

## Применение систем внешнего армирования на основе углеродных волокон для усиления железобетонных конструкций зданий и сооружений

*О.В. Кабанцев, О.А. Симаков*

*Московский Государственный Строительный Университет, г. Москва*

**Аннотация:** В статье приведен анализ состояния вопроса нормирования в части выполнения расчетного обоснования и конструирования усиления железобетонных конструкций с применением систем внешнего армирования на основе углеродных волокон. Рассмотрены нормативные документы РФ и зарубежные, проведен анализ применения внешнего армирования на основе композитных материалов для различных по характеру работы конструкций, выделены недостатки имеющихся методик расчета и конструирования. В заключении приведены рекомендации по соответствующему совершенствованию методик расчета и конструирования.

**Ключевые слова:** внешнее армирование, углеродное волокно, усиление, восстановление.

### Введение

Вопрос необходимости проведения работ по усилению железобетонных конструкций не теряет свою актуальность с момента начала использования железобетона в конструкциях зданий и сооружений и продиктован целым рядом факторов, среди которых можно выделить [1-3]:

- ошибки проектирования (связанные как с ошибками в рамках вычислений, так и ошибки интерпретации результатов расчета и конструирования). Необходимо отметить значительное увеличение в последнее время количества объектов с ошибками, допущенными в рамках разработки проектной документации, в том числе, явные недоработки проектной документации, бездумно далее транслируемые в рабочую документацию;

- ошибки производства работ (ранний демонтаж опалубки; нарушения согласованной конструктором технологии производства работ, расположения деформационных швов; не проектное расположение арматуры – увеличение толщины защитного слоя, занижение класса бетона);

- изменение функционального назначения здания с изменением проектных нагрузок;

- разрушение конструкций здания

Среди вариантов усиления конструкций наиболее перспективными в части надежности, технологичности и итогового результата (подразумевается в т.ч. минимальные изменения архитектурных решений зданий за счет введения элементов усиления) можно выделить:

- усиление железобетонных конструкций путем устройства дополнительных конструкций (пилонов, балок, стен) для существующих конструкций, также набетонки (аппликаций одно- и двухсторонних), выполняемых методом торкретирования. Торкретирование, не смотря на более вековое применение, остается перспективным методом усиления благодаря постоянному развитию как оборудования, так и материалов, существенно меняющих технологические и физико-механические характеристики итоговой конструкции;

- усиление железобетонных конструкций путем внешнего армирования.

В первую очередь при этом подразумевается системы внешнего армирования на основе композитных материалов, выполняемых на основе углеродных волокон. Данная методика имеет опыт применения более 50 лет и по аналогии с усилением торкрет-бетоном постоянно совершенствуется как в направлении повышения технологических, так и итоговых физико-механических характеристик конструкции. При этом по отношению к усилению торкрет-бетоном существенно развиваются, в том числе, и решения узлов усиления, на которые в настоящее время направлено одно из основных вниманий. Также по отношению к другим методам усиления экономическая эффективность значительно повышается (как за счет изменения норм проектирования, введение более обоснованных коэффициентов и методик расчета, приближающих результаты расчетов к

---

экспериментальным данным, а также снижения себестоимости проведения работ), что требует отдельного рассмотрения.

## **1. Применение внешнего армирования**

Основываясь на накопленный к настоящему моменту опыт, а также результаты лабораторных и наружных испытаний можно выделить следующие направления применения внешнего армирования при усилении железобетонных конструкций:

а) Усиление изгибаемых элементов:

а.1) нормальные сечения балок (одиночные сборные и монолитные балки, а также балки в составе монолитных балочных перекрытий);

а.2) нормальные сечения монолитных перекрытий (пролетные и опорные участки);

а.3) наклонные сечения балок (одиночные сборные и монолитные балки, а также балки в составе монолитных балочных перекрытий).

б) Усиление сжатых и внецентренно-сжатых стержневых систем (колонны и пилоны)

б.1) усиление нормальных сечений центрально сжатых, а также внецентренно сжатых (с малым эксцентриситетом) колонн и пилонов;

б.2) усиление нормальных сечений внецентренно сжатых колонн и пилонов с большим эксцентриситетом;

б.3) усиление наклонных сечений центрально и внецентренно сжатых колонн и пилонов.

в) Усиление сложных конструкций, узлов (узлы и конструкции со сложным НДС, в которых в явном виде сложно выделить/усилить растянутые зоны, с учетом работы внешнего армирования исключительно на растяжение).

### ***Расчет нормальных сечений изгибаемых элементов***

Рассматривая этапы развития методики расчета несущей способности нормальных сечений, необходимо отметить общую концепцию расчетов,

---

основанную на теории плоских сечений и равновесии сил/моментов сил [4-6] (рис. 1):

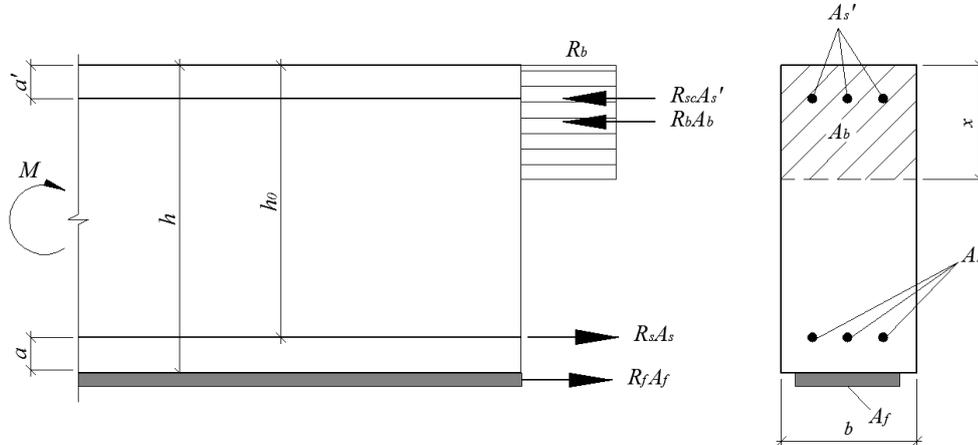


Рис. 1. Схема расчета несущей способности нормального сечения изгибаемого элемента с усилением внешним армированием

Предельный момент, воспринимаемый нормальным сечением:

$$M_{ult} = R_b \cdot b \cdot x \cdot (h_0 - 0,5x) + R_{sc} \cdot A_s' \cdot (h_0 - a') + R_f \cdot A_f \cdot a \quad (1)$$

Высота сжатой зоны бетона:

$$x = \frac{R_s \cdot A_s - R_{sc} \cdot A_s' + R_f \cdot A_f}{R_b \cdot b} \quad (2)$$

В рамках развития методики расчета можно выделить следующие этапы, связанные с ограничением расчетного значения прочности внешнего армирования, введенного в основную формулу:

- начальная методика:

$$R_f = E_f \varepsilon_{fe}$$

$$\varepsilon_{fe} = \varepsilon_{cu} \left( \frac{h - c}{c} \right) - \varepsilon_{bi} \leq k_m \varepsilon_{fu}$$

$$k_m = \begin{cases} \frac{1}{60\varepsilon_{fu}} \left(1 - \frac{nE_f t_f}{360000}\right) \leq 0,90 \text{ при } nE_f t_f \leq 180\,000 \\ \frac{1}{60\varepsilon_{fu}} \left(\frac{90000}{nE_f t_f}\right) \leq 0,90 \text{ при } nE_f t_f > 180\,000 \end{cases}$$

- дальнейшее развитие (включая действующую в настоящий момент методику):

$$R_f = \frac{\gamma_{f1} \cdot \gamma_{f2} \cdot R_{f,n}}{\gamma_f} \quad (3)$$

$$\gamma_{f2} = \frac{1}{2,5\varepsilon_{fu}} \sqrt{\frac{R_b}{nE_f t_f}} \leq 0,9 \quad (4)$$

Где основные переменные:

$R_b$  – расчетное сопротивление бетона сжатию;

$n, E_f, t_f$  - параметры внешнего армирования (количество слоев, модуль упругости, толщина слоя);

$\varepsilon_{fu}$  – предельные деформации внешнего армирования, вычисляемые на основе нормативного сопротивления растяжению внешнего армирования и модуля упругости  $E_f$ .

В целом, нормирование расчетных значений прочности внешнего армирования (3) связаны с ограничением предельных деформаций внешнего армирования, основанного на отсутствие разрушения итоговой конструкции по зоне контакта системы усиления и поверхности бетона (в данном случае через коэффициент (4)).

Результаты расчетов сопоставительных расчетов показывают удовлетворительную сходимость для характерных для гражданского строительства конструкций – балок и плит толщиной примерно до 1,5 м. При этом, например, для гидротехнических конструкций, отличающихся как

правило значительно большими сечениями, предложены несколько иные подходы [7, 8].

В общем, проводя анализ имеющихся методик расчета, можно выделить следующие проблемы нормирования:

- расчет длины анкеровки и учет анкеровки в целом (на данный момент предельные деформации внешнего армирования и соответственно расчетное сопротивление внешнего армирования ограничены по критериям разрушения контактной зоны и не учитывают анкерующие устройства);

- расчет по 2 группе предельных состояний либо не реализованы в комплексных методиках расчета, либо имеют многократный запас, как правило, сформированный некорректной методикой расчета (например, методика расчета реализованная в СП 164 является по сути несколько доработанной методикой для железобетонных конструкций с коэффициентом приведения внешнего армирования к жесткости бетона по аналогии со сталью).

***Усиление нормальных сечений монолитных перекрытий (как частный случай расчета нормальных сечений изгибаемых элементов)***

Особенностью работы статически неопределимых монолитных конструкций является, как правило, формирование изгибающих моментов в двух направлениях – см. рис.2 (приведены результаты расчетов изгибающих моментов во взаимно перпендикулярных направлениях для фрагмента плиты).

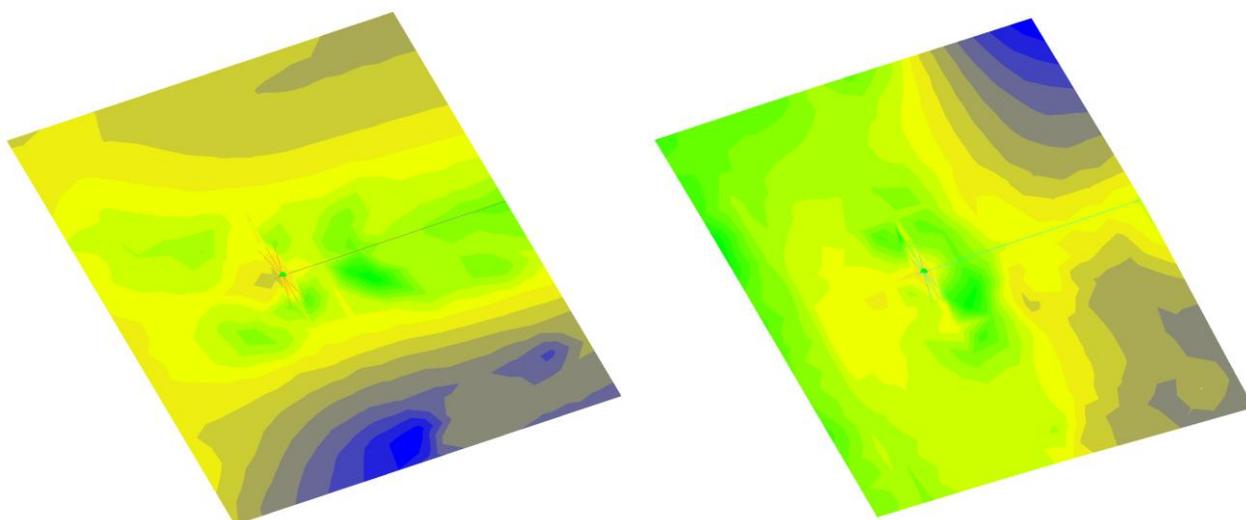


Рис. 2. Изополю изгибающих моментов в плите перекрытия в зоне расположения пилона во взаимно перпендикулярных направлениях

В этой связи при усилении внешним армированием на основе углеродных волокон для каждого из направлений внешнего армирования формируются усилия направленные перпендикулярно основному направлению волокон (рис. 3), что логически должно привести к снижению несущей способности внешнего армирования (в т.ч. контактной зоны) рассматриваемого направления.

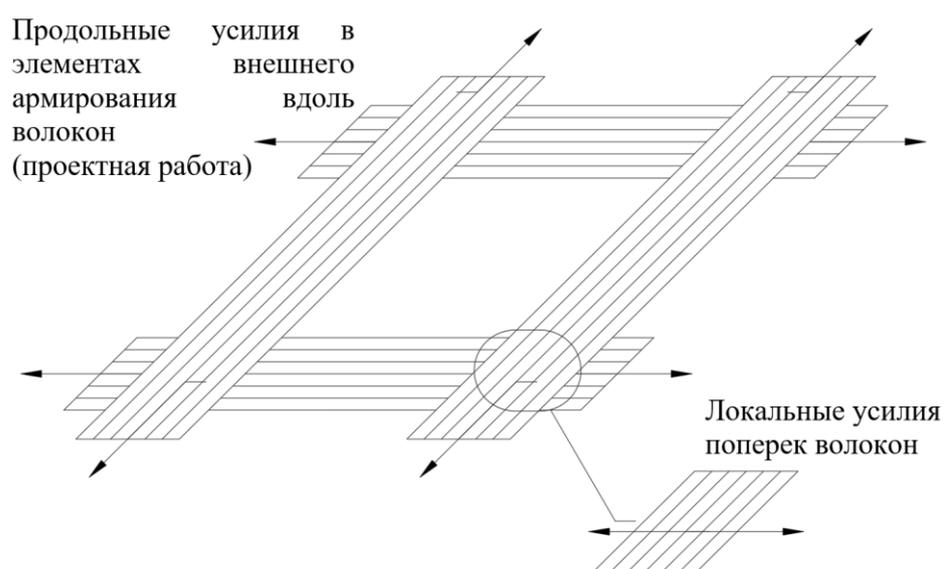


Рис. 3. Схема внутренних усилий в системе внешнего армирования  
Проблемы нормирования:

- практически отсутствует учет влияния расположения элементов во взаимно перпендикулярных направлениях

- вопросы анкеровки армирования детально не проработаны (решения по учету в качестве перпендикулярно расположенных лент теоретически и лабораторно не обосновано);

- расчет по 2 группе предельных состояний либо не реализованы в комплексных методиках расчета, либо имеют многократный запас.

### ***Усиление наклонных сечений балок***

Общий вид усиления имеет вид и расчетную модель, представленную на рис. 4.

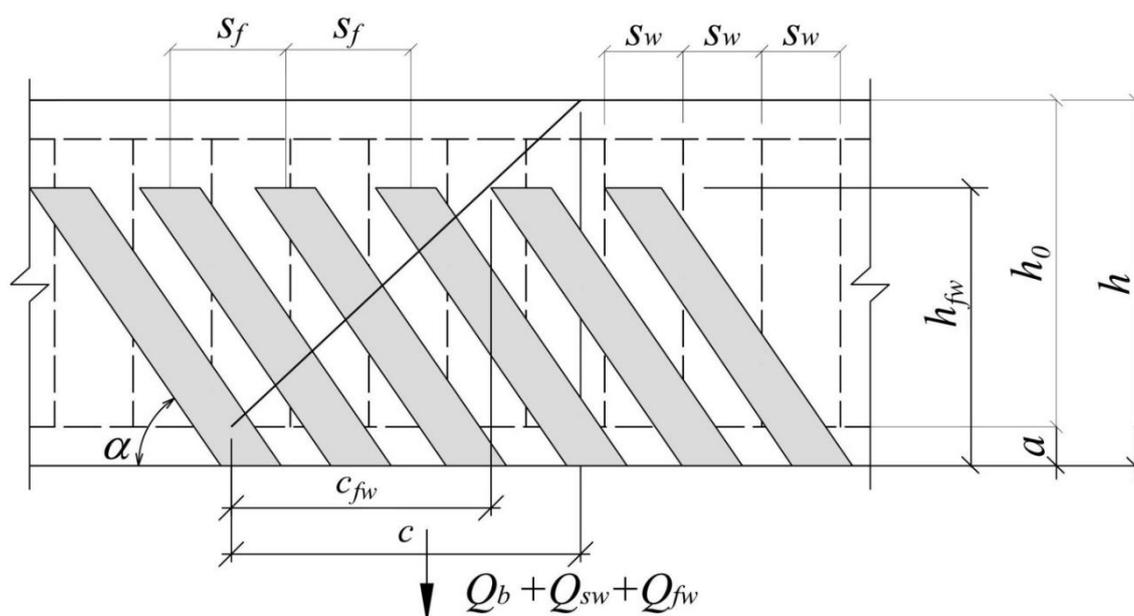


Рис. 4. Общий вид усиления наклонных сечений композитными материалами

Расчетное обоснование проводится в соответствии с [9-11], при этом отдельная методика приведена для гидротехнических сооружений с характерными значительными высотами сечений и большой условной жесткостью балок [12].

Проблемы нормирования:

- 4-х сторонние хомуты в реальности трудно выполнимы;

- П-образные хомуты, как правило, на реальных объектах выполняются не на всю высоту элемента ( $h_{fw}$ ), что требует дополнительного исследования/обоснования.

***Усиление нормальных сечений центрально сжатых, а также внецентренно сжатых (с малым эксцентриситетом) колонн и пилонов***

Общая схема усиления формируется путем создания объемного сжатия железобетона (рис.5)

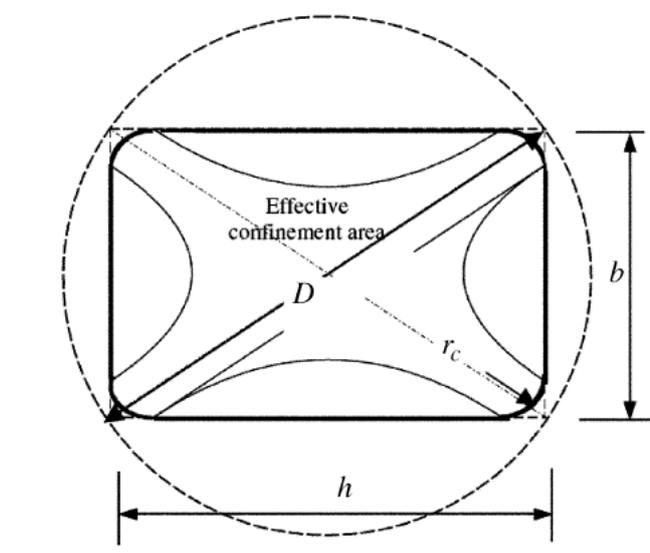


Рис. 5. Схема расположения «обжатого» бетона внутри сечения

Определение несущей способности в различных нормативных документах [13, 14] формируется по принципу:

$$R_{bз} = R_b + f(R_f, k_{ef})$$

где  $R_b$  – прочность бетона неусиленного сечения;

$f(R_f, k_{ef})$  – функция приведения прочности внешнего армирования ( $R_f$ ) за счет ряда коэффициентов эффективности к прочности «обжатого» бетона ( $k_{ef}$ ).

При этом начальный класс бетона неусиленного сечения и внешнее армирование рассматриваются практически обособленно, что приводит к

следующей схеме влияния внешнего армирования на приведенную прочность бетона для круглых и квадратных колонн (рис.6).

Проблемы нормирования:

- существенные ограничения в габаритах рассматриваемых элементов, обусловленные эффективностью создания трехосного сжатия;
- определение расчетного сопротивления бетона объемному сжатию формируется на основе сложения расчетного сопротивления бетона без объемного сжатия и компоненты условно «обжатого» бетона;

***Усиление нормальных сечений внецентренно сжатых колонн и пилонов с большим эксцентриситетом***

Общий принцип усиления внецентренно сжатых конструкций с большими эксцентриситетами базируется на двух направлениях:

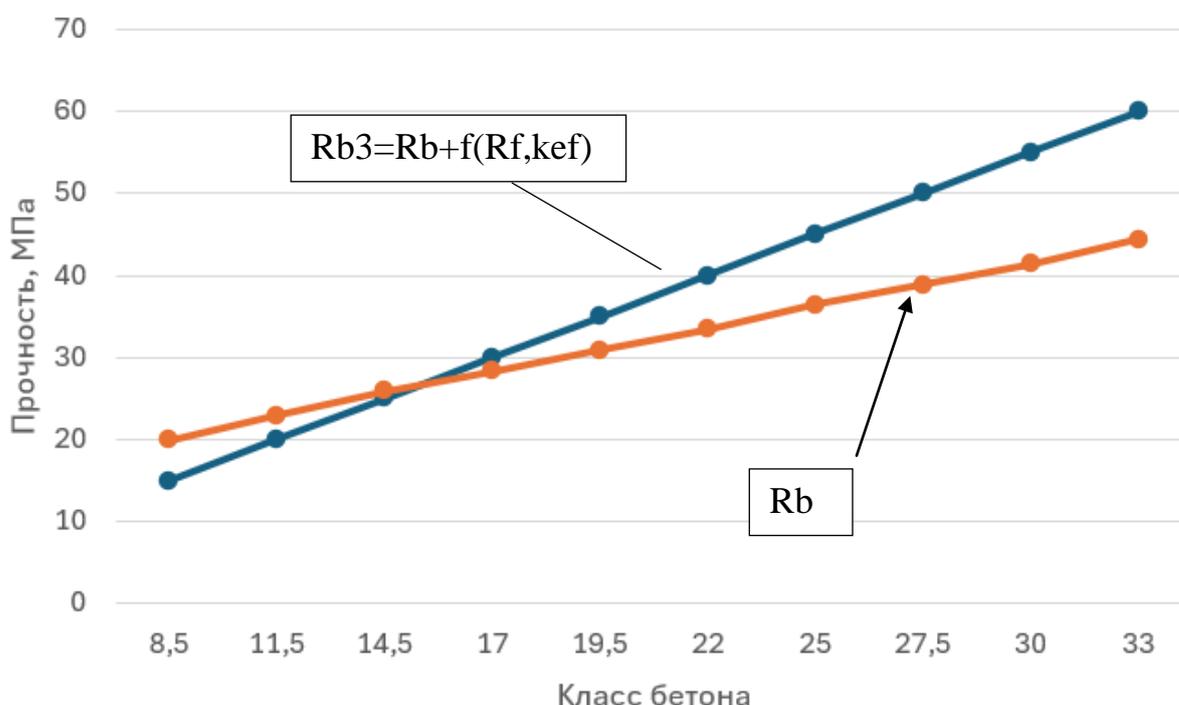


Рис. 6. График влияния внешнего армирования на приведенную прочность бетона усиленной колонны

- при наличии в явном виде растянутой грани – продольная наклейка внешнего армирования в направлении усилий растяжений;

- путем создания объемного сжатия (есть принципиальные методики).

Проблемы нормирования:

- фактически отсутствующие методики расчета внецентренно сжатых конструкций с эксцентриситетами больше 10% от высоты сечения, т.к. отсутствует базовая модель расчета и объемные экспериментальные исследования;

- сложность устройства внешнего армирования в зоне перекрытий (как правило, зона наибольших моментов).

### ***Усиление наклонных сечений центрально и внецентренно сжатых колонн и пилонов***

Усиление строится на основе определения НДС конструкции и устройства внешнего армирования в направлении главных растягивающих напряжений **на поверхности элемента.**

Проблемы нормирования:

- имеющиеся методики расчета/конструирования не учитывает в явном виде ширину элементов усиления, рассматривая только удельную площадь внешнего армирования (на единицу длины);

- в целом отсутствуют явно выраженные рекомендации по усилению, конструированию.

### **Заключение**

По результатам проведенного анализа, основанного на накопленном опыте проектирования реальных объектов, лабораторных исследованиях и анализе различных нормативных документов, а также на результатах исследований других авторов:

1. Применений систем внешнего армирования на основе углеродных волокон - перспективный динамически развивающийся метод усиления железобетонных конструкций с достаточной развитой

базой, что позволяет обосновать уровень несущей способности и надежность усиленных конструкций [14].

2. Методики расчета и проектирования требуют развития и совершенствования на основе результатов исследований, активно проводимых в последнее время, что позволит уточнить возможности применения метода усиления и граничные условия для расчетных моделей.
3. Необходимо дальнейшее накопление базы референтных объектов, результатов экспериментальных и лабораторных исследований, что позволит разработать усовершенствованные методики проектирования и конструирования с расширением областей применения метода усиления железобетонных конструкций.

### Литература

1. Симаков О.А. Анализ факторов, вызывающих необходимость усиления железобетонных конструкций. Строительство и реконструкция. 2019. №1. С. 76-84.
2. Тамразян А.Г. Бетон и железобетон: проблемы и перспективы. Промышленное и гражданское строительство. 2014. № 7. С. 51-54
3. Тамразян А.Г., Орлова М.А. К остаточной несущей способности железобетонных балок с трещинами. Жилищное строительство. 2015. № 6. С. 32-34.
4. Мухамедиев Т.А. Проектирование усиления железобетонных конструкций внешним армированием композиционными материалами//Бетон и железобетон -взгляд в будущее. Научные труды. III Всероссийской (II Международной) конференции по бетону и железобетону. 2014. С. 34-44.
5. Бокарев С.А., Смердов Д.Н., Неровных А.А. Методика расчета по прочности сечений эксплуатируемых железобетонных пролетных строений,

усиленных композитными материалами. Известия высших учебных заведений. Строительство. 2010. № 10. С. 63-68.

6. Смердов Д.Н., Смердов М.Н., Селиванова Е.О. К вопросу долговечности изгибаемых железобетонных элементов, усиленных полимерными композиционными материалами. Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе. 2015. № 1. С. 490-493.

7. Рубин О.Д., Лисичкин С.Е., Фролов К.Е. Методика расчета прочности железобетонных конструкций гидротехнических сооружений, усиленных композиционными материалами. Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2017. № 1. С. 42-48.

8. Рубин О.Д., Лисичкин С.Е., Балагуров В.Б., Александров А.В. Новая технология ремонта ГТС посредством армирования композитными материалами. Известия ВНИИГ. 2016. Т. 280. С. 3-10.

9. Kim, H., Kim, M., Ko, M., and Lee, Y. (2015). Shear Behavior of Concrete Beams Reinforced with GFRP Shear Reinforcement. International Journal of Polymer Science. № 1. Pp. 1-8.

10. Mofidi, A. and Chaallal, O. Tests and Design Provisions for Reinforced-Concrete Beams Strengthened in Shear Using FRP Sheets and Strips. International Journal of Concrete Structures and Materials. 2014. № 7. Pp. 117-128.

11. Menegotto M, Monti G., Liotta M.A. Modelling shear mechanism in FRP-strengthened R/C beams. Architecture Civil Engineering Environment. 2009. No 3. Pp. 57-68.

12. Рубин О.Д., Лисичкин С.Е., Александров А.В., Симаков О.А. Разработка методики расчета прочности железобетонных конструкций гидротехнических сооружений, усиленных посредством внешнего армирования на основе композитных материалов, при действии поперечных сил. Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2016. № 3. С. 68-74.

---

13. Bakis C. E., Bank L. C., Brown V. L. Cjzenza E. Fibre-Reinforced Polimer Composites for Construction-State of the Art Review. Journal of Composites in Construction, New York. 2002, v. 6. № 2. p. 78-87.
14. Мухамедиев Т.А., Кузеванов Д.В. Расчет внецентренно сжатых железобетонных конструкций, усиленных обоймами из композиционных материалов // Бетон и железобетон, № 2, 2014. С. 18-20.
15. Федотов М.Ю., Кальгин А.А., Шмойлов Е.Е., Капырин П.Д., Корнев О.А. Применение комплексной системы оптического мониторинга технического состояния с внешним композитным армированием строительных конструкций // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 1. С. 105–114.

### References

1. Simakov O.A. Stroitelstvo i rekonstrukciya. 2019. №1. pp. 76-84.
  2. Tamrazyan A.G. Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitelstvo. 2014. № 7. pp. 51-54.
  3. Tamrazyan A.G., Orlova M.A. Zhilishhnoe stroitel`stvo. 2015. № 6. pp. 32-34.
  4. Muxamediev T.A. Nauchnye trudy III Vserossijskoj (II Mezhdunarodnoj) konferencii po betonu i zhelezobetonu. 2014. pp. 34-44.
  5. Bokarev S.A., Smerdov D.N., Nerovnyh A.A. Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Stroitelstvo. 2010. № 10. pp. 63-68.
  6. Smerdov D.N., Smerdov M.N., Selivanova E.O. p Modernizaciya i nauchnye issledovaniya v transportnom komplekse. 2015. № 1. pp. 490-493.
  7. Rubin O.D., Lisichkin S.E., Frolov K.E. Stroitel'naya mexanika inzhenernyh konstrukcij i sooruzhenij. 2017. № 1. pp. 42-48.
  8. Rubin O.D., Lisichkin S.E., Balagurov V.B., Aleksandrov A.V. Izvestiya VNIIG. 2016. T. 280. pp. 3-10.
  9. Kim, H., Kim, M., Ko, M., and Lee, Y. 2015. International Journal of Polymer Science. № 1. pp. 1-8.
-



10. Mofidi, A. and Chaallal, O. International Journal of Concrete Structures and Materials. 2014. № 7. pp. 117-128.
11. Menegotto M, Monti G., Liotta M.A. Architecture Civil Engineering Environment. 2009. No 3. pp. 57-68.
12. Rubin O.D., Lisichkin S.E., Aleksandrov A.V., Simakov O.A. Stroitel'naya mexanika inzhenernyh konstrukcij i sooruzhenij. 2016. № 3. pp. 68-74.
13. Bakis C. E., Bank L. C., Brown V. L. Cjzenza E. Journal of Composites in Construction, New York. 2002, v. 6. № 2. pp. 78-87.
14. Muxamediev T.A., Kuzevanov D.V. Beton i zhelezobeton, № 2, 2014. pp. 18-20.
15. Fedotov M.Yu., Kalgin A.A., Shmojlov E.E., Kapyrin P.D., Kornev O.A. Vestnik MGSU. 2024. T. 19. Vy`p. 1. pp. 105–114.

**Дата поступления: 19.05.2024**

**Дата публикации: 29.06.2024**