.: Бумажник, 2013. 200 с.
2. Полищук А.С. Вестник магистратуры. – 2018. №7 (82). С. 31–32.
3. Shehata E., Morphy R. and Rizkalla S. Fibre reinforced polymer shear reinforcement for concrete members: behaviour and design guidelines. Can. J. Civ. Eng., 2000, № 27, pp. 859–872.
4. Fico R., Prota A. and Manfredi G. Assessment of Eurocode-like design equations for the shear capacity of FRP RC members. Composites Part B: Engineering. 2008. V. 39. No. 5. Pp.792–806.
5. ACI 440.1R–15. Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer Bars. American Concrete Institute, 2015. 88 p.



6. Pochinok V.P., Tamov M.M., Greshkina E.V. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: XXIII International Scientific Conference on Advance in Civil Engineering, Vietnam, 2020, vol. 869. Pp.230–241.
7. Усанов С.В., Тамов М.М. Инженерный вестник Дона. – 2022. №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2022/7572.
8. Тамов М.М. Прочность тонких стенок железобетонных балок на приопорных участках с учетом предыстории загрузки: дис. ... канд. техн. наук 05.23.01. Краснодар, 2013. 208 с.
9. Leonhardt F. and Walther R. The Stuttgart Shear Tests, 1964, №111, 134 p.
10. Rangan B.V. ACI Structural Journal, 1991, №1 (88), pp. 12–16.
11. Алиев Г.С. Прочность и трещиностойкость стенок двутавровых железобетонных балок из тяжелого и облегченного бетонов при действии поперечных сил: дис. ... канд. техн. наук 05.23.01. Ростов-на-Дону, 1979. 151 с.
12. Абдуллаев А.Р. Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2007. №2. С. 87–89.
13. Eurocode 2. Design of Concrete Structures–Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings. European Committee for Standardization, 2004. 230 p.

References

1. Stepanova V.F. Armatura kompozitnaya polimernaya [Fiber-reinforced polymer bars]. M.: Bumazhnik, 2013. 200 p.
 2. Polishchuk A.S. Vestnik magistratury. 2018. №7 (82). Pp. 31-32.
 3. Shehata E., Morphy R. and Rizkalla S. Can. J. Civ. Eng., 2000, № 27, pp. 859-872.
 4. Fico R., Prota A. and Manfredi G. Composites Part B: Engineering. 2008. V. 39. No. 5. Pp.792-806.
-

5. ACI 440.1R-15. Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer Bars. American Concrete Institute, 2015. 88 p.
6. Pochinok V.P., Tamov M.M., Greshkina E.V. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: XXIII International Scientific Conference on Advance in Civil Engineering, Vietnam, 2020, vol. 869. Pp.230-241.
7. Usanov S.V., Tamov M.M. Inzhenernyj vestnik Dona. 2022. №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2022/7572.
8. Tamov M.M. Prochnost' tonkikh stenok zhelezobetonnykh balok na priopornykh uchastkakh s uchetom predystorii zagruzheniya [Thin web strength of reinforced beams at the regions near the support with preliminary loading background]: dis. ... kand. tekhn. nauk 05.23.01. Krasnodar, 2013. 208 p.
9. F. Leonhardt and R. Walther. The Stuttgart Shear Tests, 1964, №111, 134 p.
10. Rangan B.V. ACI Structural Journal, 1991, №1(88), pp. 12-16.
11. Aliyev G.S. Prochnost' i treshchinostoykost' stenok dvutavrovyykh zhelezobetonnykh balok iz tyazhelogo i oblegchennogo betonov pri deystvii poperechnyykh sil [Shear strength and shear crack resistance of the web of I-shaped beams made of light-weight concrete]: dis. ... kand. tekhn. nauk 05.23.01. Rostov-na-Donu, 1979. 151 p.
12. Abdullayev A.R. Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskiy region. Tekhnicheskkiye nauki. 2007. №2. Pp. 87–89.
13. Eurocode 2. Design of Concrete Structures – Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings. European Committee for Standardization, 2004. 230 p.