

Документ подписан простой электронной подписью

Информация о владельце:

ФИО: Задорожная Людмила Ивановна

Должность: Проректор по учебной работе

Дата подписания: 23.03.2021

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Уникальный программный ключ:

faa404d1aeb2a023b5f4a331ee5ddc540496512d

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
**«МАЙКОПСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»**
(ФГБОУ ВО «МГТУ»)

УДК 69:001.12/18

Рег. № НИОКТР АААА-А17-117021310232-3

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе
и инновационному развитию

д-р филос. наук, профессор

Т.А. Овсянникова
2021 г.



ОТЧЕТ

О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

Сравнение методик усиления внешним армированием композитивных материалов

по теме:

РАЗРАБОТКА ПЕРСПЕКТИВНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ
КОНСТРУКЦИЙ УЛУЧШЕННЫМИ ПОКАЗАТЕЛЯМИ
(промежуточный)

Руководитель НИР,
зав.кафедрой СтиОПД,
д-р. техн. наук, проф.


З.А. Меретуков

Майкоп 2021

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель НИР,
д-р техн. н., доцент,
зав. кафедрой
строительных и
общепрофессиональных
дисциплин

Исполнители:
д-р техн. н., доцент,
зав. кафедрой
строительных и
общепрофессиональных
дисциплин

канд. техн. н.,
кафедры
строительных и
общепрофессиональных
дисциплин

канд. техн. н.,
кафедры
строительных и
общепрофессиональных
дисциплин

канд. биол. н., доцент,
доцент кафедры
строительных и
общепрофессиональных
дисциплин

Нормоконтроль



(подпись, дата)

З.А. Меретуков (раздел 3, заключение)



(подпись, дата)

З.А. Меретуков (введение, раздел 3)



(подпись, дата)

Р.Г. Шишова (раздел 1)



(подпись, дата)

Е.А. Хадыкина (раздел 1)



(подпись, дата)

О.Ю. Борсук (раздел 2)



(подпись, дата)

А.А. Кубова

РЕФЕРАТ

Отчет 29 с., 1кн., 5 табл., 48 источн.

БЕТОН, ЖЕЛЕЗОБЕТОН, АРМАТУРА, УГЛЕПЛАСТИК, КОМПОЗИТНЫЙ МАТЕРИАЛ, ВНЕШНЕЕ АРМИРОВАНИЕ, ДЕФОРМАЦИИ, СЖАТЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ, УСИЛЕНИЕ, АРМАТУРА, УГЛЕТКАНЬ

Объектом исследования являются новые методы усиления на основе сжатых железобетонных элементов композитными материалами.

В последние десятилетия композитные материалы широко используются в области усиления и изготовления железобетонных конструкций. Однако, объем экспериментальных и научно-исследовательских работ в России недостаточно большой, для того, чтобы можно было определить все возможности и реальную эффективность композитных материалов в данной области. К тому же, отсутствует единый сортамент, в котором композитные материалы разных производителей обладают одинаковыми свойствами.

Учитывая непростую политическую обстановку в России, ряд фирм-производителей композитов перестал поставлять свои материалы в страну. В связи с этим, существует необходимость в исследовании новых производителей и их материалов усиления. Учитывая большую ответственность, предъявляемую к проектам усиления несущих конструкций, характер поведения и свойства материалов усиления должны быть изучены.

В данной работе приведено сравнение материалов и методик технологии выполнения работ по усилению 2-х разных фирм, надёжность и эффективность одной из них «BASF» была проверена в результате научно-исследовательских работ, но данная фирма перестала работать в России, другая фирма «Гидрозо» - является наиболее распространённой, но мало изученной. Также в работе приведены все положительные и отрицательные свойства технологий выполнения работ, произведен анализ относительно перспектив использования материалов усиления.

Целью исследования является: выявить все преимущества и недостатки технологии выполнения работ фирмы «Гидрозо» по сравнению с проверенной технологией фирмы «БАСФ», для выявления всех перспектив и дальнейшего изучения их материалов усиления.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	7
1 К определению условной критической силы гибких железобетонных стоек, усиленных композитными материалами	8
2 К определению прочности бетона, обжатого композитными материалами, расположенными в поперечном направлении.....	13
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	18
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	24

ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Арматура - совокупность соединённых между собой элементов, которые при совместной работе с бетоном в железобетонных сооружениях воспринимают растягивающие напряжения, а также могут использоваться для усиления бетона в сжатой зоне. Элементы арматуры делятся на жёсткие и гибкие.

Бетон – искусственный каменный строительный материал, получаемый в результате формования и затвердевания рационально подобранный, тщательно перемешанной и уплотнённой смеси из минерального (например, цемент) или органического вяжущего вещества, крупного или мелкого заполнителей, воды. В ряде случаев может иметь в составе специальные добавки, а также не содержать воды (например, асфальтобетон).

Внешнее армирование - технология усиления конструкции здания поверхностным армированием представляет собой совокупность методов, позволяющих закрепить на железобетонной или каменной (кирпичной) поверхности полотна углеродной сетки с последующим нанесением защитных и укрывочных слоев полимерных материалов.

Деформации - изменение взаимного положения частиц тела, связанное с их перемещением друг относительно друга за счет приложения усилия, при котором тело искажает свои формы.

Железобетон - строительный материал, состоящий из бетона и стали.

Композитный материал – неоднородный сплошной материал, состоящий из двух или более компонентов, среди которых можно выделить армирующие элементы, обеспечивающие необходимые механические характеристики материала, и матрицу (или связующее), обеспечивающую совместную работу армирующих элементов.

Сжатые элементы – к сжатым железобетонным элементам относятся колонны и стены одно и многоэтажных зданий, перегородки, элементы рамных и арочных конструкций, верхние пояса и элементы решетки ферм, стойки эстакад. В сжатых элементах совместно действуют осевая продольная сжимающая сила и изгибающий момент.

Углепластик - это композиционный многослойный материал, представляющий собой полотно из углеродных волокон в оболочке из термореактивных полимерных (чаще эпоксидных) смол.

Углеткань – это тканый материал, который при низком удельном весе обладает очень высокой прочностью. Углеволокно, из которого создаются **углеткани**, состоит из волокон 5-10 мкм в диаметре, образованных из атомов углерода.

ВВЕДЕНИЕ

На основании экспериментальных данных было установлено, что при расчёте гибких железобетонных стоек, усиленных композитными материалами в поперечном направлении, недооценивается нормами прочность элементов. Влияние композитного усиления не учитывается при расчете жесткости D , условной критической силы N_{cr} и коэффициента гибкости η . Опытные данные проведенных экспериментов показали, что прогибы усиленных стоек были меньше аналогичных, не усиленных образцов, следовательно, влияние имеет место. На основе анализа результатов экспериментов, в методику норм при вычислении D внесены предложения, которые учитывают шаг поперечного усиления при разных эксцентриситетах приложения нагрузки.

1 К определению условной критической силы гибких железобетонных стоек, усиленных композитными материалами

Эффективность использования композитных материалов в области усиления железобетонных конструкций, в последние годы все больше подтверждается в научных исследованиях [1,2]. Высокие прочностные свойства и схожий с металлом модуль упругости композитных материалов на основе углепластика [3-5], а также простота методики выполнения работ по усилению [6], делают этот метод таким же эффективным, как и традиционные варианты усиления с применением бетона и металла, а в ряде случаев, применение композитов является более эффективным или даже единственным [7,8].

В области усиления сжатых элементов открывается целый ряд конструкций, в которых применение композитных материалов было бы наиболее экономичным и эффективным [9;10]. К таким конструкциям можно отнести железобетонные колонны мостов, эстакад, путепроводов, промышленных зданий, где использование композитных материалов дает ряд преимуществ [11-13]. Из которых можно выделить следующие: повышенное сопротивление к агрессивному воздействию окружающей среды; удобную технологию выполнения работ по усилению, с минимальным набором инструментов, что является особенно актуальным для удаленных от городов объектов; существенный прирост прочности усиливаемых конструкций.

Расположение композитных материалов в поперечном направлении увеличивает прочность бетона на сжатие и на ряду с высокопрочными [14], увеличивают рациональность использования бетона в строительстве.

Однако до сих пор не решен ряд вопросов в нормативной литературе, по теоретической оценке работы элементов, усиленных композитными материалами. Так, согласно расчетным методикам СП164.1325800.2014 в области усиления сжатых элементов имеется ряд допущений. К одному из таких можно отнести определение условной критической силы N_{cr} для

железобетонных гибких стоек, усиленных композитными материалами в поперечном направлении, без учёта влияния усиления, то есть условная критическая сила находится как для обычных железобетонных образцов без усиления.

Полученные прогибы железобетонных колонн разной гибкости, в результате проведенных экспериментальных исследований [15-17], опровергли это. В работе [15] было установлено, что чем меньше расстояние в свету между хомутами, тем меньше прогибы, что говорит о влиянии усиления на жесткость железобетонных стоек, при этом образцы имели одинаковые характеристики и методику испытаний.

В работе по совершенствованию методики расчета гибких железобетонных стоек учитывались результаты исследований [18] по определению относительной деформации бетона ε_{b3} .

Ниже приведены формулы из СП164.1325800.2014 для определения понижающего коэффициента η , учитывающего влияние гибкости. Важными характеристиками, влияющими на величину коэффициента η являются жёсткость D и условная критическая сила N_{cr} . Как видно из формул (2,3,4), влияние композитного усиления, на изменение величин жесткости и условной критической силы отсутствует, а как было установлено ранее его необходимо в формулах учесть.

$$\eta = \frac{1}{1 - N/N_{cr}} \quad (1)$$

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 D}{l_0^2} \quad (2)$$

$$D = k_b E_b I + k_s E_s I_s, \quad (3)$$

$$\text{где } k_b = \frac{0,15}{\varphi_l (0,3 + \delta_e)} \quad (4)$$

Учитывая результаты ранее выполненных исследований [15,16] и анализ нормативных формул СП164.1325800.2014, было установлено, что композитное поперечное усиление влияет на прочностные свойства бетона железобетонных сжатых элементов. Логично считать, что влияние на жесткость D образцов от поперечного усиления, также зависит от уровня обжатия композитными материалами. Следовательно, было принято решение ввести в формулу (4) поправочный коэффициент, который будет выведен через полученные экспериментальные прогибы [15], значения которых приведены в табл. 1. Формула 3 примет следующий вид:

$$k_b = k_{f2} \frac{0.15}{\phi_l(0.3+\delta_e)} \quad (4)$$

Было установлено, что коэффициент k_{f2} зависит от гибкости железобетонных образцов, эксцентризитета приложения нагрузки и шага композитных хомутов, выражаемого через нормативный коэффициент k_e . При выводе формулы для определения коэффициента k_{f2} была использована зависимость (6) значений экспериментальных прогибов f^{exp} и коэффициента гибкости η .

$$e_0\eta = e_0 + f^{exp}, \quad (5)$$

Используя заданные значения e_0 и экспериментальные прогибы f^{exp} всех образов, были найдены экспериментальное значение η^{exp} .

Для определения экспериментальных значений коэффициентов k_{f2}^{exp} , была построена блок схема, которая представлена на рис.1. Слева приведены нормативные формулы, справа - формулы вычисления экспериментальных промежуточных характеристик, позволяющих определить k_{f2}^{exp} . Численные значения всех характеристик опытных образцов приведены в табл. 1. Используя эти значения была выведена формула (7) определения теоретических значений коэффициентов k_{f2} .

$$e_0 \eta = e_0 + f \quad \longrightarrow \quad \eta^{\exp} = \frac{e_0 + f^{\exp}}{e_0}$$

$$\eta = \frac{1}{1 - N/N_{cr}} \quad \longrightarrow \quad N_{cr}^{\exp} = \frac{N^{\exp}}{1 - 1/\eta^{\exp}}$$

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 D}{l_0^2} \quad \longrightarrow \quad D^{\exp} = \frac{N_{cr}^{\exp} \cdot l_0^2}{\pi^2}$$

$$D = k_b E_b I + k_s E I_s \quad \longrightarrow \quad k_b^{\exp} = \frac{D^{\exp} - k_s \cdot E_s \cdot I_s}{E_b \cdot I}$$

$$k_b^{\exp} = k_{f2}^{\exp} \cdot k_b = k_{f2}^{\exp} \cdot \frac{0,15}{\varphi_i(0,3 + \delta_e)} \quad \longrightarrow \quad k_{f2}^{\exp} = \frac{k_b^{\exp} \cdot \varphi_i(0,3 + \delta_e)}{0,15}$$

Рис. 1. Вывод формулы определения экспериментального коэффициента k_{f2}^{\exp}

Таблица 1 - Экспериментальные значения промежуточных характеристик, позволяющих определить k_{f2}^{\exp}

Шифр	N^{\exp} , кН	e_0 , мм	f^{\exp} мм	η^{\exp}_{cr} , кН	H^{\exp}_{cr} , кН	$D^{\exp}, \text{кН}$ $\cdot \text{м}^2$	k^{\exp}_b	k_{f2}^{\exp}	k_{theor}	$\frac{k_{f2}^{theor}}{k_{f2}^{\exp}}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
АК	1150	2	0,85	1,43	3855,9	563153,7	0,333	-	1,00	-
АКУ-Х ₁	1190,5	2	0,6	1,30	5158,8	753450,4	0,474	1,43	1,42	1,01
АКУ-Х ₆	1600	2	0,5	1,25	8000,0	1168404	0,710	2,12	2,13	1,00
АКУ-Х ₅	1625	2	0,4	1,20	9750,0	1423993	0,937	2,81	2,81	1,00
БК	592,5	22	4,35	1,20	3589,1	524183	0,315	-	1,00	-
БКУ-Х ₁	776,9	22	4,9	1,22	4276,0	624512,4	0,385	1,24	1,22	1,02
БКУ-Х ₂	794,7	22	4,7	1,21	4514,6	659355,8	0,408	1,27	1,30	0,98

Учитывая сложность формулы вычисления коэффициента k_{f2} для инженерных целей для удобства, была разработана таблица 2 численных значений коэффициентов k_{f2} .

Таблица 2 - Определение коэффициента k_{f2}

k_e	λ_k	e_0/h			
		0,01	0,1	0,2	0,3
0,5	10	1,45	1,32	1,21	1,14
	20	1,4	1,14	0,98	1,95
0,6	10	1,74	1,44	1,22	1,13
	20	1,73	1,4	1,15	1,0
0,7	10	2,03	1,55	1,23	1,12
	20	2,06	1,65	1,31	1,09
0,8	10	2,23	1,67	1,23	1,11
	20	2,4	1,9	1,47	1,16
0,9	10	2,61	1,78	1,24	1,1
	20	2,73	2,16	1,64	1,23
1	10	2,9	1,9	1,25	1,09
	20	3,06	2,41	1,8	1,3

Результаты расчёта по прочности стоек, с учетом коэффициента k_{f2} приведены в табл. 3.

Таблица 3 - Сравнение экспериментальных и теоретических значений прочности стоек нормативного расчета и с учетом предложений авторов

Шифр образца	Параметры расчета		Результаты эксперимента		Результаты нормативного расчета		Результаты расчета с учетом предложений авторов			
	λh	e_0	R^{exp}_{bn} , МПа	N^{exp} , кН	N^{theor}	N^{exp}	N_{cr} , кН	η^{theo}	N^{theor}	N^{theor}
					kH					
1	2	3	4	5	6	14	9	10	11	12
АКУ-Х1	10	0,2	282,3	1190,5	1188,0	1,00	518800	1,28	1156	0,97
АКУ-Х6	10	0,2	363,7	1600	1191,0	0,74	797093	1,22	1462	0,91
АКУ-Х5	10	0,2	283,0	1625	1298,0	0,80	976040	1,15	1275	0,78
БКУ-Х1	10	2,2	282,3	778,9	667,0	0,86	433565	1,18	676	0,87
БКУ-Х2	10	2,2	284,5	794,7	686,0	0,86	443950	1,18	699	0,88
БКУ-Х5	10	2,2	302,9	844	754,0	0,89	473548	1,19	777	0,92
ВКУ-Х1	10	4,2	309,9	482,5	442,0	0,92	318305	1,16	450	0,93
АГУ-Х1	20	0,4	280,9	873,2	760,0	0,87	120515	3,7	876	1,00
АГУ-Х3	20	0,4	259,3	900	733,0	0,81	117570	3,5	838	0,93
АГУ-Х5	20	0,4	259,3	1080	756,0	0,70	242142	1,8	1077	1,00
БГУ-Х1	20	2,2	280,9	400	438,0	1,10	86960	2,0	431	1,08
БГУ-Х3	20	2,2	291,3	450	442,0	0,98	80865	2,0	439	0,98
БГУ-Х5	20	2,2	331,7	597,5	489,0	0,82	153637	1,66	610	1,02
ВГУ-Х3	20	4,4	315,6	290	266,0	0,92	70000	1,62	269	0,93
ВГУ-Х5	20	4,4	283,0	270	275,0	1,02	74270	1,6	277	1,03
					$\sum \Delta^2 = 0,355$				$\sum \Delta^2 = 0,118$	

После введения коэффициента k_{f2} сумма среднеквадратических отклонений прочностей уменьшилась от нормативного расчета в 3 раза, с 0,355 до 0,118.

2 К определению прочности бетона, обжатого композитными материалами, расположенными в поперечном направлении

Данная работа является продолжением научных исследований [5,19], посвященных совершенствованию нормативной методики расчета на прочность по недеформированной схеме сжатых элементов, усиленных композитными материалами в поперечном направлении, на основе полученных экспериментальных данных, результаты которых освещены в работах [16,20,38].

Как показывает опыт, согласно результатам обследования и оценки технического состояния строительных конструкций [9,21], часто причиной усиления являются нарушение требований норм, технологии выполнения работ, физические повреждения и др. В зависимости от причины необходимости усиления, и от характеристик самой конструкции выбираются метод и материал усиления. Часто выбранный метод не устраивает заказчика по эстетическим и технологическим причинам, или экономически нецелесообразен. Также существуют случаи, когда усиление конструкций вообще невозможно традиционными методами.

Развитие новых методов усиления с применением композитных материалов имеет большие перспективы и экономические преимущества, а порой и является единственным решением по восстановлению или усилинию конструкций [39].

В связи с этим, последние годы кафедра изучает свойства композитных материалов в области усиления железобетонных конструкций.

Столь обширные исследования позволяют охватить весь спектр железобетонных конструкций, а полученные знания позволяют использовать новые возможности и варианты наиболее эффективных методов усиления.

Новые методы усиления, на основе использования композитных

материалов, имеют большие перспективы [3], и дают возможность усиливать конструкции с меньшими затратами [2,6,7], исключают ряд проблем традиционного усиления и расширяют возможности по усилению железобетонных конструкций [1,8,35].

Большинство экспериментальных исследований, посвященных усилению сжатых железобетонных элементов композитными материалами, было выполнено за рубежом, в таких странах, как США, Япония и Италия [36,37].

Вышедший в России в 2014 году Свод Правил 164.1325800.2014 по усилению железобетонных конструкций композитными материалами, позволил на законодательном уровне проектировать усиление конструкций, используя высокопрочный углепластик. Однако анализ расчётных положений нормативной методики расчета в России показал, что положительные свойства и высокая эффективность новых материалов усиления в области сжатых элементов [11] не могут быть в полной мере использованы в практике. Это связано с ограничениями, которые накладывает СП 164.1325800.2014 по усилению железобетонных конструкций композитными материалами. Экспериментально было доказана [15,16] высокая эффективность использования композитных материалов в области усиления сжатых элементов, выходящих за рамки рекомендуемых Сводом правил. Было установлено увеличение прочности и жесткости усиленных образцов, однако, согласно результатам теоретического расчета, увеличение прочности и жесткости сильно занижалось. Данный фактор значительно снижает перспективы использования новых материалов усиления, сужая круг использования композитных материалов [22-24].

В раннее выполненных работах [5,19] авторами представлены предложения по совершенствованию методики расчета сжатых элементов по прочности, а именно: предложения к определению относительной деформации усиленного бетона δ_{bz} и предложения к определению условной критической силы N_{cr} . Эти предложения базируются на анализе результатов

экспериментальных исследований и существенно сближают значения теоретических и экспериментальных прочностей образцов. Однако, для ряда опытных стоек, все же наблюдается занижение теоретической прочности по сравнению с экспериментальной, наибольший интерес из которых представляет самый мощный вариант усиления - композитная обойма (АКУ-X₅ и БКУ-X₅), при этом наблюдается существенное занижение теоретической прочности (ст. 8, Табл. 4) по сравнению с экспериментальной.

Анализ положений нормативной методики расчета по прочности сжатых железобетонных элементов (СП 164.1325800.2014), усиленных композитными материалами, показал, что свод правил вводит ряд ограничений к характеристикам конструкций. Одно из них связано с ограничениями значения соотношения габаритных размеров поперечного сечения усиливаемого элемента, которое не должно превышать 1,5. Данное ограничение нашло отражение в расчетных формулах, при вычислении коэффициента k_{ef} (1), который, в свою очередь, существенно занижает увеличение сопротивления на сжатие, обжатого композитными материалами, бетона R_{b3} (2) от действия поперечного усиления, следовательно занижается и прочность стоек.

Выполнив математический расчет, для стоек с соотношением поперечного сечения $h/b=25/12,5=2$ радиусом скругления $r=2,2\text{ см}$, получили $k_{ef}=0,216$, что практически в пять раз занижает добавочную прочность бетона от действия композитного усиления. В свою очередь, результаты экспериментальных исследований [38] показали существенное увеличение прочности конструкций, которая дает возможность утверждать, что и увеличение прочности бетона на сжатие существенно больше, чем описано в нормативном расчете.

На основании вышесказанного, предлагается ввести повышающий коэффициент в нормативную формулу определения сопротивления бетона R_{b3} в условиях объемного напряженного состояния (2).

Используя данные экспериментальной прочности опытных образцов,

путем математических расчётов, были определены экспериментальные значения сопротивления усиленного бетона и выведена, зависящая от эксцентрикитета приложения нагрузки и нормативного коэффициента k_e (3), формула определения коэффициента k_{f3} (4). Для упрощения инженерных расчетов была разработана таблица численных значений коэффициента k_{f3} (Табл. 4).

$$k_e = 1 - \frac{(b - 2 \cdot r)^2 + (h - 2 \cdot r)^2}{2 \cdot b \cdot h} \quad (1)$$

$$R_{b3} = R_b + k_{ef} \cdot k_e \cdot R_f \cdot \mu_f \quad (2)$$

$$k_{f3} = \left(1 - \frac{S_w}{2 \cdot (\sqrt{h^2 + b^2} - 2 \cdot r)} \right)^2 \quad (3)$$

$$k_{f3} = \left(46,418 \frac{e_0}{h} - 111,43 \left(\frac{e_0}{h} \right)^2 - 0,0142 \right) \cdot e^{\left(56,131 \left(\frac{e_0}{h} \right)^2 - 25,889 \frac{e_0}{h} + 1,7328 \right) k_e} \quad (4)$$

Коэффициент k_{f3} предлагается ввести в формулу (1), и тогда она будет иметь следующий вид:

$$R_{b3} = R_b + k_{f3} \cdot k_{ef} \cdot k_e \cdot R_f \cdot \mu_f \quad (3)$$

Таблица 4 - Значения коэффициента k_{f3}

k_e	e_0/h			
	0,01	0,1	0,2	0,3
0,5	0,98	3,06	2,66	2,39
0,6	1,14	2,97	2,36	2,17
0,7	1,32	2,88	2,09	1,97
0,8	1,53	2,80	1,85	1,78
0,9	1,77	2,72	1,64	1,62
1	2,05	2,64	1,46	1,46

В Табл. 5 представлены результаты расчётов, согласно методике, предложенной сводом правил (СП164.1325800.2014). В столбцах 6 и 7 приведены результаты прочности нормативного расчёта из сравнения значений с экспериментальной прочностью, в столбцах 8-9 приведены результаты расчётов, согласно разработанных предложений по совершенствованию нормативный методики, связанное с коррекцией

формулы определения ε_{b3} и жесткости конструкции D [5,19].

В столбцах 10,11 приведены значения коэффициентов $k_f 3$, рассчитанных для указанных стоек и прочность опытных образцов, рассчитанных с учетом предложений, разработанных в [5,19] и с учётом коэффициентов $k_f 3$. В столбце 12 приведены результаты сравнения экспериментальных значений прочности с соответствующими теоретическими.

Таблица 5 - Сравнение экспериментальных и теоретических значений

прочности стоек нормативного расчета и с учетом предложений авторов

Шифр образца	Параметры расчета		Результаты эксперимента		Нормативный расчет		Расчет с учетом предложений [1,2]		Расчет с учетом $k_f 3$		
	λh	e_0	$R_{exp, bn}^{bn},$ MPa	$N^{exp},$ kH	$N^{theor},$ kH	N^{theor} N^{exp}	$N^{theor},$ kH	N^{theor} N^{exp}	$k_f 3$	$N^{theor},$ kH	N^{theor} N^{exp}
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
АКУ-Х1	10	0,2	282,3	1190,0	1188,0	0,97	1156	0,97	1,41	1199	1,01
АКУ-Х6	10	0,2	363,7	1600,0	1191,0	0,90	1462	0,91	1,97	1613	1,01
АКУ-Х5	10	0,2	283,0	1625,0	1298,0	0,77	1275	0,78	2,76	1645	1,01
БКУ-Х1	10	2,2	282,3	778,9	667,0	0,85	676	0,87	2,77	774	0,99
БКУ-Х2	10	2,2	284,5	794,7	686,0	0,86	699	0,88	2,37	797	1,00
БКУ-Х5	10	2,2	302,9	844,0	754,0	0,89	777	0,92	1,6	844	1,00
У-Х1		2	9,9	2,5	2,0	2	450	0,93	22	85	,01
					$\Delta^2 = 0,124$		$\sum \Delta^2 = 0,1$	$\sum \Delta^2 = 0,0004$			

Примечание: 1. Описание шифров опытных образцов в ст.1 приведены в [38].

Из результатов расчетов видно, что сумма среднеквадратических отклонений с учетом предложений к определению R_{b3} по сравнению с результатами нормативного расчета и расчета с учетом предложений авторов к определению относительной деформации усиленного бетона s_{b3} и жесткости D, уменьшилась с 0,124 и 0,1 до 0.0004 соответственно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе эксплуатации зданий и сооружений в их несущих конструкциях могут возникнуть дефекты, такие, как трещины, прогибы, коррозия арматуры, сколы и др., появляющиеся в результате неправильной эксплуатации, перегрузок и воздействия агрессивной среды [25]. Усиление конструкций может быть следствием ошибок строительства или проектирования [26,27]. В качестве материалов усиления используются в основном бетон и металл [22], однако в некоторых случаях использование этих традиционных методов усиления является дорогостоящим, трудоёмким или невозможным для осуществления [28]. Наряду с традиционными методами, в последние десятилетия всё больше развиваются и изучаются композитные материалы и соответствующие методы усиления. Особенностью композитного усиления является упрощенная методика выполнения работ и минимальный набор инструментов, что делает этот метод более выгодным по сравнению с традиционными [23,29-30]. Композитное усиление с использованием углеродных холстов является эффективным для железобетонных изгибаемых [31,40-41], сжатых [42-44] и каменных [11] конструкций. Они обладают малым весом и высокой прочностью [3], а также позволяют производить усиление конструкций почти любой формы. Последние годы на кафедре, совместно с партнерами, ведётся работа по изучению эффективности композитных материалов при усилении железобетонных элементов [17].

В качестве композитных материалов использовалась немецкая продукция фирмы «БАСФ». В процессе ряда экспериментов [16-32] было доказана эффективность этих материалов и всей клеевой системы, результаты научных исследований которых нашли отражение в более 50 научных трудов, над которыми работали такие ученые, как Польской П.П.,

Маилян Д.Р., Георгиев С.В., Шилов А. В., Михуб Ахмад, основные результаты работ отражены в трудах [38-48].

Однако фирма «БАСФ» прекратила свою работу на территории России, в связи с этим стало невозможno использовать их сырьё в практическом применении. Поиски новых фирм, реализующих композитные материалы в Российской Федерации, привели к фирме «Гидрозо». Интерес к изучению материалов фирмы «Гидрозо» возник после изучения характеристик композитных материалов, сопоставив которые, пришли к выводу, что они не уступают характеристикам материалов фирмы БАСФ [5]. Однако свойства материалов и методика усиления существенно отличаются от ранее изученной.

Согласно [6], основными показателями для углекани, выступающей в качестве основного материала по усилению, являются модуль упругости и прочность материалов на разрыв, а для kleевой системы - это высокая адгезия материалов усиления и бетона конструкции, которая обеспечивает надежную совместную работу.

Согласно характеристикам завода-изготовителя материалов усиления фирмы «Гидрозо», данные показатели сопоставимы с изученными материалами фирмы «BASF». Однако имеются отличия в плетении композитной углекани, а также в методике выполнения работ по усилению. Так как для эффективной работы композитных материалов и бетона конструкций важна их совместная работа вплоть до разрушения элемента, данные вопросы весьма актуальны. Как показал анализ опубликованной научной исследовательской деятельности, испытаний данных материалов в России не проводилось.

Цель настоящего исследования - выявить все преимущества и недостатки технологии выполнения работ фирмы «Гидрозо» по сравнению с проверенной технологией фирмы «БАСФ», для выявления всех перспектив и дальнейшего изучения их материалов усиления.

Для понимания темы исследования, ниже представлена технология выполнения работ фирмы «БАСФ», по которой производились ранее представленные эксперименты [17].

На первом этапе, с поверхности конструкции убирается цементное молоко с оглаживанием щебня, для увеличения площади склеивания бетона и материала усиления. Цементное молоко удаляется механическим методом «вручную», при этом создается неровная поверхность. Далее идет процесс обеспыливания и обработка специальной грунтовкой, с выдержкой до полного высыхания в течении 3-х дней. На следующем этапе производится выравнивание поверхности с использованием высокопрочной шпаклевки, для обеспечения плотного прилегания материала усиления и бетона конструкции, и процесс снова прерывается на высыхание в течение трёх дней. Заключительным этапом является наклеивание композитного материала, с покрытием слоем клея сверху. Данная технология, kleевая система и материалы усиления подробно описаны в работах [34].

Согласно результатам эксперимента, адгезия обеспечивается на всех этапах испытания, вплоть до разрушения образцов, при этом происходит одновременный отрыв композитного материала вместе с защитным слоем бетона от арматуры, что говорит о надежной работе kleевой системы и методики усиления.

Однако, данная методика, на наш взгляд, имеет целый ряд недостатков, один из которых - высокая трудоемкость выполнения работ, связанная с большим количеством этапов. К тому же после процессов огрунтовывания и зашпаклевывания требуется прерывать работу на высыхание, при этом увеличиваются сроки выполнения работ. Это может играть ключевую роль при выборе метода усиления, например, для помещений, где недопустимо останавливать производственные процессы.

Следующим недостатком является трудоёмкий и пыльный процесс удаления верхнего цементного слоя бетона до оголения щебня. В лабораторных условиях [34] этот процесс выполняется зубилом и молотком,

в промышленных масштабах используется пескоструйная обработка. Выбор данной обработки поверхности бетона вручную очень трудоемкий и требует особого контроля для избегания повреждения целостности бетона конструкций и, при использовании пескоструйной системы, процесс обработки очень пыльный, что требует освобождения помещения, где ведутся работы по усилению и последующей уборке помещения. К следующему недостатку можно отнести нерентабельность метода усиления при малых объемах работ. Каждый из этапов требует использования своего состава грунтовки, шпаклёвки, клея, каждый из которых необходимо вскрывать и из-за этого сокращается срок годности материалов, к тому же придётся использовать на объекте большое количество составов с kleевой системой, что повышает трудозатраты.

Методика выполнения работ, предоставленная фирмой «Гидрозо», имеет следующие этапы: на первом этапе предлагается поверхность зашлифовать специальной машинкой с пылесосом, что обеспечит беспыльное, менее трудоёмкое и достаточно технологичное производство. Далее наносится грунтовочный слой, который является также kleем для пропитки материалов усиления. В течение часа обеспечивается его высыхание, а при наличии повреждений и сколов используется шпаклёвка, для выравнивания поверхности, которая изготавливается из той же грунтовки, путём добавления сухой добавки. Это можно отнести к преимуществам универсальности kleевой системы. Использование одного kleя для огрунтовывания, наклейки холстов, выравнивания поверхности даёт ряд преимуществ - а именно: отсутствие большого количества разных составов с kleевой системой, а также его маленький перерасход при небольших объёмах. Данные преимущества позволяют фирмам, выполняющим усиление, не завышать цены при малых объёмах работ, при этом увеличивается мобильность выполнения работ, а также задействуется меньшее количество специалистов.

К отрицательным особенностям можно отнести процесс наклейки холстов из углекани «мокрым» способом, при этом материал, заранее обрезанный в соответствии с требуемыми размерами, раскладывается на чистой, ровной поверхности на пленке. При помощи кистей и валиков вся площадь холста пропитывается эпоксидным клеем, затем процесс повторяется на второй стороне холста до насыщения. После пропитки, холст укладывается на поверхность бетона послойно и разглаживается пластиковым шпателем или руками. На огрунтованную бетонную поверхность наносится первый слой клея, затем укладывается последующий слой пропитанного холста, по принципу: «свежий по свежему». Нанесение клея сверху последнего слоя холста технологией не предусматривается.

Приведенный выше метод наклейки холстов «мокрым способом», с точки зрения удобства выполнения работ, существенно уступает методу, фирмы «БАСФ», где усиление осуществляется сухим способом [34]. Это, в первую очередь, связано с неудобством усиления длинными холстами большепролетных конструкций, к тому же дополнительная пропитка холстов на пленке - это дополнительный этап, который усложняет процесс усиления.

Рассмотрев все плюсы и минусы, приходим к заключению, что методика усиления, разработанная фирмой «Гидрозо», более простая, мобильная и дешёвая в отношении трудозатрат и расхода материалов. К такому выводу пришли, учитывая следующие преимущества: работа беспыльная, отсутствует необходимость прерывания работ между этапами, связанное с высыханием и минимальным количеством используемых составов клевой системы. К недостаткам все же можно отнести ручной способ наклейки холстов «мокрым» способом, что требует технологической доработки данного процесса.

Использование данной методики и материалов усиления фирмы «Гидрозо» однозначно имеет большие перспективы. Однако, проведённый поиск научных исследований, показал, что на территории Российской Федерации экспериментальных исследований не велось и под вопросом

остаётся надёжность сцепления и обеспечения совместной работы материала усиления и бетона конструкции, что и является нашей дальнейшей перспективой.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Мухамедиев Т.А. Проектирование усиления железобетонных конструкций композиционными материалами // Бетон и железобетон. № 32013. С. 6-8.
- 2 Чернявский, В.А., Аксельрод Е.З. Усиление железобетонных конструкций композитными материалами // Жилищное строительство. 2003. № 3. С. 15-16.
- 3 Устинов Б.В., Устинов В.П. Исследование физико-механических характеристик композитных материалов (КПМ) // Известия вузов. Строительство. 2009. № 11-12. С.118-125.
- 4 Design and construction of building structures with fibre-reinforced polymers. CSA S806-12. Mississauga, Ontario, Canada: Canadian Standards Association (CSA); 2012.
- 5 Маилян Д.Р., Польской П.П. Георгиев С.В. Свойства материалов, используемых при исследовании работы усиленных железобетонных конструкций//Инженерный вестник Дона,2013,№2.
URL:ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1673
- 6 Шилин А.А., Пшеничный В.А., Картузов Д.В. Усиление железобетонных конструкций композитными материалами // М: Стройиздат. 2004. 144с.
- 7 Хаютин Ю.Г., Чернявский В.Л., Аксельрод Е.З. Применение углепластиков для усиления строительных конструкций // Бетон и железобетон. 2001. №6 С. 17-20.
- 8 Пинаджян В.В. К вопросу усиления железобетонных конструкций // Строительная промышленность. - 1948. - № 3 - С. 14-17.
- 9 Теряник В.В., Бирюков А.Ю. Результаты экспериментальных исследований прочности и деформативности сжатых усиленных элементов реконструируемых зданий // Вестник ЮУрГУ.

Серия: Строительство и архитектура. 2009. №35 (168). URL: clck.ru/QgtxD

10 Benzaid R., Mesbah H.A., Amel B. Experimental investigation of concrete externally confined by CFRP composites // 5th International Conference on Integrity-Reliability-Failure (IRF). Inegiinst engenharia mecanica e gestao industrial, 2016. pp. 595-602.

11 Костенко А.Н. Прочность и деформативность центрально и внецентренно сжатых кирпичных и железобетонных колонн, усиленных угле и стекловолокном. Автореферат. дисс. канд. техн. Наук. Москва. 2010. 26с.

12 Поднебесов, П. Г. Результаты исследований прочности и деформативности железобетонных колонн, усиленных обоймами // Градостроительство, реконструкция и инженерное обеспечение устойчивого развития городов Поволжья. 2015. С. 42-47.

13 Онуфриев, Н.М. Усиление железобетонных конструкций промышленных зданий и сооружений. - Москва: Стройиздат - 1965. 342с.

14 Мкртчян А.М., Аксенов В.Н. О коэффициенте призменной прочности высокопрочных бетонов // Инженерный вестник Дона, 2013, № 3. [URL:ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1817](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1817)

15 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](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4826)

16 Польской П.П., Маилян Д.Р., Георгиев С.В. Прочность и деформативность гибких усиленных стоек при больших эксцентриситетах // Научное обозрение. 2014. № 12-2. С. 496-499.

17 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.

18 Георгиев С.В., Меретуков З.А., Кремененко А.Г. К определению относительной деформации усиленного бетона eb3 сжатых железобетонных

гибких стоек, усиленных композитными материалами, расположенными в поперечном направлении // Инженерный вестник Дона, 2020, № 10. URL:ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2020/6649

19 Георгиев С.В., Меретуков З.А., Соловьева А. И. К определению условной критической силы гибких железобетонных стоек, усиленных композитными материалами // Инженерный вестник Дона, 2014, № 4-21. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2021/6927

20 Польской П.П., Маилян Д.Р., Георгиев С.В. Прочность и деформативность коротких усиленных стоек при малых эксцентрикитетах // Инженерный вестник Дона, 2014, №4-1. URL:ivdon.ru/ru/magazine/archive/N4y2014/2734

21 Литвинов И.М. Инструкция по усилению и восстановлению железобетонных конструкций методом И. М. Литвина // Харьков: Харьк. обл. полигр. ф-ка, 1948, 39 с.

22 Мальганов А.И., Плевков В.С., Полищук А.И. Восстановление и усиление строительных конструкций аварийных и реконструируемых зданий // Томск, Атлас схем и чертежей, 1990. 316с.

23 Шилин А.А. Пшеничный В.А., Картузов Д.М. Внешнее армирование железобетонных конструкций композитными материалами // ОАО «Издательство Стройиздат», 2007. 184с.

24 Доломанюк Р.Ю. Оценка состояния железобетонных конструкций для регрессивной зависимости коррозийных повреждений стальной арматуры от толщины защитного слоя бетона в условиях открытой атмосферы // В сборнике: Образование. Транспорт. Инновации. Строительство. Сборник материалов III Национальной научно-практической конференции. 2020. С. 524-528.

25 Иванов Ю.В. Реконструкция зданий и сооружений: Усиление, восстановление, ремонт // М.: А.С.В, 2012. 312с.

26 Залесов, А.С. Развитие методов расчета железобетонных конструкций в России // 80-летие НИИЖБ им. А.А. Гвоздева. Сборник

научных статей. М.: 2007. 5-10с.

27 Гвоздев А.А. Восстановление основных конструкций капитальных зданий и сооружений // Под общей ред. и при участии д.т.н., проф. А.А. Гвоздева. - М: Стройиздат, 1947. 204с.

28 Микульский В.Г., Игонин Л.А. Сцепление и склеивание бетона в сооружениях // М: Стройиздат. 1965. 127с.

29 Чернявский, В.А., Аксельрод Е.З. Усиление железобетонных конструкций композитными материалами. Жилищное строительство. 2003. № 3. С. 15-16.

30 Литвинов, А.Г. Восстановление и усиление железобетонных конструкций с помощью полимеров // Новочеркасск: Изд-во «Наука, Образование, Культура», 2010. 103с.

31 Клевцов В. А., Фаткуллин Н.В. Расчет прочности нормальных сечений изгибаемых элементов, усиленных внешней арматурой из композитных материалов // Научно-техническая конференция молодых ученых и аспирантов ЦНИИС, 2006.

32 Польской П.П., Маилян Д.Р, Георгиев С.В. О влиянии гибкости стоек на эффективность композитного усиления // Инженерный вестник Дона. 2015. №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2015/3374

33 Шилов А.А. К вопросу усиления каркасно-монолитного здания автоцентра в г. Аксае с использованием композитных материалов // Строительство и архитектура 2015: сб. докл. Междунар. науч-практ. конф. Ростов-на-Дону. 1015. С. 75-78.

34 Маилян Д.Р, Польской П.П., Георгиев С.В. Методики усиления углепластиком и испытания коротких и гибких стоек // Научное обозрение. 2014. № 10-2. С. 415-418.

35 Belyaev Alexey, Nesvetaev Grigory, Mailyan Dmitry. Calculation of three- layer bent reinforced concrete elements considering fully transformed concrete deformation diagrams // MATEC Web of Conferences 106, 04022 (2017) [URL:10.1051/matecconf/20171060](https://doi.org/10.1051/matecconf/20171060) SPbWOSCE-2016 4022

- 36 Chajes M.J., Finch W.W., Januszka T.F. Bond and Force transfer of composite material plates bonded to concrete // ACI Structural Journal. - 1999. -V. 93, № 2. - pp. 295-303.
- 37 Shehata I.A.E.M., Carneiro L.A.V. and Shehata L.C.D. Strength of Short Concrete Columns Confined with CFRP Sheets. Materials and Structures, Vol. 35, January-February 2002, pp. 50 - 58.
- 38 Polskoy P., Mailyan D., Georgiev S., Muradyan V. The strength of compressed structures with cfrp materials reinforcement when exceeding the crosssection size // E3S Web of Conferences, 2018. p. 02060
- 39 Chikh N., Gahmous M., Benzaid R. Structural Performance of High Strength Concrete Columns Confined with CFRP Sheets // Proceedings of the World Congress on Engineering 2012 Vol III. WCE 2012, July 4 - 6, 2012, London, U.K.
- 40 El-Refaire S.A. Repair and strengthening of continuous reinforced concrete beams // Ph.D. thesis, department of civil and environmental engineering, University of Bradford; UK,2001. 207P
- 41 Arduini, M. and Nanni, A. Behavior of Precracked RC Beams Strengthened With Carbon FRP Sheets. Journal of Composites for Construction. U.S.A. Vol.1, No.2, 1997, pp. 63-70.
- 42 Shehata I.A.E.M., Carneiro L.A.V. and Shehata L.C.D. Strength of Short Concrete Columns Confined with CFRP Sheets. Materials and Structures, Vol. 35, January-Februarv 2002, pp. 50 - 58.
- 43 Lilistone D., Jolly C.K. An innovative form of reinforcement for concrete columns using advanced composites, The Structural Engineer, Vol. 78, No. 23/24, 5 December 2000.
- 44 Benzaid R., Mesbah H.A., Amel B. Experimental investigation of concrete externally confined by CFRP composites // 5th International Conference on Integrity-Reliability-Failure (IRF). Inegiinst engenharia mecanica e gestao industrial, 2016. pp. 595-602.
- 45 Polskoy P., Georgiev S., Muradyan V., Shilov A. The deformability of

short pillars in various loading options and external composite reinforcement.

В сборнике: MATEC Web of Conferences 2018. С. 02026.

46 Георгиев С.В., Соловьева А. И., Меретуков З.А. Сравнение методик усиления внешним армированием композитных материалов. // Инженерный вестник Дона, №10 (2021) ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2021/7221.

47 Георгиев С.В., Соловьева А. И., Меретуков З.А. К определению условной критической силы гибких железобетонных стоек, усиленных композитными // Инженерный вестник Дона, №4 (2021) ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2021/6927

48 Георгиев С.В., Соловьева А. И., Меретуков З.А. К определению прочности бетона, обжатого композитными материалами, расположенными в поперечном направлении // Инженерный вестник Дона, №10 (2021) ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2021/7225