

К вопросу повышения уровня эффективности внешнего композитного армирования при усилении железобетонных конструкций

П.П. Польской, А.Г. Умаров, Р.Г. Умаров

Донской государственной технической университет

Аннотация: Дан сравнительный анализ отдельных показателей классического и нового методов усиления железобетонных конструкций, показан возможный вариант повышения уровня эффективности внешнего композитного армирования. Представлены элементы программы исследования, с описанием материалов и основных характеристик образцов.

Ключевые слова: железобетон, бетон, арматура, композитные материалы, углепластик, усиление, внешнее армирование, эксперимент.

В последние годы в России все больше внимания уделяется вопросам использования композитных материалов не только в промышленности, но и в строительстве. Речь идет об увеличении объемов использования стекло- и углепластиков в процессе ремонта, восстановления и усиления различных видов строительных конструкций [1-3]. Это связано с высокими технико-экономическими показателями этих материалов [4]. К ним относятся, в первую очередь, высокая прочность на растяжение, а также отношение этой прочности к собственному весу. Для композитных материалов оба этих показателя в 7-10 раз выше, чем у стали класса А400. Исследования, проведенные в России [5,6] и за рубежом [7-9] только доказывают возможности и перспективы развития применения данных материалов.

Однако внедрение новых и прогрессивных материалов, имеющих высокие показатели, невозможно без широкой экспериментальной базы. С учетом вышеизложенного, начиная с 2012 года, на кафедре «Железобетонные и каменные конструкции» Донского государственного технического университета ведутся комплексные исследования железобетонных конструкций, усиленных различными видами композитных материалов при различных видах напряженно-деформированного состояния.

По единой методике исследовались прочность и деформативность изгибаемых железобетонных элементов, усиленных внешним композитным

армированием, на действие изгибающих моментов и поперечных сил [10], а также сжатых элементов [11]. При усилении изгибаемых элементов варьировались: вид композитного материала (стекло- и углепластики в виде ткани и ламинатов), проценты стального внутреннего и внешнего композитного армирования; пролет среза при приложении нагрузки; наличие или отсутствие начальных трещин.

При усилении сжатых элементов – дополнительно варьировались гибкость, эксцентриситет приложения нагрузки, а также виды и варианты внешнего и внутреннего композитного армирования (внешнее поперечное, продольное и комбинированное армирование, ширина хомутов, их шаг или сплошная обойма).

В общей сложности было проведено более 130 испытаний опытных образцов, которые по своим размерам были близки к натуральным.

Проведенные исследования показали не только значительное приращение прочности усиленных элементов, но и очень высокую надежность композитного усиления изгибаемых и сжатых железобетонных элементов при всех исследуемых видах напряженно-деформированного состояния [12].

При наличии разных методов усиления, всегда стоит вопрос о целесообразности использования каждого из них в конкретной ситуации.

Сравнение классического (использования бетона и стали) и нового (применение композитных материалов) методов усиления показывает, что, несмотря на наличие отдельных недостатков, каждый из методов обладает целым рядом преимуществ, которые принадлежат, в ряде случаев, только к одному методу.

В частности, в классическом методе невозможно, на наш взгляд, преодолеть надежность усиления сжатых элементов, а в методе внешнего композитного армирования возможность усиления безбалочных перекрытий моно-

литно-каркасных зданий с минимально возможной дополнительной нагрузкой на все нижерасположенные конструкции, не требующей усиления.

Поднимая вопросы о преимуществах и недостатках каждого из методов усиления, необходимо говорить об и эффективности с точки зрения предельного уровня усиления.

При сравнении именно предельного уровня эффективности для рассматриваемых методов усиления, необходимо отметить, что новый метод в ряде случаев уступает классическому, т.к. наличие только внешнего композитного армирования не позволяет увеличить размеры поперечного сечения усиливаемого элемента, что свойственно классическому методу. Поэтому эффективный уровень композитного усиления составляет 10-60% и полностью зависит от величины относительной высоты сжатой зоны бетона для усиливаемого элемента - $\xi = x/h_0$. Последняя, в свою очередь, зависит от процента стального армирования и высоты рабочего сечения.

С учетом вышеизложенного, единственным возможным вариантом повышения уровня эффективности внешнего композитного усиления является использование двойного внешнего армирования со стороны сжатой и растянутой зоны усиливаемых элементов. Это могут быть изгибаемые или внецентренно сжатые элементы с большим эксцентриситетами. Однако, из отечественных и иностранных источников и экспериментов нашей кафедры известно, что усиление изгибаемых и сжатых железобетонных элементов высокомодульными углепластиковыми ламинатами толщиной 1,2 или 1,4 мм не представляется возможным, т.к. они имеют малые предельные относительные деформации на сжатие, которые заметно ниже средних значений аналогичных деформаций сжатого бетона. Как результат, при уровне нагрузки, равной примерно $0,8N_{ult}$, композитный материал выпучивается.

Появление на строительном рынке низкомодульных полос и пластин на основе углеродных волокон дает шанс для внедрения двойного армирования

и повышения уровня эффективности композитного усиления. Однако ответ на данный вопрос может дать только эксперимент.

Для реализации вышеуказанной идеи, на кафедре железобетонных и каменных конструкций ДГТУ разработана и воплощается в жизнь программа исследования сжатых и изгибаемых элементов, усиленных низко модульными углепластиковыми ламинатами, расположенными в сжатой и высоко модульными в растянутой зонах.

В качестве низко модульных полос, располагаемых в сжатой зоне конструкций, применяются углепластиковые ламинаты CarbonWrap Lamel T-50/110 толщиной 5 мм (см. рис. 1) с модулем упругости $1,5 \times 10^5$ МПа, производства НЦК (Нанотехнологический центр композитов).

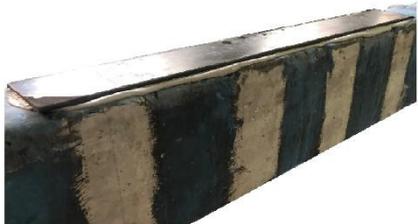
<p>Описание</p>	<p>Предназначена для увеличения несущей способности и ремонта: бетонных, железобетонных, каменных, стальных и деревянных конструкций.</p> 
<p>Область применения</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Увеличение несущей способности и ремонта строительных конструкций, промышленных зданий, мостов и других железобетонных, каменных и деревянных конструкций; • Увеличение эксплуатационных нагрузок конструкций на промышленных и гражданских объектах; • Восстановление несущей способности конструкций, снижение которой обусловлено коррозией и/или незапланированным действием внешней среды; • Сейсмоусиление; • Дополнительное ограничение образования трещин на поверхности, увеличение жесткости конструкций; • Изменение статической схемы при удалении опор, стен, фрагментов перекрытий; • Исправление ошибок проектирования и строительства.
<p>Достоинства</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Широкая область применения; • Легкость: не создает дополнительной нагрузки на конструкцию; • Исключительная стойкость к коррозии; • Простота транспортировки и устройства; • Минимальные трудовые и временные затраты на проведение работ; • Возможность выполнения ремонтных работ без прекращения эксплуатации усиливаемого здания или сооружения; • Высокие механические характеристики; • Отсутствие дополнительных затрат при последующей эксплуатации
<p>ТУ</p>	<p>ТУ 2256-044-38276489-2017 (ТУ 22.21.42-044-38276489-2017)</p>

Рис. 1 – Углепластиковая ламель CarbonWrap Lamel T-50/110
 (Авторская разработка)

В растянутой зоне применяются ламинаты фирмы BASF шириной 50 мм и толщиной 1,2 мм с модулем упругости $2,1 \times 10^5$ МПа (см. рис. 2).

В качестве композитной арматуры для усиления наклонных сечений балок и конструктивной поперечной арматуры при усилении нормальных сечений, а также конструктивной поперечной арматуры при усилении сжатых элементов, использовалась углеткань толщиной 0,166 мм на основе однонаправленных углеродных волокон MBraceFibCF 230/4900/300. Ткань и расходные материалы применялись производства фирмы BASF.

Ламели MBrace® Laminate

Рекомендуемое применение

- для уменьшения прогибов на плитах перекрытий и стенах;
- для усиления бетонных, каменных и стальных конструкций;
- для уменьшения прогиба при постоянной и переменной нагрузке;
- для снижения усталости элементов конструкции.

Преимущества

- быстрая и легкая установка;
- увеличение прочности конструкции без увеличения веса;
- простота перевозки и маневрирования;
- высокая стойкость к усталостным деформациям;
- отсутствие коррозии;
- водонепроницаемость;
- возможность предварительного напряжения лент.

Пример расшифровки наименования:

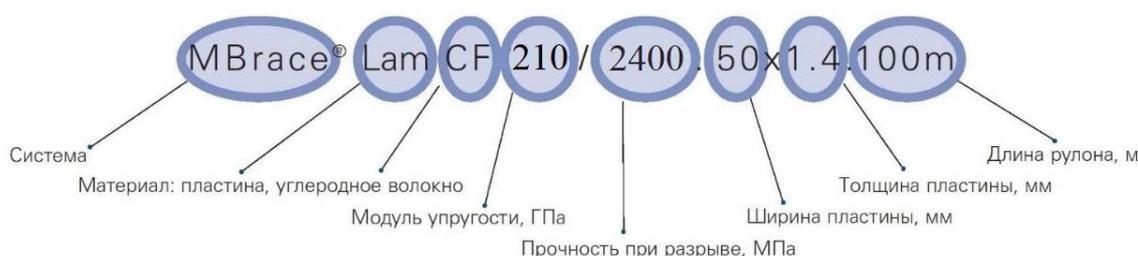


Рис. 2. – Ламели MBRACE LAM CF210/2400.50x1, 4.100m
(Авторская разработка)

Программа исследования разбита на 2 этапа и включает в себя испытание изгибаемых (см. рисунки 3-6) элементов на первом этапе и сжатых (рис. 7) элементов – на втором.

В качестве изгибаемых элементов приняты слабоармированные, как в продольном, так и в поперечном направлениях, железобетонные элементы из бетона проектного класса В25 сечением, 125x250h мм длиной 2400 мм, за-

груженные в третях пролета. В продольном направлении балки имеют симметричную арматуру, состоящую из 2Ø12A500 как в сжатой, так и растянутой зонах.

Поперечная арматура выполнена в виде замкнутых хомутов Ø3мм, установленных с шагом $15d_s$ или 180 мм, что больше конструктивных требований норм для приопорных участков $S_w \leq hq_2 = 110\text{мм}$. Процент продольного армирования равен 0,8%, при его предельном значении – 3,08%. Интенсивность стального поперечного армирования q_{sw} составляет 313 Н/см при минимально допустимом его значении для реальных конструкций $q_{sw}^{min} = 700\text{ Н/см}$. Указанное стальное армирование железобетонных балок было принято специально, для того, чтобы в полной мере оценить возможность использования композитного материала для усиления железобетонных элементов до уровня, превышающего граничное значение относительной высоты сжатой зоны бетона $\xi_R = x_R/h_0$ как по нормальным, так и по наклонным сечениям.

Учитывая, что стальное поперечное армирование ниже прочности нормальных сечений опытного образца, в качестве эталонной принята балка, усиленная углетканью на приопорных участках (см. рис. 3).

Особенностью данного исследования является повторное усиление железобетонных элементов композитной арматурой под нагрузкой, равной $0,6N_f^{exp}$, где N_f^{exp} – разрушающая нагрузка от первого композитного усиления растянутой зоны.

Варианты возможного усиления опытных образцов приведены на рисунках 3-6.

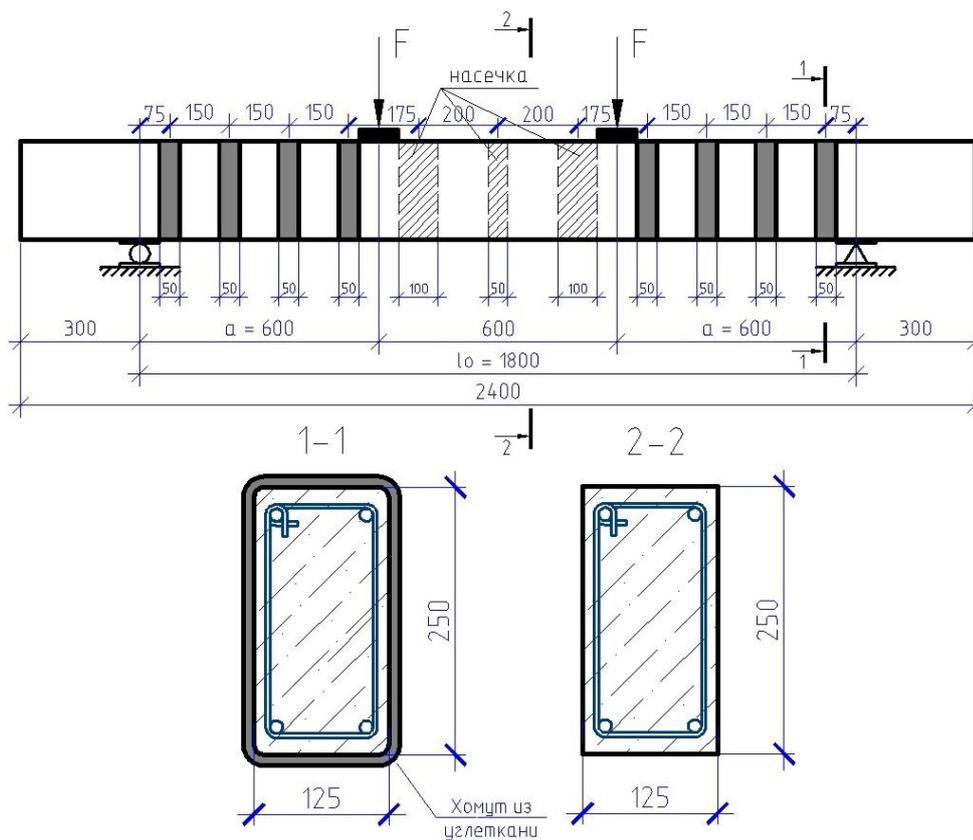


Рис. 3 – Вариант эталонной балки, усиленной в пролетах среза до уровня нагрузки $F_R=Q_R=M_R/a$ (Авторская разработка)

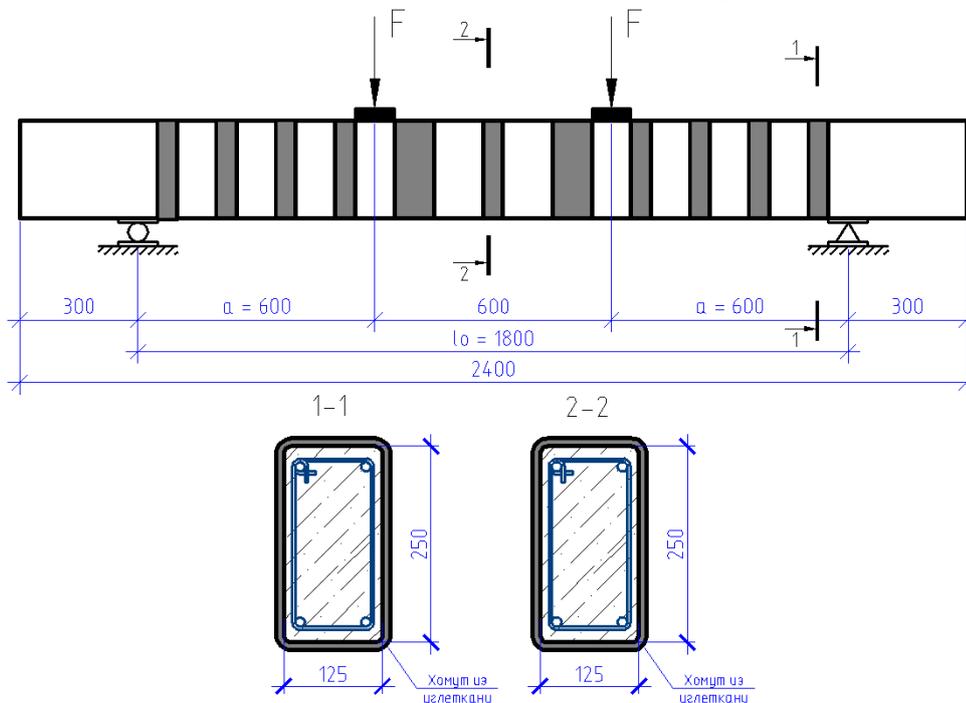


Рис. 4 – Вариант балки, дополнительно усиленной конструктивной поперечной арматурой в зоне чистого изгиба (Авторская разработка)

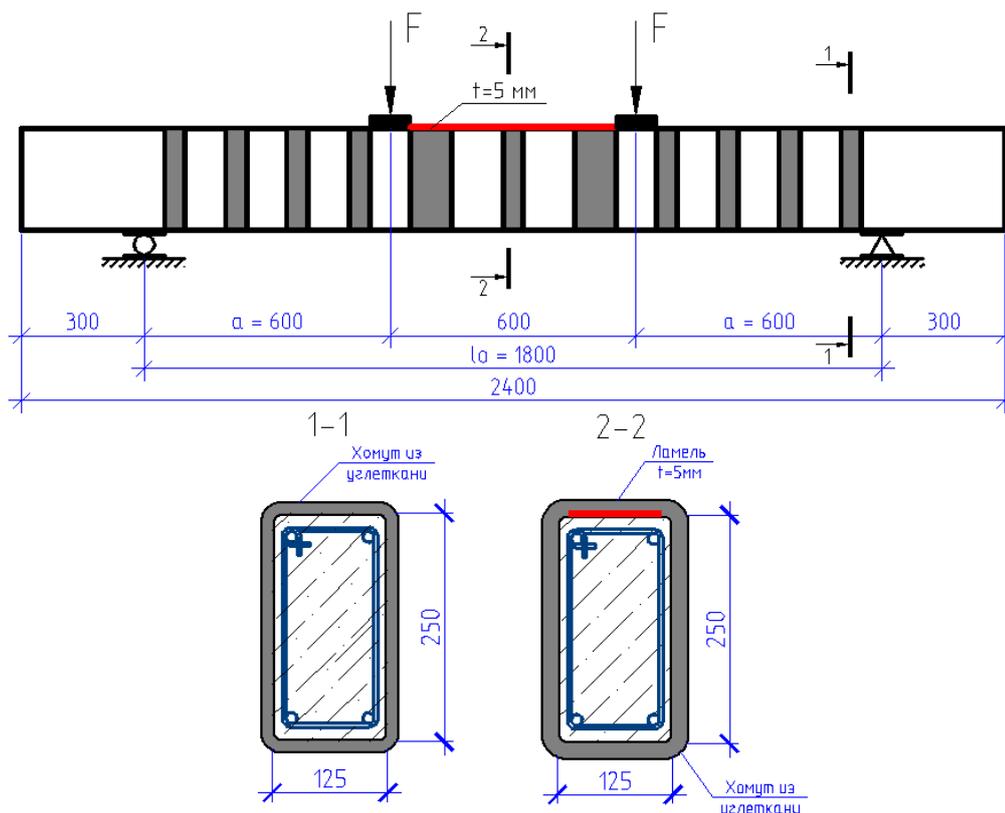


Рис. 5 – Варианты продольного усиления одиночной и двойной арматурой, установленной в сжатой и растянутой зонах (Авторская разработка)

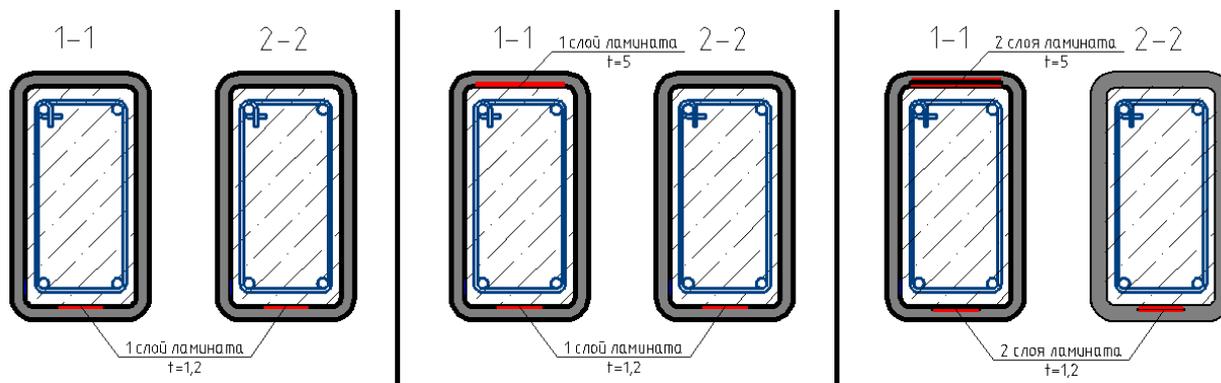


Рис. 6 – Варианты поперечного сечения балок, усиленных одиночной и двойной арматурой в растянутой и сжатой зонах (Авторская разработка)

На втором этапе при разных значениях осевого эксцентриситета e_0 испытываются сжатые элементы сечением 250x125(h)мм, длиной 1200 мм с гибкостью $\lambda_h = 10$, изготовленные из тяжелого бетона с проектным классом В25. Армирование и характеристики материалов приняты такими же, как и для изгибаемых образцов первого этапа испытания. Варианты усиления сжатых элементов разномодульным углепластиком приведены на рисунке 7.

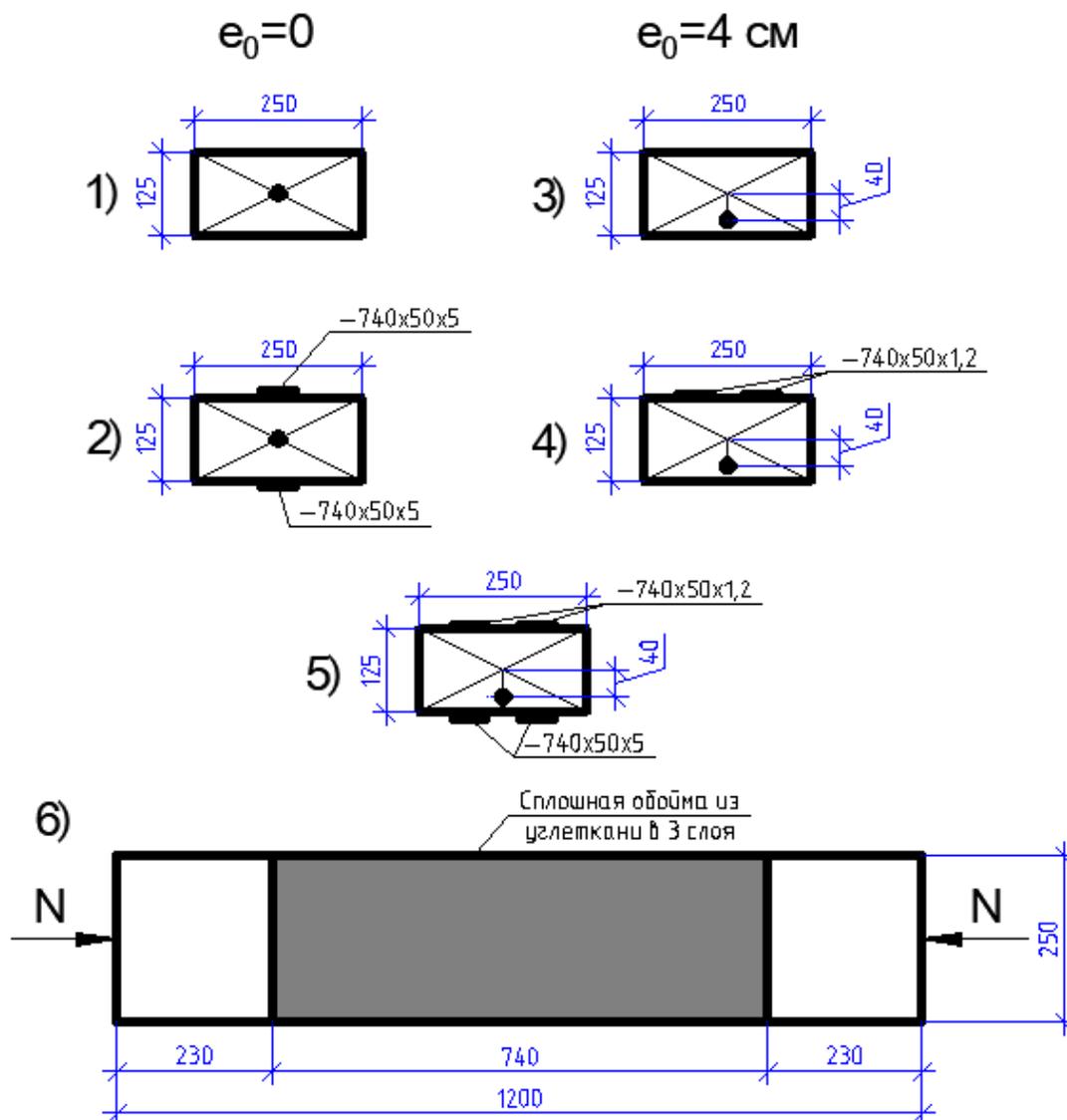


Рис. 7 – Варианты усиления сжатых элементов гибкостью $\lambda_h = 10$ разномодульным углепластиком со стороны сжатой и растянутой зон при разных значениях эксцентриситета приложенной нагрузки e_0 .

- 1 - Эталонный образец при испытании с эксцентриситетом $e_0=0$;
- 2 – Образец усиленный с двух сторон ламелью $t=5$ мм, $e_0=0$;
- 3 - Эталонный образец при испытании с эксцентриситетом $e_0=4$ см;
- 4 – Образец усиленный с растянутой стороны двумя ламелями $t=1,2$ мм
- 5 – Образец усиленный с сжатой стороны двумя ламелями $t=5$ мм, с растянутой стороны – двумя ламелями $t=1,2$ мм, $e_0=4$ см;
- 6 – Образец, усиленный сплошной обоймой из углеткани в 3 слоя (Авторская разработка)

На настоящий момент испытаны первые опытные образцы и идет процесс их обработки. Полученные результаты подтвердили возможность ис-

пользования двойного разномодульного для сжатой и растянутой зон композитного усиления, т.к. показали значительный прирост несущей способности. Подробно результаты испытаний будут опубликованы в следующей статье.

Литература

1. Литвинов И.М. Инструкция по усилению и восстановлению железобетонных конструкций методом И. М. Литвинова // Харьков: Харьк. обл. полигр. ф-ка, 1948, 39 с.
2. Мальганов А.И., Плевков В.С., Полищук А.И. Восстановление и усиление строительных конструкций аварийных и реконструируемых зданий // Томск, Атлас схем и чертежей. 1990. 316 с.
3. Шилин А.А., Пшеничный В.А., Картузов Д.М. Внешнее армирование железобетонных конструкций композитными материалами // М.: ОАО «Издательство Стройиздат». 2007. 184 с.
4. Устинов Б.В., Устинов В.П. Исследование физико-механических характеристик композитных материалов (КПМ) // Известия вузов. Строительство. 2009. № 11-12. С.118-125.
5. Польской П.П., Маилян Д.Р. Влияние стального и композитного армирования на ширину раскрытия нормальных трещин // Инженерный вестник Дона, 2013, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1675.
6. Чернявский В. Л., Хаюгин Ю.Г., Аксельрод Е.З., Клевцов В.А., Фаткуллин Н.В. Руководство по усилению железобетонных конструкций композитными материалами // ООО «ИнтерАква. 2006. 48с.
7. 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, №2, 1997, pp. 63-70.

8. 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.
9. Zhang Ai-hui, Jin Wei-liang, Li Gui-bing. Behavior of preloaded RC beams strengthened with CFRP laminates // *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*. 2006. Vol. 7. №3. pp. 436-444 URL: [link](http://link.springer.com/article/10.1631/jzus.2006.A0436). Springer.com/article/10.1631/jzus.2006.A0436.
10. Польской П.П., Блягоз А.М., Умаров Р.Г., Арустамян К.А. Влияние различных факторов на прочность наклонных сечений балок, усиленных двухсторонними композитными хомутами // *Инженерный вестник Дона*. 2021. №10. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2021/7242.
11. Костенко А.Н. Прочность и деформативность центрально и внецентренно сжатых кирпичных и железобетонных колонн, усиленных углеродным и стекловолокном Автореферат. дисс. канд. техн. Наук. Москва. 2010. 26с.
12. Умаров А.Г., Меретуков З.А., Умаров Р.Г. К вопросу внедрения современных материалов и технологий в строительстве // *Инженерный вестник Дона*. 2021. №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2021/6833.

References

1. Litvinov I.M. Instrukcija po usileniju i vosstanovleniju zhelezobetonnyh konstrukcij metodom I. M. Litvinova [Instructions for the strengthening and restoration of reinforced concrete structures by the method of I. M. Litvinov]. Har'kov: Har'k. obl. poligr. f-ka, 1948, 39 p.
2. Mal'ganov A.I., Plevkov V.S., Polishhuk A.I. Vosstanovlenie i usilenie stroitel'nyh konstrukcij avarijnyh i rekonstruiruemyh zdaniy. Tomsk, Atlas shem i chertezhej. [Restoration and strengthening of building structures of emergency and reconstructed buildings. Tomsk, Atlas of diagrams and drawings]. 1990. 316p.

3. Shilin A.A., Pshenichnyj V.A., Kartuzov D.M. M.: OAO «Izdatel'stvo Strojizdat». 2007. 184p.
4. Ustinov B.V., Ustinov V.P. Izvestija vuzov. Stroitel'stvo. 2009. № 11-12. PP.118-125.
5. Pol'skoy P.P., Mailyan D.R. Inzhenernyj vestnik Dona, 2013, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1675.
6. Chernyavsky V.L., Khayugin Yu.G., Axelrod E.Z., Klevtsov V.A., Fatkullin N.V. Rukovodstvo po usileniju zhelezobetonnyh konstrukcij kompozitnymi materialami [Composite Reinforcement Guide for Reinforced Concrete Structures]. OOO «InterAkva. 2006. 48 p.
7. Arduini, M. and Nanni, A. Journal of Composites for Construction. U.S.A. Vol.1, № 2, 1997, pp. 63-70.
8. Shehata I.A.E.M., Carneiro L.A.V. and Shehata L.C.D. Materials and Structures, Vol. 35, January-February 2002, pp. 50 - 58.
9. Zhang Ai-hui, Jin Wei-liang, Li Gui-bing. Journal of Zhejiang University-SCIENCE A. 2006. Vol. 7. №3. pp. 436-444. URL: link.Springer.com/article/10.1631/jzus.2006.A0436.
10. Pol'skoy P.P., Blagoz A.M., Umarov R.G., Arustamyan K.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2021, №10. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2021/7242.
11. Kostenko A.N. Prochnost' i deformativnost' central'no i vnecentrenno szhatyh kirpichnyh i zhelezobetonnyh kolonn, usilennyh ugle i steklovoloknom [Strength and deformability of centrally and eccentrically compressed brick and reinforced concrete columns reinforced with carbon and fiberglass] Avtoreferat. diss. kand. tehn. Nauk, Moskva, 2010. 26 p.
12. Umarov A.G., Meretukov Z.A., Umarov R.G. Inzhenernyj vestnik Dona, 2021, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2021/6833.