

Оценка эффективности работы системы «усиленная конструкция- внешнее армирование-анкер» аналитическим и численным методом

С.А. Матвеюшкин, П.А. Воронков

*Национальный исследовательский Московский государственный строительный
Университет, Москва*

Аннотация: Проведено сравнительное исследование трех вариантов армирования железобетонной балки: без усиления, с усилением углеродной лентой как по всей длине пролёта, так и с частичным усилением пролётной зоны с торцевой механической анкерровкой углеродными жгутами. Выполнено численное моделирование, построены эпюры изгибающих моментов и распределения усилий, оценены коэффициенты запаса прочности строительной системы. Обоснована эффективность схем с точки зрения прочности, с учётом технологичности и материалоемкости. Показано, что применение механической анкерровки жгутами повышает надёжность системы при снижении расхода материалов.

Ключевые слова: Анкерный жгут, углеродное волокно, несущая способность, усиление конструкций, композитный материал.

Введение

Современное строительство, реконструкция и усиление зданий и сооружений предъявляют повышенные требования к эффективным и экономичным методам усиления несущих конструкций. Используемые в конструкциях железобетонные изгибаемые элементы под действием эксплуатационных нагрузок подвержены образованию дефектов сплошности, трещин и выколов, особенно в пролётной зоне.

Одним из перспективных решений, направленных на исключение образования дефектов, является усиление железобетонных конструкций углеродными лентами и холстами (далее углеволокно) [1]. Углеволокно относится к классу полимерных материалов, обладающих высокой прочностью на растяжение, долговечностью и малым удельным весом в составе конструкций.

Несмотря на высокие прочностные характеристики используемых конструкционных материалов, эффективность усиления внешним

армированием углеволокном напрямую зависит от надёжности анкеровки усиливающего элемента к телу железобетонной конструкции [2].

Традиционные методы усиления углеволокном предполагают оклейку всей растянутой зоны изгибаемой железобетонной балки [3]. Данный метод предполагает использование большого количества углеволокна, что не всегда обосновано в части материалоемкости.

Авторами данной статьи предлагается альтернативный подход – локальное усиление пролета железобетонной балки с анкеровкой углехолста жгутами, с условием, что усилия в приопорных зонах воспринимаются поперечной арматурой. Задача данной работы — сравнить три конструктивных варианта и выявить наиболее рациональный подход к усилению железобетонной изгибаемой балки на примере численного моделирования.

Результаты и обсуждения

Моделирование конструкций выполнено в расчётном программном комплексе ЛИРА-САПР, балки описаны как стержневые элементы с жёсткими вставками для имитации работы углеволокна.

Рассмотрены три варианта усиления железобетонной балки углеволокном: без усиления, усиление по всей длине и локальное усиление (рис. 1). При проведении расчетов сравнивались усилия, возникающих в конструкции, и определение коэффициентов запаса прочности для сравнения рассматриваемых схем.

Для моделирования использована балка из тяжелого бетона класса В10 с поперечным сечением 100×200 мм. Расчетная длина пролета – 1000 мм, тип опирания балки — шарнирный.

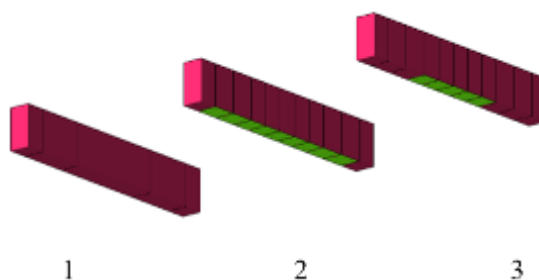


Рис. 1. – Расчетная модель железобетонной балки: 1 – железобетонная балка без усиления; 2 – железобетонная балка, усиленная в растянутой зоне углеволоконным холстом по всей расчетной длине; 3 – железобетонная балка, усиленная углеволокном в середине пролета растянутой зоны (условие закрепления по торцам холста анкерными жгутами)

Балка армирована стержнями диаметром 6 мм из арматуры класса А240 (рис.2-3). Нижнее рабочее армирование выполнено в виде 3 стержней шагом 35 мм, нижний защитный слой бетона — 17 мм. Верхнее армирование — в виде 2 стержней, служит для поддержания поперечной арматуры. Поперечное армирование — в виде 4 стержней с шагом 75 мм и 100 мм.

Углеродная лента усиления для 2 и 3 варианта балок замоделирована стержнями с соответствующими размерами и техническими характеристиками. Сопряжение ленты к балке было условно принято жесткими вставками.

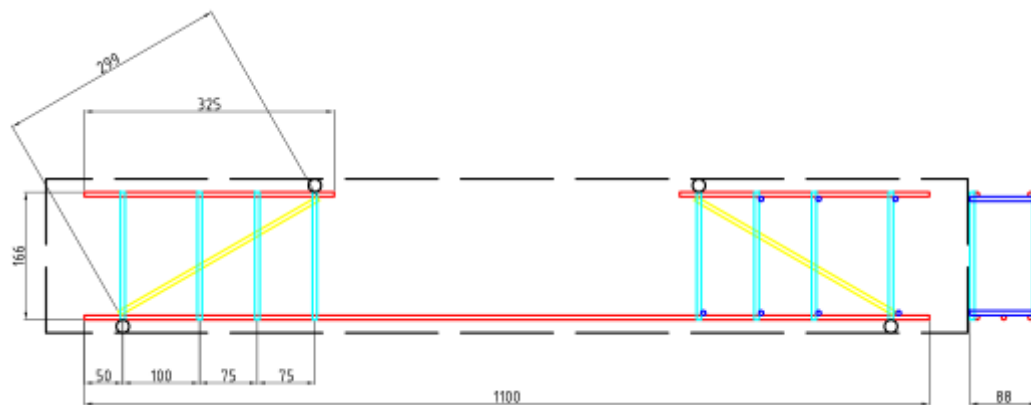


Рис. 2. – Схема армирования смоделированных железобетонных балок

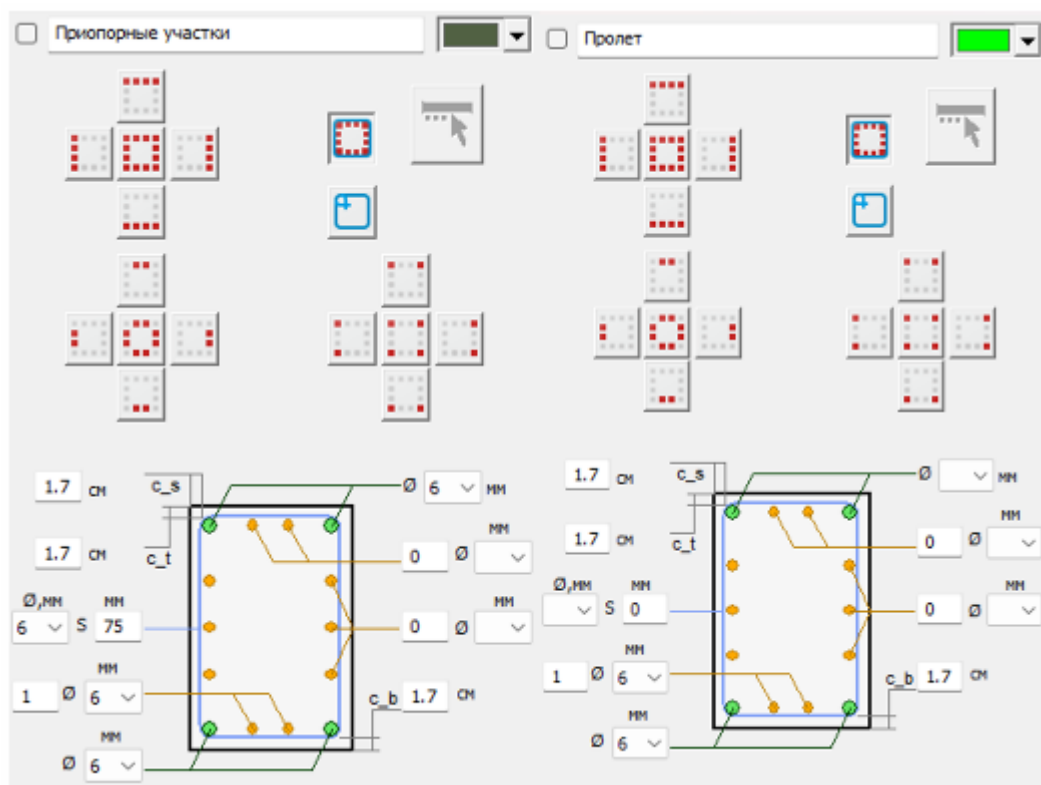


Рис. 3. – Окно задания параметров армирования программного комплекса

Для расчета была принята углеродная однонаправленная лента марки CarbonWrap Tape. Характеристики данной ленты представлены в табл. 1.

Таблица 1.

Характеристики используемой углеволоконной ленты [4]

Марка ленты	Технические характеристики						
	Тип волокна	Вид плетения	Направление волокон	Поверхностная плотность, г/м ²	Модуль упругости, ГПа (волокон а)	Прочность на растяжение, ГПа (волокон а)	Расчетная толщина ленты, мм
Carbon Wrap Tape 230/150	Высокопрочные углеродные нити	Плотное	0°	230	245	4,9	0,128

Анализ несущей способности железобетонной балки без усиления согласно СП 63.13330.2018 показал, что предельный момент M_{ult} , составляет 0,30 т·м.

$$R_s A_s = 2141 \cdot 0.85 = 1.8 \cdot 10^3 > R_{sc} A'_s = 2141 \cdot 0 = 0$$

$$x = \frac{R_s A_s - R_{sc} A'_s}{R_b b} = \frac{2141 \cdot 0.85 - 2141 \cdot 0}{61.2 \cdot 10.0} = 2.97 \text{ см}$$

$$\varepsilon = \frac{x}{h_0} = \frac{2.97}{18.0} = 0.165, \varepsilon_{s,el} = \frac{R_s}{E_s} = \frac{2141}{2038736} = 0.001, \varepsilon_{b2} = 0.00350$$

$$\varepsilon = 0.165 \leq \varepsilon_R = \frac{0.8}{1 + \frac{\varepsilon_{s,el}}{\varepsilon_{b2}}} = \frac{0.8}{1 + \frac{0.0010}{0.00350}} = 0.615$$

$$\begin{aligned} M_{ult} &= R_b b x (h_0 - 0.5x) + R_{sc} A'_s (h_0 - a') = \\ &= 61.2 \cdot 10.0 \cdot 2.97 \cdot (18.0 - 0.5 \cdot 2.97) + 2141 \cdot 0 \cdot (18.0 - 0) = \\ &= 0.30 \cdot 10^5 \text{ кг} \cdot \text{см} \end{aligned}$$

По результатам определения предельного момента была выявлена разрушающая нагрузка.

На балки были заданы нагрузки, включающие собственный вес конструкции и внешнюю сосредоточенную нагрузку. Для сравнения вариантов усиления была приложена расчетная нагрузка, при которой железобетонная балка без усиления будет разрушена. Нагрузка составила 1,13 т (рис. 4).

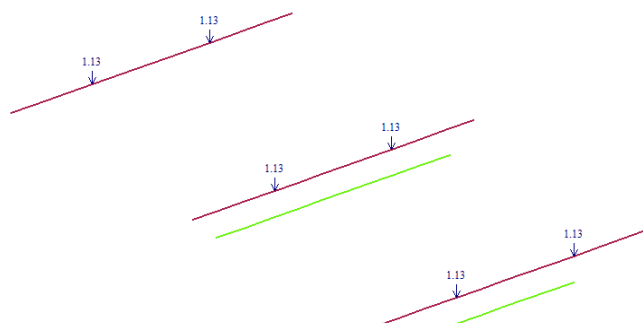


Рис. 4. - Прикладываемая внешняя сосредоточенная нагрузки

При моделировании в программном комплексе расчетный момент железобетонной балки без усиления превысил это значение (рис.5), что свидетельствует о достижении предельного состояния и разрушении конструкции.

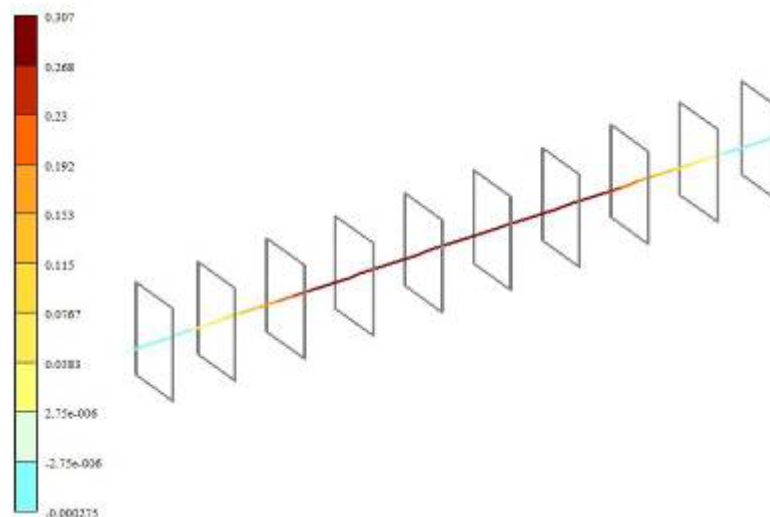


Рис. 5. - Эпюра моментов в балке без усиления

Применение усиления углеволокном растянутой зоны по всей расчетной длине (Вариант 2) позволило снизить расчетный момент M до 0,28 т·м (рис. 6), что ниже значения предельного момента M_{ult} и балка не разрушится.

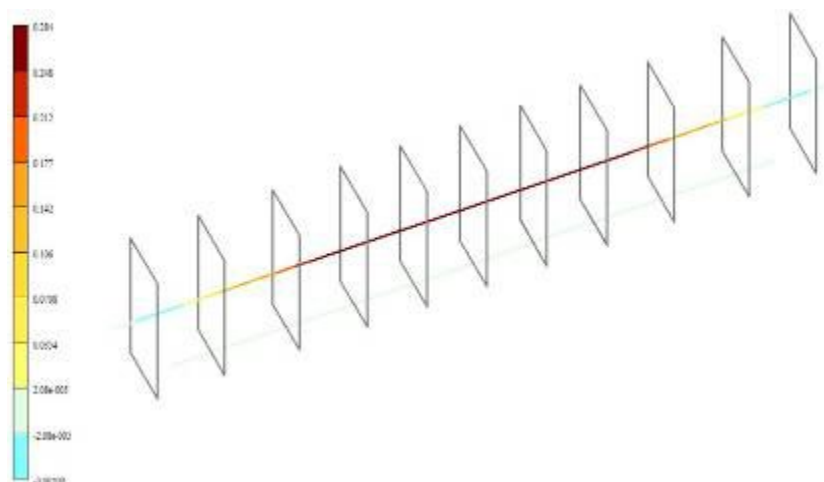


Рис. 6. - Эпюра моментов в балке, усиленной по всей расчетной длине углеродной лентой

3 вариант моделирования усиленной балки (сокращение длины углеволокна с условием использования анкерных углеродных жгутов в торцевых участках) показал сопоставимую с 2 вариантом эффективность (рис.7). Изменения моментов не значительны и не превышают предельный расчетный момент M_{ult} .

1.РСНН(СПБ 20.13330.2011/2016_1)
Моменты M_{xy} (расчетные значения)
Единицы измерения: $1^{\circ}m$

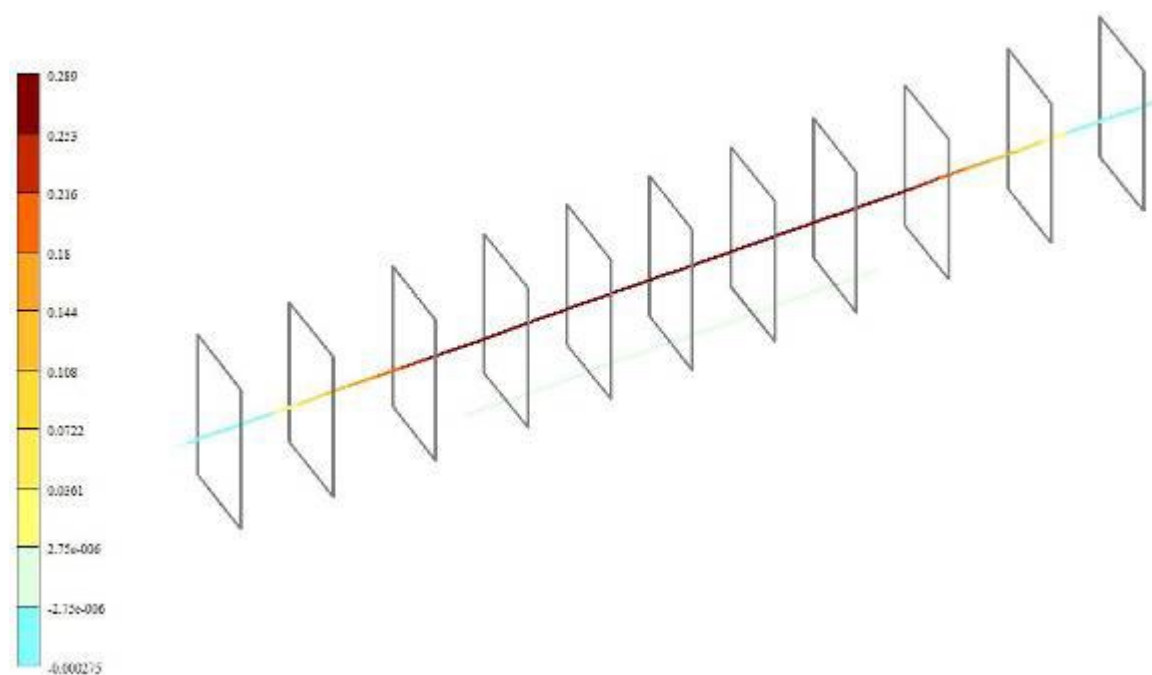


Рис. 7. - Эпюра моментов в балке, усиленной углеродной лентой в середине пролета

Далее три варианта конструирования балок проанализированы по оценке запаса армирования [6,7].

Вариант 1 (без усиления) показал, что под воздействием заданной внешней нагрузки в растянутой зоне сечения конструкции возникает значительное превышение допустимых напряжений в рабочей арматуре (рис. 8). Это свидетельствует о недостаточной несущей способности элемента в текущей конфигурации [8].

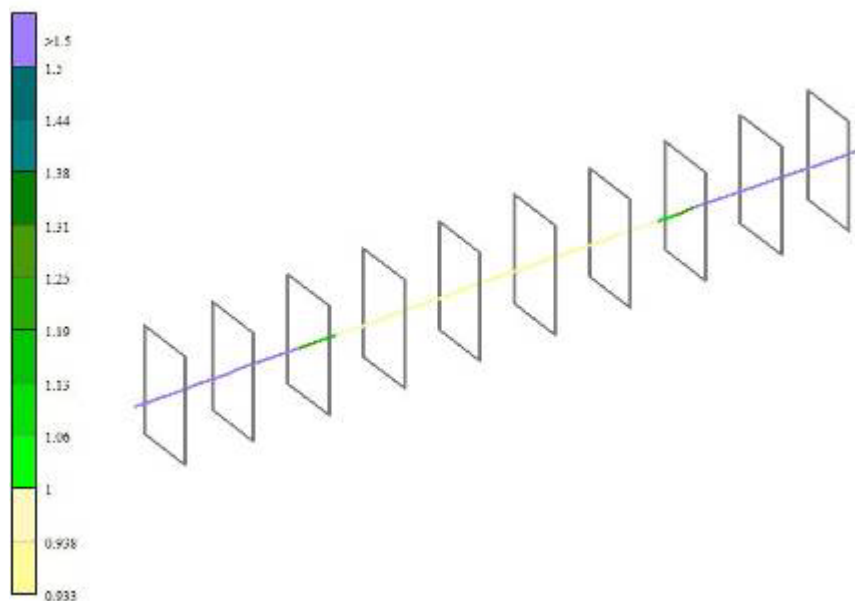


Рис. 8. – Коэффициент запаса армирования балки без усиления

Вариант 2 (рис.9) демонстрирует, что применение композитного усиления в виде углеродной ленты приводит к значительному перераспределению напряжений по всей длине балки.

Расчет по РСН ГИЛ-3 (СП 83.13330.2012/2018)
Основной расчет

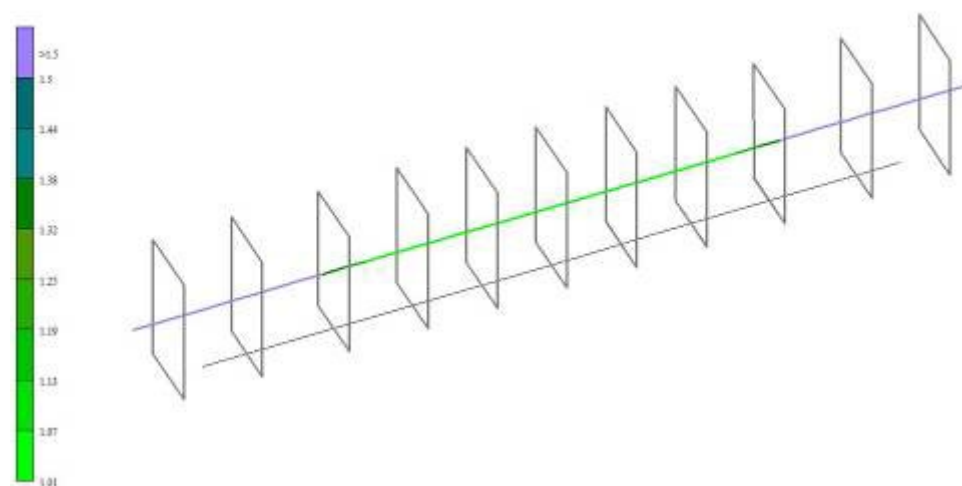


Рис. 9. – Коэффициент запаса армирования балки с усилением по всей расчетной длине

По результатам рассмотрения расчетной модели Варианта 3 (рис. 10) установлено, что коэффициенты запаса по прочности близки к Варианту 2.

Расчет по РСН/СПБ.1 (СПБ.1.33330.2012/2018)
Основной расчет

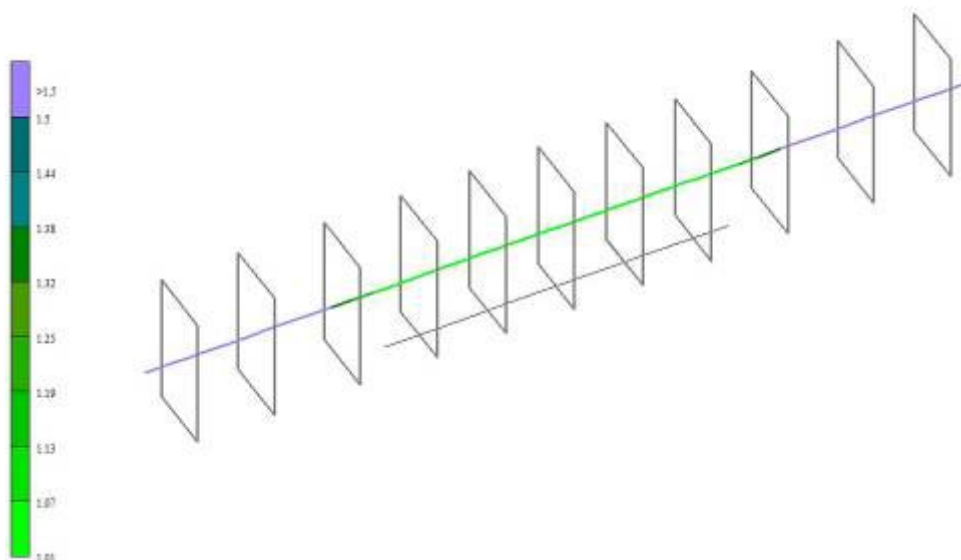


Рис. 10. – Коэффициент запаса армирования балки с усилением в середине пролета

Для сравнения результатов проведенного моделирования приведена диаграмма (рис. 11).

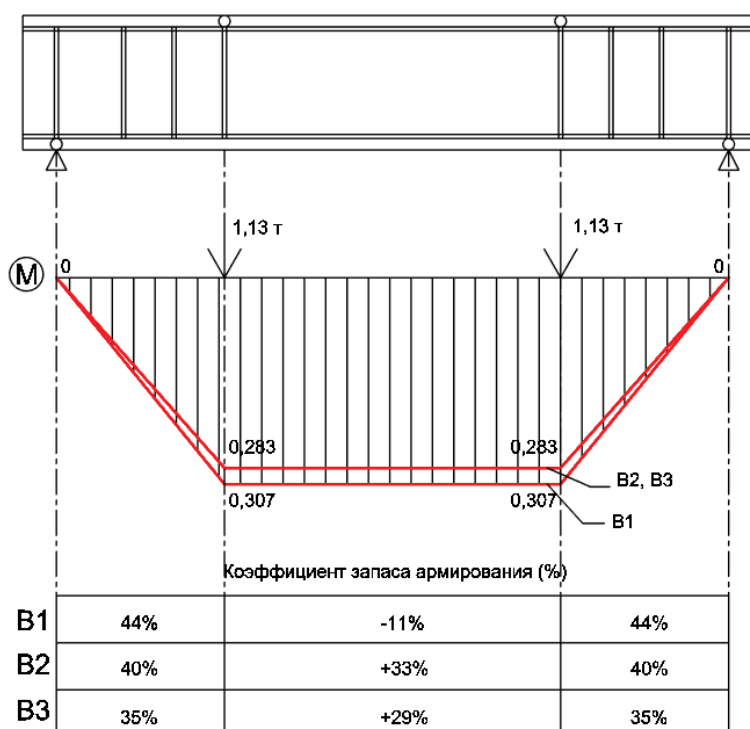


Рис. 11. – Схема сравнения результатов программного моделирования

Таким образом, проведённое моделирование и анализ показали перспективность использования локального усиления железобетонных балок с анкерной фиксацией углеродной ленты в зоне, где поперечное армирование не может воспринять усилия (зона отсутствия поперечного армирования).

Вторым важным фактором является надёжность сцепления композитного материала с бетоном, включая его анкеровку [9,10], поскольку отрыв усиливающего элемента от поверхности конструкции нивелирует вышеупомянутые преимущества, а также может привести к преждевременному разрушению [11]. Далее сравниваются сцепления композитного материала с бетоном балки клеевым соединением и механической анкеровкой углеродными жгутами.

Проверка сцепления композитного материала с бетоном балки выполнена согласно СП 63.13330.2018 и СТО 38276489.001-2017.

Расчетные значения сопротивления растяжению композитного материала:

$$R_f = \frac{\gamma_{f1}}{\gamma_f} \cdot R_{f,n} = \frac{0,8}{1,2} \cdot 3600 = 2400 \text{ МПа},$$

где коэффициент условий работы композитного материала:

$$\gamma_{f1} = 0,8$$

коэффициент надежности по материалу:

$$\gamma_f = 1,2$$

Расчетное значение относительных деформаций:

$$\varepsilon_f = \frac{R_f}{E_f} = 2400 / 245000 = 0,0098$$

Проверка сцепления композитного материала с бетоном:

$$\varepsilon_{f,u} = 0,41 \cdot \sqrt{\frac{R_b}{n \cdot E_f \cdot t_f}} \leq 0,9 \cdot \varepsilon_f$$

$$0,41 \cdot \sqrt{\frac{6}{1 \cdot 245000 \cdot 0,128}} = 0,0057 \leq 0,9 \cdot \varepsilon_f = 0,9 \cdot 0,0098 = 0,0088$$

Условие соблюдается.

В рассматриваемой конструкции используется клей CarbonWrap Resin 230+. Согласно паспорту производителя, прочность сцепления составляет 2,5 МПа. Предельно допустимая сдвигающая нагрузка для клеевого соединения длиной анкеровки 0,3м, шириной 0,1м:

$$Q_{ult} = 2,5 \cdot 0,3 \cdot 0,1 = 7,5 \text{ кН}$$

Для анкеровки системы выбран жгут марки CarbonWrap Anchor D12.

Произведен расчет на действие поперечных сил.

Нормативное сопротивление растяжению анкера составляет $3,7 \cdot 10^3$ МПа (по паспорту производителя).

Модуль упругости анкера $E_f = 230000$ Мпа (по паспорту производителя).

$\varepsilon_{f,ult}$ - значение предельно допустимых относительных деформаций, определяется согласно указаниям п. 5.2.5 СП 164.1325800:

$$\varepsilon_{f,ult} = \frac{R_{fn} \cdot \gamma_{f1}}{E_f \cdot \gamma_f} = \frac{3,7 \cdot 10^3 \cdot 0,8}{230000 \cdot 1,2} = 0,0107$$

γ_{f2} - коэффициент условий работы полимерного композита, учитывающий его сцепление с бетоном

$$\gamma_{f2} = \frac{1}{2,5 \cdot \varepsilon_{f,ult}} \sqrt{\frac{R_b}{E_f \cdot d_{an}}} = \frac{1}{2,5 \cdot 0,0107} \sqrt{\frac{6}{230000 \cdot 12}} = 0,055 < 0,9$$

R_{an} - расчетное сопротивление анкерного жгута растяжению:

$$R_{an} = R_{fn} \cdot \gamma f_1 \cdot \frac{\gamma f_2}{\gamma f} = 3,7 \cdot 10^3 \cdot 0,8 \cdot 0,055 / 1,2 = 136 \text{ Мпа}$$

Предельно допустимая сдвигающая нагрузка для анкерного соединения:

$$Q_{ult} = R_{an} \cdot A_{an} \cdot k_c = 136 \cdot 1,13 \cdot 1 = 13,6 \text{ кН, где}$$

A_{an} - площадь поперечного сечения анкерного жгута;

$k_c = 1$ – коэффициент, зависящий от диаметра анкерного жгута;

Таким образом предел прочности на сдвиг по материалу анкерного соединения выше, чем клеевого соединения.

Заключительная часть

В данной работе рассматривалась железобетонная балка с пролетом 1 м и прямоугольным сечением 100×200 мм, усиление которой выполнялось двумя различными способами с использованием углеродной ленты. Первый вариант (без усиления) служит в качестве контрольного, демонстрируя разрушение конструкции при заданной нагрузке. Основной акцент в анализе сделан на сравнении второго и третьего вариантов усиления.

Во втором варианте усиление осуществлялось наклейкой углеродной ленты по всей длине растянутой зоны пролета.

В третьем варианте применялось частичное усиление – лента располагалась только в средней части пролета, в зоне, где отсутствует поперечное армирование, а закрепление ленты выполнялось с помощью анкерных жгутов по торцам. Результаты численного моделирования показали, что значения изгибающих моментов и коэффициентов запаса армирования для этих двух схем усиления в целом сопоставимы: существенных отличий в работе конструкции не выявлено. Тем не менее, третий вариант потенциально оказывается более рациональным за счёт сокращения длины применяемого композитного материала.

Ключевое преимущество третьей схемы заключается в использовании механической анкеровки углеродными жгутами, что позволяет достичь более надёжного сцепления с бетоном. Согласно проведённым расчётам, предельно допустимая сдвигающая нагрузка в случае клеевого соединения составляет 7,5 МПа, тогда как при анкерной фиксации жгутами этот показатель почти в два раза выше. Это позволяет предположить, что третий вариант может служить менее материалоемкой альтернативой полной оклейке растянутой зоны балки при сохранении конструктивной прочности.

Приведённые результаты основаны на численном моделировании и расчётах. Для окончательной оценки эффективности предложенной технологии необходимы экспериментальные исследования, которые и предлагают авторы как следующий этап работы.

Литература

1. Матвеюшкин С.А., Воронков П.А., Мессауди М.Ф. Анкерные жгуты в составе системы внешнего армирования железобетонных конструкций композитными материалами // Инженерный вестник Дона. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2025/9818
2. Соловьёва А.И., Георгиев С.В., Меретуков З.А. Углеродное волокно - как хороший материал для усиления железобетонных конструкций // Инженерный вестник Дона. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n9y2021/7231.
3. Маилян Д.Р., Михуб Ахмад, Польской П.П. Вопросы исследования изгибаемых железобетонных элементов, усиленных различными видами композитных материалов // Инженерный вестник Дона. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1674
4. АО «Препрег-СКМ». Инструкция по подбору анкерных жгутов Fibarm Anchor, С. 3-12.
5. Симаков О.А., Зенин С.А., Кудинов О.В., Осипов П.В. Работа на вырыв анкерov на основе углеродных волокон при устройстве систем внешнего

армирования // Промышленное и гражданское строительство. 2019. № 3. С. 29-34. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.03.29-34.

6. Симаков О.А., Зенин С.А., Кудинов О.В., Осипов П.В. Работа на срез анкеров на основе углеродных волокон при внешнем армировании // Промышленное и гражданское строительство. 2019. № 9. С. 59-64. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.09.59-64.

7. Piyong, Y., Silva, P. F., & Nanni, A. (2003). Flexural strengthening of concrete slabs by a three-stage prestressing FRP system enhanced with the presence of gfrp anchor spikes. Proceedings of the International Conference Composites in Construction (CCC2003), C. 239–244.

8. Kim, S. J., & Smith, S. T. (2010). Pullout strength models for FRP anchors in uncracked concrete. Journal of Composites for Construction, ASCE, 14(4), p. 406–414.

9. Zhang, H. W., Smith, S. T., & Kim, S. J. (2010). Optimisation of carbon and glass FRP anchor design. Construction and Building Materials, 32, p. 1–12.

10. Zhang, H. W., & Smith, S. T. (2012). FRP-to-concrete joint assemblages anchored with multiple FRP anchors. Composite Structures, 94(2), p. 403–414.

11. Цапина О.Е., Шеховцов А. С. Способы анкеровки внешнего армирования при усилении железобетонных конструкций // Молодой ученый. - 2024. - № 20 (519). - С. 87-91.

References

1. Matveyushkin S.A., Voronkov P.A., Messaudi M.F. Inzhenernyj vestnik Dona. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2025/9818

2. Solov'yova A.I., Georgiev S.V., Meretukov Z.A. Inzhenernyj vestnik Dona. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n9y2021/7231.

3. Mailyan D.R., Mihub Ahmad, Pol'skoj P.P. Inzhenernyj vestnik Dona. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1674.

4. АО «Prepreg-SKM». Instruktsiya po podboru ankernykh zhgutov Fibarm Anchor, pp. 3-12.
5. Simakov O.A., Zenin S.A., Kudinov O.V., Osipov P.V. Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitelstvo. 2019. № 3. pp. 29-34. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.03.29-34.
6. Simakov O.A., Zenin S.A., Kudinov O.V., Osipov P.V. Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitelstvo. 2019. № 9. pp. 59-64. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.09.59-64.
7. Piyong, Y., Silva, P. F., & Nanni, A. (2003). Proceedings of the International Conference Composites in Construction (CCC2003), pp. 239–244.
8. Kim, S. J., & Smith, S. T. (2010). Journal of Composites for Construction, ASCE, 14(4), pp. 406–414.
9. Zhang, H. W., Smith, S. T., & Kim, S. J. (2010). Construction and Building Materials, 32, pp. 1–12.
10. Zhang, H. W., & Smith, S. T. (2012). Composite Structures, 94(2), pp. 403–414.
11. Tsapina O.E., Shekhovtsov A. S. Molodoy uchenyj. 2024. № 20 (519). pp. 87-91.

Дата поступления: 11.06.2025

Дата публикации: 25.07.2025