

К расчету по прогибам железобетонных колонн, усиленных композитными материалами

С.В. Георгиев

Донской государственной технической университет, г. Ростов-на-Дону.

Аннотация: В статье приведены данные о влиянии внешнего композитного армирования железобетонных колонн на их деформативные свойства. Установлено, что результаты расчетов усиленных образцов по действующим нормам по деформациям имеют значительные расхождения с опытом. На основе анализа результатов экспериментов, в методику норм при расчете прогибов внесены предложения, которые учитывают вид и процент композитного армирования и обеспечивают хорошее совпадение опытных и теоретических данных.

Ключевые слова: бетон, железобетон, композитный материал, углепластик, внешнее армирование, деформации, прогибы, сжатые элементы.

Исследования железобетонных и каменных конструкций, усиленных композитными материалами, кафедра железобетонных и каменных конструкций ДГТУ осуществляет с 2012 года. Эти исследования носят комплексный характер, так как охватывают весь спектр напряженно-деформированного состояния изгибаемых и сжатых железобетонных элементов. Материалы этих исследований уже достаточно широко освещены в открытой печати, в том числе и на страницах Инженерного вестника Дона. В частности, работы [1-3] посвящены исследованию конструкций, имеющих внутреннюю пластиковую рабочую арматуру.

Предложения по совершенствованию расчётного аппарата, которые учитывают особенности внешней композитной арматуры, опубликованы в работах [4-7].

Настоящая статья посвящена предложениям по уточнению расчета сжатых железобетонных элементов по деформациям. Характеристика опытных образцов приведена в работах [8-11]. Прочностные показатели опытных образцов представлены в работах [12-15]. Предлагаемые ниже рекомендации базируются на анализе напряженно-деформированного

состояния бетона опытных образцов и деформативности стоек при различных значениях эксцентриситета приложения нагрузки [16,17].

Предпосылки к нормативному расчету:

- При расчете по деформациям использовались экспериментальные прогибы f^{exp} , зафиксированные при уровне нагрузки равной 95% от разрушающей ($N=0,95N_{ult}$).

- В расчете по прогибам использовались экспериментальные силы N^{exp} и моменты M^{exp} . Моменты определялись по формуле $M^{exp} = N^{exp} \cdot (e_0 + f^{exp})$, где f^{exp} – экспериментальные значения прогибов.

- Для удобства анализа, все стойки при расчёте по прогибам были объединены в группы, объединяющими факторами были: первый – наличие или вид усиления; второй – наличие или отсутствие трещин, согласно расчета по образованию трещин.

Известно, что расчёт по прогибам железобетонных конструкций выполняется по одному из двух алгоритмов в зависимости от результата расчета по образованию трещин. В отношении конструкций, усиленных композитными материалами, расчёт ведется аналогично. Следовательно, два разных алгоритма расчета необходимо рассматривать индивидуально.

Итого, все образцы были разделены на пять групп, каждая из которых была отдельно проанализирована.

- Для оценки результатов теоретического расчета использовался такой показатель, как сумма среднеквадратических отклонений $\sum \Delta^2$ теоретических прогибов от экспериментальных, которая определялась по формуле $\sum \Delta^2 = \sum_{i=1}^n (1 - f_i^{theor} / f_i^{exp})^2$. В табл. 1 приведены значения сумм среднеквадратических отклонений для каждой группы стоек дважды: первое рассчитанное по нормам, а второе с учетом предложений по коррекции.

Значения сумм среднеквадратических отклонений в табл. 1 выделены курсивом «жирно».

- Расчет по образованию трещин всех стоек и расчет по прогибам стоек, усиленных композитными материалами в продольном направлении, выполнялся по (СП 164.1325800.2014). Расчет по прогибам колонн, усиленных в поперечном направлении, выполнялся по (СП 63.13330.2012). Такое решение было принято, потому что для конструкций, усиленных в поперечном направлении, в Своде правил по усилению (СП 164.1325800.2014) алгоритма расчета по прогибам нет. Результаты расчета по образованию трещин

- Дополнительно были рассчитаны не усиленные (эталонные) стойки по образованию трещин и по прогибам. Это было сделано для проверки точности расчетного аппарата, приведенного в (СП 63.13330.2012), по которому, как было написано выше, также рассчитываются стойки, усиленные в поперечном направлении.

Результаты расчета по образованию трещин, а также теоретические и экспериментальные прогибы приведены в табл. 1.

Для удобства анализа результатов расчетов, шифр стоек заменён на порядковый номер опытных образцов.

Выводы и анализ результатов нормативного расчета:

1. Результаты расчёта по образованию трещин для большинства стоек адекватны, исключением стали образцы (2), (10), (11), (12). Это стойки одной серии, имеющие одинаковую гибкость и эксцентриситет приложения нагрузки, по характеру работы являются внецентренно сжатыми с малым эксцентриситетом приложения нагрузки. При вычислении прогибов этих стоек получили значения, существенно превышающие экспериментальные прогибы. Поиск решений привел к расчету по образованию трещин, который

для этих стоек дал погрешность. Такой вывод позволили сделать следующие наблюдения. На стойках (2), (10), (11) на гранях колонн в центре по их длине

Таблица № 1

Результаты расчетов по образованию трещин и по прогибам

Порядковый номер	Шифр образца	Параметры			Трещины на	f^{exp} , мм	По нормам		С учетом переложений	
		λ_h	e_0	$R_{b,n}^{exp}$, МПа			f^{theor} , мм	f^{theor}/f^{exp}	f^{theor} , мм	f^{theor}/f^{exp}
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Эталонные стойки										
1	АК	10	0,2	43,5	нет	0,9	0,4	0,44	0,82	0,91
2	БК	10	2,2	38,92	нет	5,3	2,0	0,38	4,0	0,75
3	АГ	20	0,4	39,16	нет	13,0	6,8	0,52	13,4	1,03
	$\sum \Delta^2$							0,924		0,069
4	ВК	10	4,2	43,5	есть	9,1	8,7	0,96	-	-
5	БГ	20	2,4	39,16	есть	19,0	17,0	0,89	-	-
6	ВГ	20	4,4	43,44	есть	30,0	34,7	1,16	-	-
	$\sum \Delta^2$							0,039		
Стойки, усиленные в поперечном направлении										
7	АКУ-Х ₁	10	0,1	28,2	нет	0,4	0,35	0,88	0,47	1,18
8	АКУ-Х ₆	10	0,1	36,4	нет	0,8	1,14	1,43	0,6	0,75
9	АКУ-Х ₅	10	0,1	28,3	нет	0,3	0,9	3,00	0,33	1,10
10	БКУ-Х ₁	10	2,2	28,2	нет	7,2	5,7	0,79	5,7	0,79
11	БКУ-Х ₂	10	2,2	28,5	нет	6,5	5,7	0,88	5,7	0,88
12	БКУ-Х ₅	10	2,2	30,3	нет	7,6	6,2	0,82	6,2	0,82
13	АГУ-Х ₁	20	0,4	28,1	нет	7,0	9,7	1,39	7,2	1,03
14	АГУ-Х ₂	20	0,4	25,9	нет	9,0	12,1	1,34	9,0	1,00
15	АГУ-Х ₅	20	0,4	25,9	нет	5,0	10,1	2,02	4,9	0,98
	$\sum \Delta^2$							1,55		0,20
16	ВКУ-Х ₁	10	4,2	29,6	есть	9,4	8,7	0,93	8,7	0,93
17	БГУ-Х ₁	20	2,2	28,1	есть	17,5	14,6	0,83	14,6	0,83
18	БГУ-Х ₂	20	2,2	28,5	есть	18,0	17,8	0,99	17,8	0,99
19	БГУ-Х ₅	20	2,2	33,2	есть	15,0	31,2	2,08	20,9	1,39
20	ВГУ-Х ₂	20	4,4	31,6	есть	29,0	39,3	1,36	25,6	0,88
21	ВГУ-Х ₅	20	4,4	28,3	есть	35,0	43,7	1,25	32,7	0,93
	$\sum \Delta^2$							1,39		0,206
Стойки, усиленные в продольном и поперечном направлении										
22	БКУ-Х _{1Lp}	10	2,2	29,5	есть	9,0	2,6	0,29	5,5	0,61
23	ВКУ-Х _{1Lp}	10	4,2	29,6	есть	8,2	6,8	0,83	5,4	0,66
24	ВКУ-Х _{3Lp}	10	4,2	36,4	есть	9,5	8,4	0,88	7,1	0,75
25	БГУ-Х _{3Lp}	20	2,4	36,7	есть	23,0	33,1	1,44	19,7	0,86
26	БГУ-Х _{2Lp}	20	2,4	28,5	есть	24,5	24,1	0,98	18,8	0,77
27	ВГУ-Х _{2Lp}	20	4,4	33,1	есть	29,5	47,7	1,62	35,3	1,20



28	ВГУ-Х ₃ L _p	20	4,4	36,7	есть	32,5	49,1	1,51	40,6	1,25
	$\sum \Delta^2$							1,383		0,507

Примечание: Шифр образцов подробно расписан в работе [10].

были наклеены тензодатчики с базой 5см. Всего было наклеено на одной грани колонны последовательно в одну линию по три тензодатчика. В процессе экспериментов ни на одном из них, на всех колоннах не было зафиксировано трещин. Тензодатчики были наклеены в наиболее вероятных местах появления трещин, поэтому можно утверждать, что расчет по образованию трещин для этих стоек дал погрешность. К тому же согласно результата расчета по образованию трещин, момент трещинообразования примерно равен экспериментальному значению момента, что подтверждает возможность погрешности расчета.

2. Расчеты по прогибам для двух групп эталонных стоек показали разные результаты. В колоннах (4), (5), (6), в которых, согласно расчета по образованию трещин – трещины есть, наблюдается хорошее сходство экспериментальных и теоретических прогибов. Сумма среднеквадратических отклонений равна 0,069. В колоннах, в которых, согласно расчетов – трещин нет (образцы (1), (2), (3)), наблюдается расхождение прогибов более чем в 2 раза. При этом все значения теоретических прогибов занижены по сравнению с экспериментальными, сумма среднеквадратических отклонений равна 0,924.

3. Для стоек, усиленных в поперечном направлении вне зависимости от результатов расчета по образованию трещин, наблюдается одинаковая картина. Сумма среднеквадратических отклонений составляет примерно 1,5, при этом наибольшее расхождение результатов прогибов наблюдается для стоек, усиленных обоями. Это образцы (9), (15), (19), (21). Для большинства из них завышение теоретических прогибов составляет более чем в 2 раза.

4. Для стоек, усиленных в продольном и поперечном направлении наблюдается неоднозначная картина. В образцах (22), (23), (24) при гибкости $\lambda_h = 10$ теоретические значения прогибов получились меньше экспериментальных. Стоит отметить, что при расчёте по прогибам данных стоек абсолютно не учитывалось нормами поперечное усиление. Для стоек большой гибкости $\lambda_h = 20$, особенно при большом эксцентриситете приложения нагрузки, наблюдается существенное завышение теоретических прогибов по сравнению с экспериментальными.

Предложения по уточнению расчетного аппарата по прогибам:

1. Для стоек (2), (10), (11), (12) расчет по прогибам следует выполнять с учетом отсутствия трещин, несмотря на результаты расчета по образованию трещин.

2. Для эталонных стоек (1), (2), (3) предлагается заменить в формуле 8.146 (СП 63.13330.2012) понижающий коэффициент равный 0,85 на 0,4.

3. Для стоек (7) – (15), усиленных в поперечном направлении, предлагается формулу 8.146 (СП 63.13330.2012) преобразовать в следующем виде $E_{b1} = k_t \cdot 0,4 \cdot E_b$, где значение 0,4 – коэффициент, предложенный выше; k_t – предлагаемый повышающий коэффициент поперечного усиления, формула определения которого была выведена по экспериментальным значениям прогибов и приведена ниже.

$$k_t = (8 - 0,3\lambda_h) \cdot k_e + 0,2\lambda_h - 3,6,$$

где λ_h – гибкость конструкции, k_e – коэффициента, определяемый по формуле 6.25 (СП 164.1325800.2014).

4. Для стоек, усиленных в поперечном направлении, в которых, согласно результата расчета по образованию трещин – трещины есть,

предлагается внести коррекцию в относительную деформацию бетона $\varepsilon_{b1,red}$, которая по нормам (СП 63.13330.2012) равна $\varepsilon_{b1,red} = 0,0015$. Для стоек (19), (20), (21) выполнив аналитические расчеты, было найдено значение относительной деформации бетона $\varepsilon_{b1,red} = 0,025$, при которой существенно улучшалась сходимость теоретических и экспериментальных прогибов.

Для стоек, шифра (16), (17), (18) значение относительной деформации бетона будет принято согласно норм, так как в этих стойках поперечное усиление на изменение относительной деформации бетона практически не влияет [17].

4. Для стоек, усиленных одновременно и в продольном и в поперечном направлении, предлагается внести все предложения, относящиеся к образцам, усиленным в поперечном направлении. Дополнительно к этому предлагается заменить формулу 8.151 (СП 63.13330.2012) для вычисления значения x_M , которая в нормах не учитывает продольное усиление, на формулу представленную ниже.

$$x_M = h_0 \left(\sqrt{(\mu_s \alpha_{s2} + \mu'_s \alpha_{s1} + \mu_f \alpha_f)^2 + 2 \left(\mu_s \alpha_{s2} + \mu'_s \alpha_{s1} \frac{a'}{h_0} + \mu_f \alpha_f \right)} - (\mu_s \alpha_{s2} + \mu'_s \alpha_{s1}) + \mu_f \alpha_f \right)$$

Результаты расчётов прогибов, с учетом предложений, приведены в ст. 10 табл. 1.

После внедрения предложений к нормативным расчетам получили следующие результаты.

1) Для большинства стоек сходство теоретических и экспериментальных прогибов заметно улучшилось. Это хорошо видно при сравнении сумм среднеквадратических отклонений $\sum \Delta^2$, которые, для удобства восприятия, представлены в табл. 2.

2) Для стоек, усиленных в поперечном направлении, сходство теоретических и экспериментальных прогибов улучшилась в 6,74 и в 7,75 раз для стоек с трещинами и без трещин соответственно.

Таблица № 2

Значения сумм среднеквадратических отклонений теоретических и экспериментальных прогибов

Группы стоек	Результат расчета по образованию трещин					
	Нет трещин			Есть трещины		
	$\sum \Delta^2$ По нормам	$\sum \Delta^2$ С учетом предложений	Отношение ст. 2 на ст.3	$\sum \Delta^2$ По нормам	$\sum \Delta^2$ С учетом предложений	Отношение ст.6 на ст.7
1	2	3	4	5	6	7
Эталонные стойки	0,924	0,069	13	-	-	-
Стойки усиленные поперечном направлении	1,55	0,20	7,75	1,39	0,206	6,74
Стойки усиленные в продольном и поперечном направлении	-	-	-	1,383	0,507	2,73

3) Результаты расчётов по прогибам для стоек, усиленных одновременно в продольном и поперечном направлении, улучшились в 2,73 раза.

Литература

1. Польской П.П., Хишмах М., Михуб А. О возможности использования круглых углепластиковых стержней в качестве рабочей арматуры для изгибаемых элементов // Научное обозрение. 2012. № 6. С. 211-213.

2. Маилян Д.Р., Польской П.П., Мерват Х., Кургин К.В. О прочности балок из тяжелого бетона при использовании стальной, углепластиковой и

комбинированной арматуры, расположенной в два ряда // Инженерный вестник Дона, 2013, № 4. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4y2013/2096.

3. Маилян Д.Р., Польской П.П., Мерват Х., Кургин К.В. О деформативности изгибаемых элементов из тяжелого бетона при двухрядном расположении углепластиковой и комбинированной арматуры // Инженерный вестник Дона, 2013, №4 URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4y2013/2094.

4. Польской П.П., Маилян Д.Р. Об уточнении расчетов прогибов балок, усиленных композитными материалами // Научное обозрение. 2014. № 12. С. 493-495.

5. Маилян Д.Р., Польской П.П. О расчете ширины нормальных трещин балок, усиленных стекло и углепластиком // Научное обозрение. 2014. № 12. С. 490-492.

6. Polskoy P.P., Mailyan D.R., Dedukh D.A., Georgiev S.V. Design of reinforced concrete beams in a case of a change of cross section of composite strengthening reinforcement // Global journal of Pure and Applied mathematics. 2016. V.12. №2. pp. 1767-1786. URL: publication.com/gjpm16/gjpmv12n2_50.pdf

7. Польской П. П., Маилян Д. Р., Шилов А. А., Меретуков З. А. Армирование и схемы испытания наклонных сечений балок с внешним композитным усилением // Новые технологии. 2015. № 4. С. 44-48.

8. Польской П.П., Георгиев С.В. О программе исследования сжатых железобетонных элементов, усиленных композитными материалами на основе углепластика // Научное обозрение, 2014, №10-3, С. 662-666.

9. Польской П.П., Георгиев С.В. Характеристики материалов, используемых при исследовании коротких и гибких стоек, усиленных углепластиком // Научное обозрение, 2014, №10, ч.2. С. 411-414

10. Маилян Д.Р., Польской П.П., Георгиев С.В. Конструкция каркасов и схемы испытания опытных стоек, усиленных углепластиком // Научное обозрение. 2014. № 10-3. С. 667-670.

11. Маилян Д.Р., Польской П.П., Георгиев С.В. Методики усиления углепластиком и испытания коротких и гибких стоек // Научное обозрение. 2014, №10. С. 415-418.

12. Польской П.П., Маилян Д.Р., Георгиев С.В. Прочность и деформативность гибких усиленных стоек при больших эксцентриситетах // Научное обозрение. 2014, № 12. С. 496.

13. Польской П.П., Маилян Д.Р., Георгиев С.В. Прочность и деформативность гибких усиленных стоек при малых эксцентриситетах // Научное обозрение. 2014. № 12-2. С. 500-503.

14. Польской П.П., Маилян Д.Р., Георгиев С.В. Прочность и деформативность гибких стоек, усиленных углепластиком при осевом нагружении // Научное обозрение. 2014. № 12-2. С. 516-518.

15. Peter Polskoy, Dmitriy Mailyan, Sergey Georgiev, Victor Muradyan. The strength of compressed structures, strengthening with CFRP materials when exceeding the limiting cross-section ratio // E3S Web of Conferences, 2018 URL:clck.ru/DiguE

16. Польской П.П., Георгиев С.В. Влияние различных вариантов внешнего композитного армирования на жесткость гибких сжатых элементов // Инженерный вестник Дона, 2017, №4 URL:ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4826

17. Польской П.П., Георгиев С.В. Деформативность бетона коротких сжатых элементов, усиленных внешним композитным армированием, при трех видах напряженного состояния // Инженерный вестник Дона, 2017, №4 URL:ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4827

References

1. Pol'skoj P.P., Hishmah M., Mihub A. Nauchnoe obozrenie. 2012. № 6. pp. 211-213.
 2. Mailyan D.R., Pol'skoj P.P., Mervat H., Kurgin K.V. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2013, № 4. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4y2013/2096.
 3. Mailyan D.R., Pol'skoj P.P., Mervat H., Kurgin K.V. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2013, №4. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4y2013/2094.
 4. Pol'skoj P.P., Mailyan D.R. Nauchnoe obozrenie. 2014. № 12. pp. 493-495.
 5. Mailyan D.R., Pol'skoj P.P. Nauchnoe obozrenie. 2014. № 12. pp. 490-492.
 6. Polskoj P.P., Mailyan D.R., Dedukh D.A., Georgiev S.V. Global journal of Pure and Applied mathematics. 2016. V.12. №2. pp. 1767-1786. URL: ripublication.com/gjpam16/gjpamv12n2_50.pdf
 7. Pol'skoj P. P., Mailyan D. R., SHilov A. A., Meretukov Z. A. Novye tekhnologii. 2015. № 4. pp. 44-48.
 8. Pol'skoj P.P., Georgiev S.V. Nauchnoe obozrenie, 2014, №10-3, pp. 662-666.
 9. Pol'skoj P.P., Georgiev S.V. Nauchnoe obozrenie, 2014, №10, ch.2. pp. 411-414
 10. Mailyan D.R., Pol'skoj P.P., Georgiev S.V. Nauchnoe obozrenie. 2014. № 10-3. pp. 667-670.
 11. Mailyan D.R., Pol'skoj P.P., Georgiev S.V. Nauchnoe obozrenie. 2014, №10. pp. 415-418.
 12. Pol'skoj P.P., Mailyan D.R., Georgiev S.V. Nauchnoe obozrenie. 2014, № 12. P. 496.
 13. Pol'skoj P.P., Mailyan D.R., Georgiev S.V. Nauchnoe obozrenie. 2014. № 12-2. S. 500-503.
 14. Pol'skoj P.P., Mailyan D.R., Georgiev S.V. Nauchnoe obozrenie. 2014. № 12-2. pp. 516-518.
-



15. Peter Polskoy, Dmitriy Mailyan, Sergey Georgiev, Victor Muradyan. E3S Web of Conferences, 2018 URL:clck.ru/DiguE

16. Pol'skoj P.P., Georgiev S.V. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2017, №4. URL:ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4826

17. Pol'skoj P.P., Georgiev S.V. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2017, №4. URL:ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4827