

Влияние металло-композитного усиления на работу железобетонных колонн при различных эксцентриситетах внешней силы

С.В. Георгиев¹, Д.Р. Маилян¹, А.И. Соловьёва¹, З.А. Меретуков²

¹Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону.

²Майкопский государственный технологический университет, г. Майкоп

Аннотация: В данной работе приведено сопоставление результатов испытания железобетонных колонн, усиленных металлом и композитными материалами на основе углепластика. Основное внимание уделено деформативности и жёсткости. Испытывались образцы из тяжелого бетона в количестве 21 колонны с проектным классом по прочности В25-30, имеющих поперечное сечение 250х125(н) мм и длину 1200 мм и 2400 мм (гибкость $\lambda_n=10$ и $\lambda_n=20$). Колонны загружались при трех значениях эксцентриситета приложения нагрузки равных: $e_0=0$; $e_0=2,0$ см (0,16н); $e_0=4,0$ см (0,32н). Кроме того, варьируемыми параметрами испытаний были внутреннее и внешнее металлическое армирование, шаг и площадь поперечного сечения композитного усиления. Исследовано влияние приведённых выше варьируемых факторов на характеристики колонн, усиленных углепластиковыми композитными материалами (CFRP) и металлом. Результаты показали, что усиленные железобетонные колонны при одинаковых размерах и испытанных при одних и тех же эксцентриситетах приложения нагрузки ведут себя по-разному. Целью работы являлось установление влияния жесткости элементов усиления на деформативность гибких усиленных колонн, а также влияние эксцентриситета приложения нагрузки на изменение требуемой жесткости элементов усиления.

Ключевые слова: железобетон, колонна, металл, испытание, композитный материал, усиление.

Железобетон является основным видом строительных материалов, однако не смотря на высокий уровень изучения его свойств мы не можем утверждать, что неизменными останутся теория и практика его применения.

Металл и композитные материалы, обладающие такими преимуществами как высокая прочность на растяжение и долговечность активно применяются в гражданском строительстве. Метод усиления композитными материалами сжатых железобетонных конструкций путём устройства обойм или бандажей [1] является чрезмерно эффективным.

Особое отношение к вопросам использования композитных материалов в строительстве, которое развивается по двум направлениям. Одно из которых, использует стержневую арматуру в качестве рабочей [2, 3]. Другое основывается на применении композитной арматуры для внешнего

армирования и усиления сжатых элементов различной гибкости [4, 5], а также вида напряженно-деформированного состояния [6, 7] и вариантов поперечного или продольного усиления [8, 9].

На основе экспериментов, выполненных иностранными исследователями с учётом огромного количества испытаний сжатых элементов круглых и прямоугольных сечений, было разработано множество различных моделей прочности и деформативности. Изучены конструкционные зависимости бетонных колонн круглого сечения [10-12], так же не мало важными в данном исследовании являются научные работы иностранных авторов [13-15]. Исследование зависимости для прямоугольного сечения колонн отражены в следующих работах [16-18], а квадратного сечения [19-21].

Для внецентренно сжатых конструкций в качестве материалов усиления используются углеламинаты, которые наклеиваются на растянутую зону железобетонных конструкций. Железобетонные колонны с большими эксцентриситетами приложения нагрузки работают по балочной схеме, в связи с чем, уменьшение деформативности конструкций зависит не только от увеличения прочности растянутой зоны, но и от увеличения жёсткости конструкций.

Авторы разработали метод усиления, основанный на использовании как металла, так и композитного материала и провели испытание 21 колонны, которые имели высокую гибкость и испытывались для получения данных о прочности и деформативности.

1. Цели и задачи исследования

Практика усиление железобетонных несущих конструкций показывает, что основным доминирующим фактором, является обеспечение прочности, что проверяется расчётом усиленных конструкций по первой группе предельных состояний. Однако, имеется огромное количество конструкций,

где обеспечение прочности не гарантирует выполнение других требований. Не обходимыми требованиями являются обеспечение нормативной трещиностойкости и обеспечение требований по предельным прогибам. Последнее, в свою очередь, наиболее актуально для гибких железобетонных сжатых конструкций, особенно работающих при больших эксцентриситетах приложения нагрузки.

Зачастую, требования по обеспечению необходимой жёсткости конструкций приводят к существенному увеличению коэффициентов усиления.

Данная статья посвящена изучению прочностных и деформационных свойств сжатых железобетонных конструкций, усиленных металлом и композитом на основе экспериментальных данных. Целью данной статьи является:

- установить влияние жёсткости металлических уголков и углепластиковых ламелей, расположенных в растянутой зоне, а также поперечного композитного усиления на деформативность железобетонных колонн гибкостью $\lambda_h=10$ и $\lambda_h=20$.
- установить влияние эксцентриситета приложения нагрузки на жёсткость усиленных железобетонных колонн.

Задачей экспериментального исследования являются:

- получить экспериментальные данные при осевом нагружении конструкций и внецентренном нагружении при малых и больших эксцентриситетах, где сила находится в пределах и за пределами ядра сечения соответственно. Изучение деформационных свойств при малых эксцентриситетах является наиболее важными, так как они не оговорены в нормах.
 - получение достоверных данных прогибов железобетонных конструкций гибкостью $\lambda_h=10$ и $\lambda_h=20$ для решения проблемы усиления
-

сжатых несущих гибких железобетонных конструкций при больших эксцентриситетах приложения нагрузки.

2. Материалы и методы

Было запроектировано и испытана 21 колонна.

Исследование гибких колонн включало в себя испытание двух серий колонн по 11 и 10 образцов (Рис. 1, 2). Для данного этапа колонны одной серии образцов от другой отличались гибкостью. Разделение на серии второго этапа исследования выполнялось для определения эффективности металло-композитного усиления для конструкций малой гибкости $\lambda_h=10$ и большой гибкости $\lambda_h=20$. На данном этапе все опытные образцы испытывались при трёх эксцентриситетах приложения нагрузки ($e_0=0$; $e_0=2\text{см}$; $e_0=4\text{см}$) в каждой серии.

Последнее позволяло определить напряжённо деформированное состояние колонн при не однородном нагружении.

В каждой серии двух этапов испытаний варьировались три фактора усиления, включающее в себя различное внешнее металлическое усиление, толщину композитных хомутов и их шаг.

Основными материалами для изготовления опытных образцов являлись бетон, металлическая арматура, металлический профиль, углеткань и углеламинаты, а также клеевая система, используемая для наклейки внешнего усиления. Подробная информация об технологии изготовления бетона и характеристик материалов, таких как песок, цемент и щебень, а также характеристики металлической и композитной арматуры представлены в ранее опубликованной статье [22]. Ниже приведены только основные характеристики материалов опытных образцов.

Для изготовления образцов использовался тяжёлый бетон, прочность которого приведена в Табл.1.

Для изготовления конструкций использовалась продольная арматура класса А500 диаметром 12 мм. В качестве поперечной арматуры использовалась гладкая арматурная проволока класса В500.

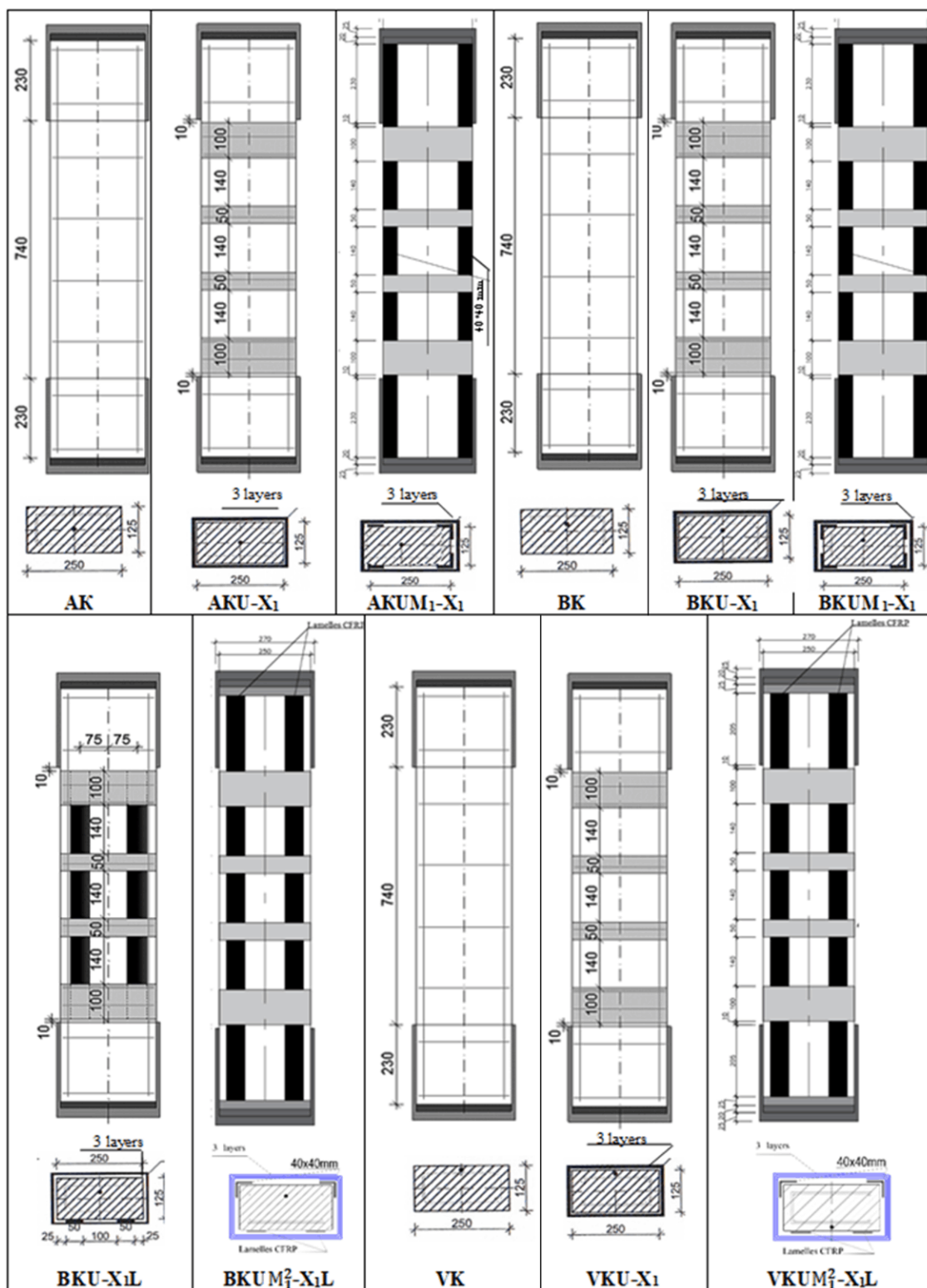


Рис. 1. Программа эксперимента I серии колон 250x125(h) и длиной 1200 мм.

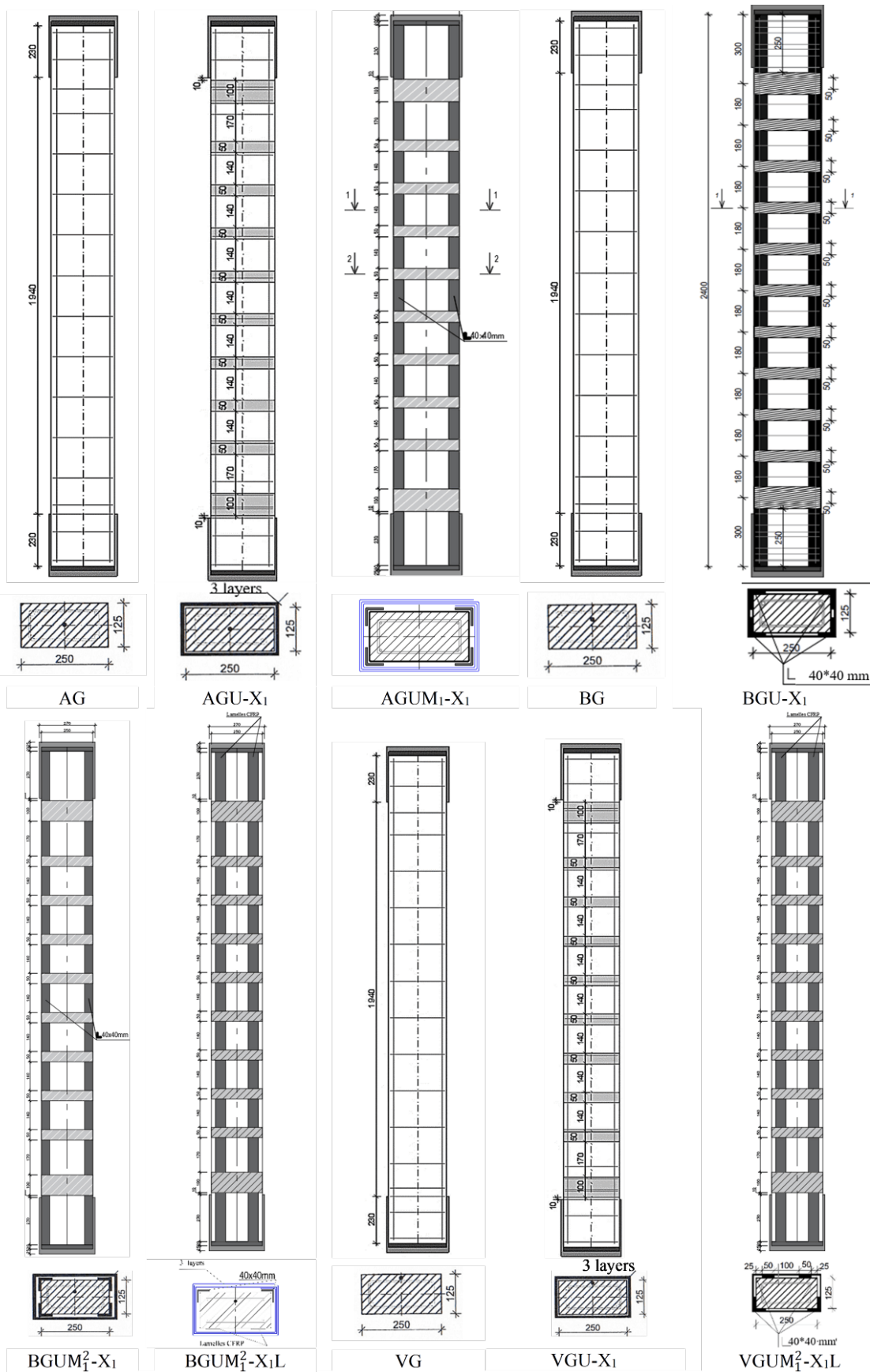


Рис. 2. Программа эксперимента II серии колон 250x125(h) и длиной 2400 мм.

В качестве композитного материала использовалась углеткань с прочностью на растяжение углеродного волокна равного 4900 МПа. Модуль упругости углеткани, согласно информации завода-изготовителя, составлял 300 ГПа.

Все колонны первого и второго этапа изготавливались в лаборатории университета. Каждое бетонирование сопровождалось изготовлением контрольных образцов, а именно кубиков 10х10 и 15х15 в количестве двенадцати штук.

Всем опытным образцам был присвоен шифр. Шифр опытных образцов, для железобетонных колонн с сечением 250х125(х) и длиной 1200 мм и 2400 мм приведён ниже:

Первая буква русского алфавита – обозначает величину осевого эксцентриситета (e_0):

- «А» — центрально-сжатые колонны, $e_0=0$.
- «В» - колонны, испытанные при эксцентриситете, $e_0=2$ см;
- «V» - тоже, при $e_0=4$ см.

Вторые буквы английского алфавита обозначают вид эталонной колонны – короткой «K» или гибкой «G».

Третья буква английского алфавита «U» означает, что образец имеет усиление.

Четвёртая буква английского алфавита «M» - металлические уголки, наклеенные на все углы колонны. Нижний индекс обозначает размер металлического равнополочного уголка «1» - 40х40мм и «2» - 25х25мм. При наличии верхнего индекса «2» - означает, что металлических уголков только 2-а и они расположены со стороны сжатой зоны колонны.

Пятая буква английского алфавита «X₁» обозначает поперечное армирование композитными хомутами шириной 50 мм, с шагом хомутов равном 190мм.

Шестая буква – латинского алфавита означает наличие продольного углепластикового усиления колонн: «L» – с использованием ламинатов – (полос), шириной 50 мм и толщиной 1,2 мм количестве 2 шт.

3. Результаты исследования

Исследовались результаты испытаний 21-ой колонны с разными вариантами металло-композитного усиления. Все опытные образцы условно разделялись на три группы, каждая из которых отличалась эксцентриситетом приложения нагрузки, при этом, каждая группа разделялась на две подгруппы, отличающиеся гибкостью конструкций.

Характеристики опытных образцов с указанием вариантов их усиления, а также прочностные и деформационные показатели приведены в табл.1. Оценка деформационных свойств железобетонных усиленных и эталонных конструкций при поэтапном нагружении, выполнялась на основе сопоставления графиков изменения прогибов колонн (рис. 3-5). Эти графики строились по результатам измерения перемещений прогибомерами, установленными на каждом опытном образце снизу, сверху и в центре конструкций по высоте.

Влияние металло-композитного усиления на деформационные свойства железобетонных конструкций оценивалось по двум критериям. Первый – предельная прочность при максимальных прогибах, второй – прочность при предельно допустимых нормами прогибах. Согласно СП 20.13330.2011 для вертикальных несущих сжатых конструкций предельные прогибы не должны превышать $f = l/150$. Для колонн гибкостью $\lambda_h=10$ предельно допустимые прогибы составляют 8 мм, а для длинных – 16 мм соответственно. Значения нагрузок при предельно допустимых прогибах приведены в столбцах 7, 8 (табл. 1), а коэффициенты усиления при максимальных прогибах и при предельно допустимых приведены в столбцах 9-11 (табл. 1).

Таблица № 1

Результаты испытания эталонных и усиленных стоек ($\lambda_h=10$ и 20) при разной величине осевого эксцентриситета e_0 .

Характеристика опытных образцов	Порядковый номер	Шифр стоек	$\bar{R}_b$, МПа	Опытные значения						
				Прочность кН, N_{exp}^{ult}	Прогибы мм, f_{exp}^{ma}	N_{exp}^{ult} , кН при $f=l/150$		k_{yc}^{max}	k_{yc}^8	k_{yc}^{16}
						При $f=8$ мм	При $f=16$ мм			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Серия А. Осевой эксцентриситет $e_0=0$. Сечение-250x125 (h) мм	1	AK	28,0	1340,0	1,150	—	—	—	—	—
	2	AKU-X ₁	23,2	1200,0	0,275	—	—	1,08	—	—
	3	AKUM ₁ -X ₁	23,2	1486,0	1,485	—	—	1,34	—	—
	4	AG	39,2	800,0	14,135	693	—	—	—	—
	5	AGU-X ₁	38,4	880,0	19,105	839	—	1,12	1,24	—
	6	AGUM ₁ -X ₁	34,0	1506,0	3,760	—	—	2,17	—	2,5
Серия Б. Осевой эксцентриситет $e_0=2$ см. Сечение-250x125 (h) мм	7	BK	20,3	834,0	6,475	—	—	—	—	—
	8	BKU-X ₁	20,3	785,0	7,285	—	—	0,94	—	—
	9	BKUM ₁ -X ₁	20,3	1104,1	5,535	—	—	1,32	—	—
	10	BKU-X ₁ L	20,3	710,0	11,42	658	—	0,85	—	—
	11	BKUM ₁ ² -X ₁ L	20,3	950,0	5,977	—	—	1,14	—	—
	12	BG	30,6	415,0	20,485	—	373	—	—	—
	13	BGU-X ₁	30,0	404,5	15,255	—	404,5	0,99	—	1,11
	14	BGUM ₁ ² -X ₁	34,2	1010,0	7,885	—	1010,0	2,18	—	2,42
	15	BGUM ₁ ² -X ₁ L	31,3	850,0	27,645	—	809	2,00	—	2,12
Серия В. Осевой эксцентриситет $e_0=4$ см. Сечение-250x125 (h) мм	16	VK	42,6	430,0	9,15	380	—	—	—	—
	17	VKU-X ₁	42,6	489,0	10,215	553	—	1,14	1,46	—
	18	VKUM ₁ ² -X ₁ L	28,0	768,2	14,430	604	—	2,72	2,42	—
	19	VG	45,2	250,0	33,725	—	184	—	—	—
	20	VGU-X ₁	45,2	290,0	31,445	—	238	1,16	—	1,29
	21	VGUM ₁ ² -X ₁ L	34,2	603,4	29,200	—	553	3,19	—	3,97

Примечание: в столбцах 7 и 8 приведены прочности при прогибах $f_l=l/150=1200/150=8$ мм и $f_l=l/150=2400/150=16$ мм, для коротких колон ($l=1200$ мм) и для гибких ($l=2400$ мм) соответственно. В столбцах 9, 10 и 11 показаны коэффициенты усиления при максимальной нагрузке, при 8 и 16 мм.

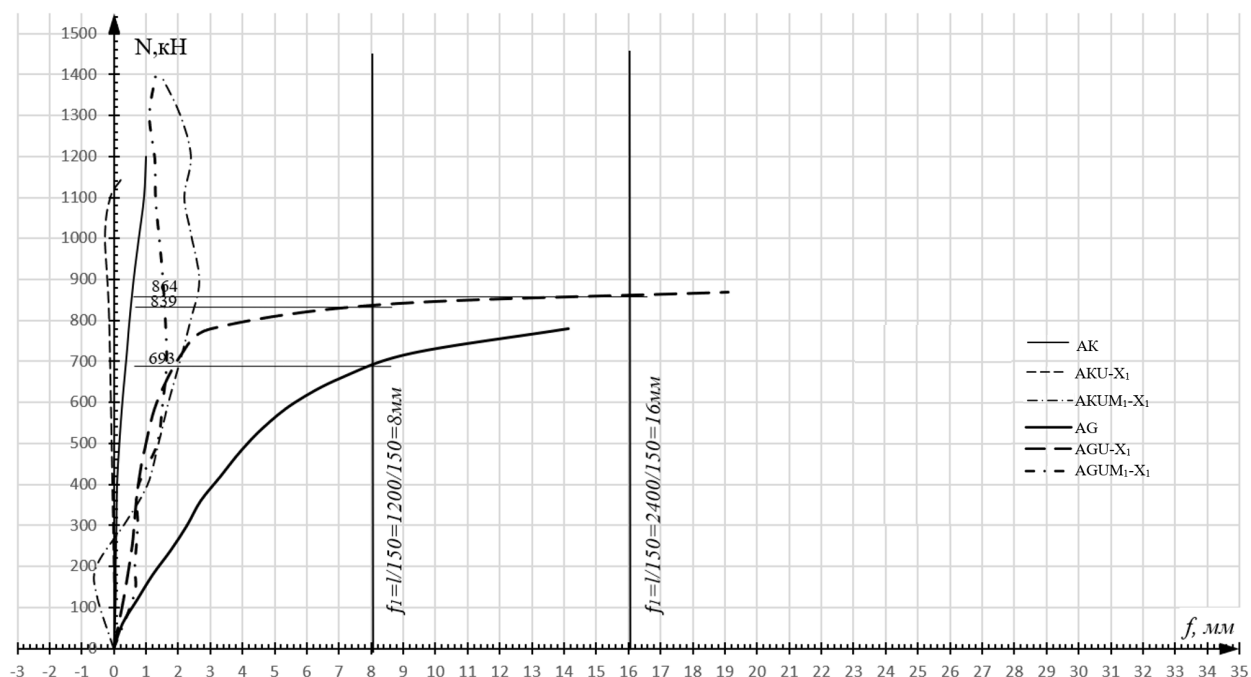


Рис. 3. – Сопоставление опытных значений прогибов колонн в зависимости от величины нагрузки и вариантов усиления при осевом эксцентриситете $e_0=0$.

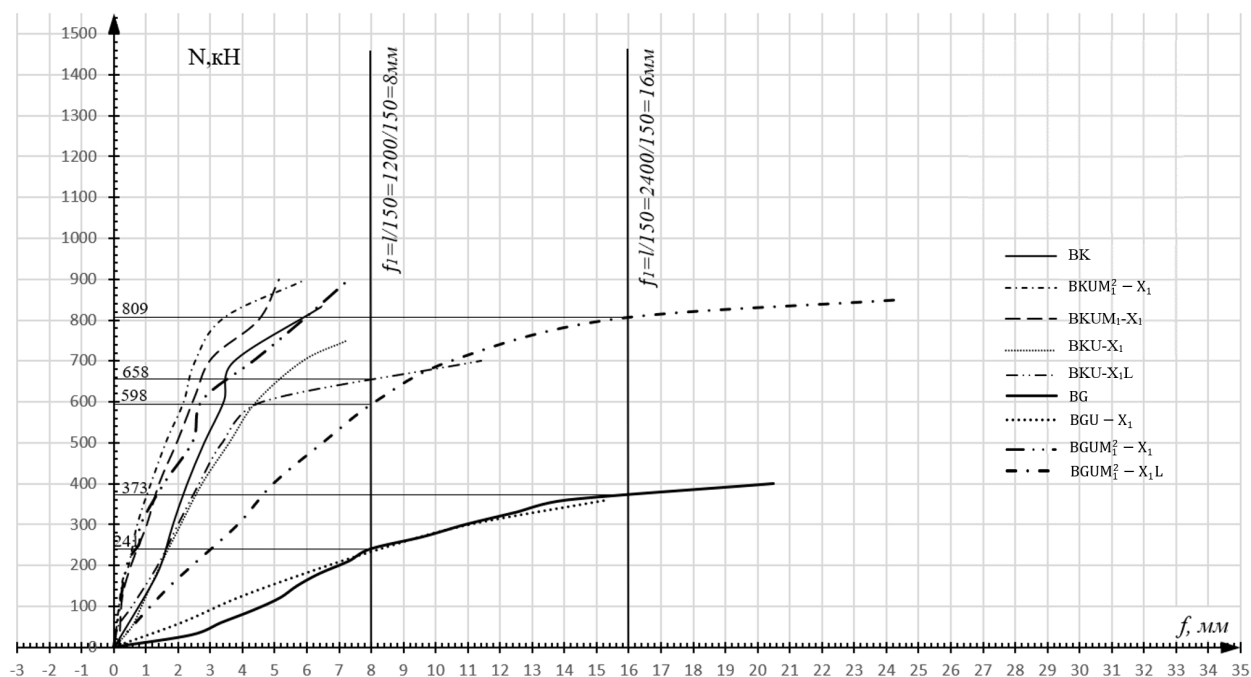


Рис. 4. – Сопоставление опытных значений прогибов колонн в зависимости от величины нагрузки и вариантов усиления при осевом эксцентриситете $e_0=2,0\text{см}$ ($0,16h$).

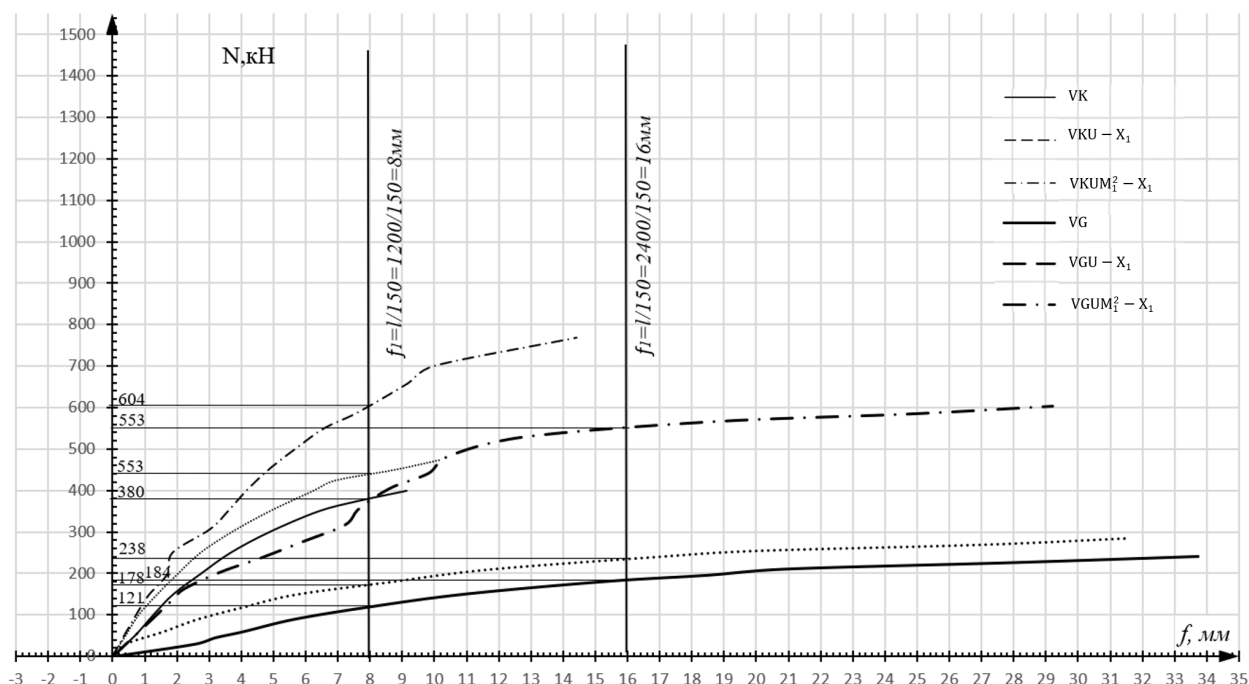


Рис. 5 – Сопоставление опытных значений прогибов колонн в зависимости от величины нагрузки и вариантов усиления при осевом эксцентриситете $e_0=4,0 \text{ см}$ ($0,32h$).

Измерение прогибомеров считывалось и фиксировалось на каждом этапе загрузки. Используя методику прямого сопоставления результатов экспериментов, анализируя графики (рис. 3-5), пришли к следующему:

- во всём диапазоне нагрузок жёсткость усиленных колонн металло-композитными материалами существенно выше, чем жесткость эталонных колонн и колонн, усиленных только композитными материалами.
- прогибы железобетонных, усиленных металло-композитными материалами, колонн при центральном нагружении не превышают предельно допустимые прогибы, при этом прогибы находятся в пределах 2 мм попеременно зигзагообразно пересекают вертикальную ось и, вплоть до разрушения, не искривляются. Однако, стоит отметить, что эталонная колонна и колонна, усиленная только композитными материалами, на предразрушающей стадии нагрузки равной $0,8-0,85N_{ult}$ превышают предельно допустимые прогибы. При сравнении нагрузок при предельно

допустимых прогибах коэффициент усиления увеличивается для колонн с металло-композитным усилением с 2,17 до 2,5 раза.

– для колонн, испытанных при эксцентриситете приложения нагрузки $e_0=2$ см для коротких стоек, имеет место незначительное приращение нагрузки, при этом прогибы конструкций во всех случаях не превышают предельно допустимые значения. Влияние металло-композитного усиления на деформационные свойства колонн незначительно. Однако для гибких конструкций имеет место существенное приращение нагрузки и увеличение жёсткости металло-композитного усиления по сравнению с эталонным и образцами, усиленным только композитными материалами. Прирост прочности составляет от 2,0 до 2,42 раза. Колонны, усиленные металлическими уголками совместно с композитными обоймами, существенно увеличили жёсткость конструкций.

– серия образцов В (Табл.1) показали увеличение жёсткости как для коротких, так и для гибких стоек. Особое внимание стоит уделить приросту несущей способности железобетонной колонны при предельно допустимых прогибах, которые составляют от 2,42 до 3,97.

– во всех случаях металло-композитное усиление изменяет угол наклона кривой «напряжение-прогибы». Чем больше гибкость конструкций и эксцентриситет приложения нагрузки, тем более характерно увеличение жёсткости колонн.

– наибольшее влияние металло-композитного усиления для колонн гибкостью $\lambda_h=20$ при четырёх эксцентриситетах приложения нагрузки. Данные колонны работают по балочной схеме при этом сжатая зона бетона не превышает величины двух защитных слоев бетона, что по нормам не даёт возможность учитывать сжатую арматуру в расчёте. Однако включение металлических уголков, расположенных в сжатой зоне, существенно меняет общую картину и увеличение прочности достигает порядка 400%.

Выводы:

1. Деформативность всех железобетонных колонн гибкостью $\lambda_h=10$ и $\lambda_h=20$ находится в полной зависимости от вариантов внешнего металло-композитного усиления. В свою очередь влияние эксцентриситета приложения нагрузки также изменяет общую картину напряжённо-деформативного состояния всех образцов. При этом с повышением жёсткости элементов усиления деформативность образцов уменьшается.

2. Величина предельных прогибов для гибких конструкций не является основным критерием для определения эффективности металло-композитного усиления. Наиболее значимыми являются те силы, при которых усиленные колонны достигают предельно допустимых прогибов. Именно эти значения прочности являются предельными по второй группе предельных состояний и являются основными критериями эффективности усиления. Для колонн гибкостью $\lambda_h=10$ коэффициенты усиления при предельно допустимых прогибах при разных эксцентриситетах приложения нагрузки варьируется от 1,24 до 2,42 раза. Для гибких конструкций от 2,12 до 3,97.

3. Критериям оценки жёсткости усиленных колонн может служить угол наклона касательной кривой «напряжение-прогибы». С уменьшением этого угла увеличивается и жёсткость усиленных металло-композитным усилением колонн.

4. Наибольший прирост прочности и соответственно угол наклона касательной кривой «Напряжение-прогибы», показали образцы гибкостью $\lambda_h=20$ при этом, чем выше эксцентриситет приложения нагрузки, тем больше влияние усиления на прочностные и деформационные свойства колонн. Наибольший эффект показала колонна, усиленная одновременно ламелями в растянутой зоне и уголками в сжатой зоне с поперечным композитным армированием в виде хомутов, с приростом прочности при максимально допустимых прогибах равный 3,97 раз.

5. В качестве основного варианта усиления для гибких железобетонных колонн, загруженных при больших эксцентриситетах приложения нагрузки, можно рекомендовать металлические уголки, расположенные в сжатой зоне и композитные ламели, наклеенные на растянутую зону. Для внецентренно сжатых стоек, работающих с малым эксцентриситетом приложения нагрузки, наибольшую эффективность показали металлические уголки, расположенные по всем четырём углам колонн. Такой вариант усиления логичен, так как при увеличении жёсткости конструкций металлические уголки, расположенные в менее сжатой зоне, включаются в работу, что не свойственно для эталонных стоек.

Таким образом проведенные исследования показали, что при проектировании конструкций усиления металло-композитные системы предпочтительнее традиционных металлических или композитных.

Статья подготовлена в процессе выполнения диссертационного исследования на соискание учёной степени кандидата наук при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (РНФ) (Соглашение № 24-29-00790), для выполнения научно-исследовательской работы «Новые технологии усиления железобетонных конструкций композитными материалами и методы их расчётной оценки».

Литература

1. Николаев С. В., Сердюк А. И., Хаяутин Ю. Г., Шрейбер А. К. О назначении нормативных характеристик композитных материалов для усиления строительных конструкций внешним армированием // Строительные материалы. 2018. №7. DOI: 10.31659/0585-430X-2018-761-7-8-11.
2. Хишмах М., Маилян Д. Р., Польской П. П., Блягоз А. М. Прочность и деформативность изгибаемых элементов из тяжелого бетона, армированных стеклопластиковой и стальной арматурой // Новые технологии, 2012, №4, С. 147-152.

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

4. 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.

5. Wu Gang, Lyu Zhitao. Study on the stress-strain relationship of FRP-confined concrete circular column without a strain-softening response // Journal of Building Structures, 2003, 24 (5): 6. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6869.2003.05.001.

6. Польской П.П., Маилян Д.Р., Георгиев С.В. Прочность и деформативность усиленных коротких стоек при малых эксцентриситетах // Инженерный вестник Дона, 2014, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N4y2014/2734.

7. Георгиев С. В., Маилян Д. Р., Соловьева А. И. К определению наиболее эффективного способа усиления железобетонных колонн при разных уровнях нагружения // Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий. – 2024. – Т. 3, № 1.– DOI: 10.23947/2949-1835-2024-3-1-7-14.

8. Георгиев С. В., Маилян Д. Р., Соловьева А. И. Исследование эффективности композитного продольного и поперечного усиления при увеличении прочности и жесткости гибких внецентренно сжатых железобетонных стоек // Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий. – 2023. – Т. 2, № 4. – DOI: 10.23947/2949-1835-2023-2-4-7-18.

9. Георгиев С. В., Маилян Д. Р., Соловьева А. И. Новый метод усиления железобетонных сжатых колонн, основанный на использовании бетона и композита // Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и

планировке территорий. – 2022. – Т. 1, № 2. – DOI: 10.23947/2949-1835-2022-1-2-4-12.

10. Ключев С. В., Ключев А. В., Аюбов Н. А., Федюк Р. С., Левкина Е. В. Конечно-элементное проектирование и анализ устойчивых моно- и гибридно-армированных волокнистых геополимеров. Перспективные инженерные исследования (Ростов-на-Дону). 2025; 25(3). URL: doi.org/10.23947/2687-1653-2025-25-3-171-185.

11. Xiao Y., Wu H. Compressive behavior of concrete confined by carbon fiber composite jackets // Journal of Materials in Civil Engineering, 2000, 12(2): 144. DOI: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2000)12:2(139).

12. Wu Gang, Wu Zhishen, Lyu Zhitao. Study on the stress-strain relationship of FRP-confined concrete circular column with a strain-softening response // China Civil Engineering Journal, 2006, 39 p.

13. Wu G., Wu Z., Lu Z. Stress-strain relationship for frp-confined concrete prisms // Fibre-Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures, 2003: pp. 561-570.

14. Toutanji H., Deng Yong. Strength and durability performance of concrete axially loaded members confined with AFRP composite sheets // Composites: Part B, 2002, 33(4): 257. DOI: 10.1016/S1359-8368(02)00016-1.

15. Youssef M. N., Feng M. Q., Mosallam A. S. Stress-strain model for concrete confined by FRP composites // Composites: Part B, 2007, 38 (5/6): 623. DOI: 10.1016/j.compositesb.2006.07.020.

16. Gu Xianglin, Li Yupeng, Zhang Weiping. Compressive stress-strain relationship of concrete confined by carbon fiber composite sheets // Structural Engineers, 2006, 22 (2): 54. DOI: 10.3969/j.issn.1005-0159.2006.02.012.

17. Lam L., Teng J. G. Design-oriented stress-strain model for FRP-confined concrete in rectangular columns // Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2003, 13(22): 1151. DOI: 10.1177/0731684403035429.

18. Wu Gang, Lyu Zhitao. Study on the stress-strain relationship of FRP-confined concrete rec-tangular columns // Journal of Building Structures, 2004, 25 (3): 104. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6869.2004.03.016.
19. Teng J. G., Huang Y. L., Lam L., Ye L. P. Theoretical model for fiber reinforced polymer confined concrete // Journal of Composites for Construction, ASCE, 2007, 11 (2): 208. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0268(2007)11:2(201).
20. Jing Denghu , Cao Shuangyin. A model for calculating the axial stress strain curve of square-section concrete column confined by FRP // China Civil Engineering Journal, 2005, 38 (12): 35. DOI: 10.3321/j.issn:1000-131X.2005.12.006.
21. Pan Jinglong, Wang Yuguang, Lai Wenhui. Effect of sectional shape of concrete column on the bearing capacity of short columns wrapped with FRP // Industrial Construction, 2001, 31(6): 18. DOI: 10.3321/j.issn:1000-8993.2001.06.005.
22. Georgiev S. V., Mailyan D. R., Solovyeva A. I. The high-tech and effective method of strengthening reinforced concrete structures with CFRP materials with preliminary modification of the cross-section shape // Construction Materials and Products. 2024. 6 (6). 2. URL: doi.org/10.58224/2618-7183-2024-7-6-7.

References

1. Nikolaev S. V., Serdyuk A. I., Khayutin Yu. G., Shreiber A. K. Stroitelnie materiali. 2018. № 7. DOI: 10.31659/0585-430X-2018-761-7-8-11.
2. Khishmakh M., Mailyan D. R., Pol'skoy P. P., Blyagoz A. M. Novye tekhnologii, 2012, № 4, pp. 147–152.
3. Pol'skoy P. P., Mailyan D. R. Nauchnoe obozrenie, 2014, № 12, pp. 493–495.
4. Pol'skoy P. P., Georgiev S. V. Nauchnoe obozrenie, 2014, № 10–3, pp. 662–666.

5. Xiao Y., Wu H. Journal of Materials in Civil Engineering, 2000, 12(2): 144. DOI: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2000)12:2(139).
 6. Pol'skoy P. P., Mailyan D. R., Georgiev S. V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2014, № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N4y2014/2734.
 7. Georgiev S. V., Mailyan D. R., Solov'eva A. I. Sovremennye tendentsii v stroitel'stve, gradostroitel'stve i planirovke territoriy, 2024, t. 3, № 1. DOI: 10.23947/2949-1835-2024-3-1-7-14.
 8. Georgiev S. V., Mailyan D. R., Solov'eva A. I. Sovremennye tendentsii v stroitel'stve, gradostroitel'stve i planirovke territoriy, 2023, t. 2, № 4. DOI: 10.23947/2949-1835-2023-2-4-7-18.
 9. Georgiev S. V., Mailyan D. R., Solov'eva A. I. Sovremennye tendentsii v stroitel'stve, gradostroitel'stve i planirovke territoriy, 2022, t. 1, № 2. DOI: 10.23947/2949-1835-2022-1-2-4-12.
 10. Klyuev S. V., Klyuev A. V., Ayubov N. A., Fedyuk R. S., Levkina E. V. Perspektivnye inzhenernye issledovaniya (Rostov-na-Donu), 2025, t. 25, № 3. URL: doi.org/10.23947/2687-1653-2025-25-3-171-185.
 11. Wu Gang, Lyu Zhitao. Journal of Building Structures, 2003, 24 (5): 6. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6869.2003.05.001.
 12. Wu Gang, Wu Zhishen, Lyu Zhitao. China Civil Engineering Journal, 2006, 39 p.
 13. Wu G., Wu Z., Lu Z. Fibre-Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures, 2003: pp. 561-570.
 14. Toutanji H., Deng Yong. Composites: Part B, 2002, 33(4): 257. DOI: 10.1016/S1359-8368(02)00016-1.
 15. Youssef M. N., Feng M. Q., Mosallam A. S. Composites: Part B, 2007, 38 (5/6): 623. DOI: 10.1016/j.compositesb.2006.07.020.
 16. Gu Xianglin, Li Yupeng, Zhang Weiping. Structural Engineers, 2006, 22 (2): 54. DOI: 10.3969/j.issn.1005-0159.2006.02.012.
-



17. Lam L., Teng J. G. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2003, 13(22): 1151. DOI: 10.1177/0731684403035429.
18. Wu Gang, Lyu Zhitao. Journal of Building Structures, 2004, 25 (3): 104. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6869.2004.03.016.
19. Teng J. G., Huang Y. L., Lam L., Ye L. P. Journal of Composites for Construction, ASCE, 2007, 11 (2): 208. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0268(2007)11:2(201).
20. Jing Denghu, Cao Shuangyin. China Civil Engineering Journal, 2005, 38 (12): 35. DOI: 10.3321/j.issn:1000-131X.2005.12.006.
21. Pan Jinglong, Wang Yuguang, Lai Wenhui. Industrial Construction, 2001, 31(6): 18. DOI: 10.3321/j.issn:1000-8993.2001.06.005.
22. Georgiev S. V., Mailyan D. R, Solovyeva A. I. Construction Materials and Products. 2024. 6 (6). 2. URL: doi.org/10.58224/2618-7183-2024-7-6-7.

Авторы согласны на обработку и хранение персональных данных.

Дата поступления: 1.10.2025

Дата публикации: 13.11.2025