



## Моделирование напряженно-деформированного состояния усиленной композитной арматурой бетонной балки

А.В. Ластовка<sup>1</sup>, С.В. Деордиев<sup>2</sup>, А.К. Мурзинцев<sup>3</sup>✉

<sup>1,2,3</sup>Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

**Аннотация.** Исследование направлено на изучение особенностей моделирования напряженно-деформированного состояния бетонной балки, усиленной двумя типами волокнистых композитов. Необходимость усиления существующих железобетонных конструкций может быть вызвана реконструкцией или техническим перевооружением, что часто влечет за собой увеличение нагрузки на несущие конструкции зданий и сооружений, а также при ликвидации последствий факторов, приведших к снижению несущей способности или выходу из строя несущих конструкций. В работе для исследования применимости модели производился анализ результатов, полученных в ходе испытаний на изгиб и осевое сжатие опытных образцов железобетонных балок таврового сечения со сварной каркасной арматурой, находившихся в эксплуатации, и результатов численного исследования в программном комплексе «ЛИРА». Напряженно-деформированное состояние опытных образцов было произведено в нелинейной постановке методом конечных элементов. Проведенный анализ и теоретические исследования показали, что применимость моделей, разработанных на основе ограниченной базы данных испытаний, неясна, особенно в отношении широкого диапазона коэффициентов сжатия, в то время как результаты моделирования работы железобетонных балок показали достаточную точность для использования при проектировании усиления путем применения внешнего композитного армирования.

**Ключевые слова:** композитная арматура, бетон, усиление, напряженно-деформированное состояние, GFRP, CFRP

**Для цитирования:** Ластовка А.В., Деордиев С.В. Мурзинцев А.К. Моделирование напряженно-деформированного состояния усиленной композитной арматурой бетонной балки // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2023. Т. 13. № 4. С. 645–654. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2023-4-645-654>. EDN: PATXSL.

### Original article

## Stress-strain modelling for a composite reinforced concrete beam

Anatoly V. Lastovka<sup>1</sup>, Sergey V. Deordiev<sup>2</sup>, Arsenii K. Murzintsev<sup>3</sup>✉

<sup>1,2,3</sup>Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

**Abstract.** The study is aimed at the features of modeling the stress-strain state of a concrete beam, reinforced with two types of fibrous composites. The necessity of strengthening existing reinforced concrete structures can be caused by the reconstruction or technical re-equipment, which often entails an increase in the load on the load-bearing structures of buildings and facilities, as well as during the elimination of the consequences of factors that led to a decrease in the bearing capacity or a failure of load-bearing structures. In order to study the applicability of the model, we analysed the results, obtained during bending and axial compression tests of T-section reinforced concrete beam specimens with welded frame reinforcement that were in operation and the results of a numerical study in a LIRA software suite. The stress-strain state of specimens was modelled in a nonlinear formulation using the finite element method. The conducted analysis and theoretical studies have shown the applicability of models, developed based on a limited test database, unclear, especially with regard to a wide range of compression coefficients, while the results of modeling the behavior of reinforced concrete beams have

demonstrated sufficient accuracy for applying in the strengthening design using external composite reinforcement.

**Keywords:** composite reinforcement, concrete, modeling, stress-strain state, GFRP, CFRP

**For citation:** Lastovka A.V., Deordiev S.V., Murzintsev A.K. Stress-strain modelling for a composite reinforced concrete beam. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost' = Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate.* 2023;13(4):645-654. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2023-4-645-654>. EDN: PATXSL.

## ВВЕДЕНИЕ

Надежность, долговечность и безопасность имеют первостепенное значение, когда речь идет о проектировании и строительстве бетонных сооружений. Бетон широко используется в гражданском строительстве. Однако его недостатком является низкая прочность на растяжение, хрупкость и деформационное размягчение. В бетонной конструкции трещины, вызванные воздействием окружающей среды и/или механических нагрузок, быстро раскрываются до макроскопически видимого уровня, а когда они соединяются, это может привести к образованию еще более крупных разрывов. Наличие таких повреждений ускоряет разрушение, обеспечивая легкий доступ агрессивных сред (например, противобледенительной соли) внутрь конструкции [1–3]. В данном контексте очень важно уменьшить традиционные недостатки железобетона для того, чтобы возводить конструкции, способные достичь длительного срока службы.

Обозначенные потребности, а также наступление передовой инженерной эры заставляет исследователей разрабатывать современные материалы с улучшенными свойствами. В последнее время композитные материалы, особенно полимерные композиты, армированные углеродным волокном, уверенно вытесняют различные традиционные металлы и металлические сплавы благодаря своему низкому удельному весу, лучшей прочности, более высокой жесткости, простоте изготовления, высокой коррозионной стойкости, улучшенной усталостной прочности, увеличенному сроку службы и, самое главное, удобной легкой структуре [4–7].

За последние несколько десятилетий композитные материалы превратились в конструктивно и экономически жизнеспособное строительное решение для мостов, морских сооружений и зданий. Они производятся в различных формах с различными свойствами и способами применения. Типичная композитная арматура, используемая в гражданском строительстве, состоит из стекла, углерода и арамида. Прочность на разрыв неметалличе-

ской арматуры, как показывают исследования, втрое выше стальной [8, 9]. В отличие от металлической, такая арматура коррозионно устойчива и имеет меньший вес (примерно в 9 раз). В ходе анализа долгосрочных последствий использования композитных материалов как на новых, так и на существующих бетонных конструкциях, было установлено, что они могут прослужить более 50-ти лет. По прогнозам, к 2025 г. мировой рынок композитных материалов для строительства достигнет 32 млрд долл. [10–12].

В последнее время было проведено много исследований по оценке предельной прочности бетона, усиленного композитной арматурой.

Однако эта область содержит еще много нерешенных и дискуссионных вопросов, следовательно необходимы дополнительные исследования для изучения возможностей композитной арматуры, ее ограничений и применимости при проектировании [13–16].

Таким образом, обозначенные обстоятельства обуславливают выбор темы данной статьи, а также свидетельствуют о ее высокой теоретической и практической значимости.

## МЕТОДЫ

В течение последних десятилетий механические свойства моноволоконных инженерных цементных композитов, таких как волокна из поливинилового спирта или системы, армированные волокнами из полиэтилена, были исследованы А.Р. Воликом, С.А. Сазоном, К.Ю. Чурило [17], Д.Н. Шушуниним, М.В. Комаровым [18], Yuan Wu, Song Hongwei, Huang Chenguang [19].

Взаимосвязь между напряжением и деформацией армированного стальной фиброй щелочно-шлакового бетона при статическом сжатии описывается С.И. Меркуловым, Э.К. Акимовым [20], И.Ю. Белуцким, А.Д. Сим [21], M. Atwater; Z.C. Leseman, J. Phillips [22].

Анализ механических свойств различных армированных композитной арматурой бетонов в холодных регионах входит в круг научных интересов Ю.Ф. Рогатнева, Ж. Минани, О.О. Соколова, А.М. Хорохордина [23],

A. Javadian, M. Wielopolski, Ia.F.C. Smith, D.E. Hebel [24].

Однако, несмотря на имеющиеся труды и наработки, необходимо отметить, что общая модель бетона, усиленная композитной арматурой еще не принята промышленными нормами. Кроме того, зачастую экспериментальные модели разрабатываются на основе эмпирических данных, полученных при испытании небольших бетонных образцов.

Наиболее популярным размером используемых прототипов являются обычные стандартные бетонные цилиндры 152 мм × 305 мм, а некоторые исследователи даже использовали образцы 76 мм × 305 мм.

Соответственно, модели были разработаны на основе ограниченной базы данных испытаний, и поэтому их применимость неясна, особенно в отношении широкого диапазона коэффициентов сжатия.

Исследование напряженно-деформированного состояния опытных образцов – балок – в нелинейной постановке будем проводить методом конечных элементов в программном комплексе «ЛИРА-САПР».

Опытные железобетонные балки таврового сечения со сварной каркасной арматурой были демонтированы из пролетного строения

моста после более чем 40-летней эксплуатации. Конструкция этих балок по армированию и геометрии соответствовала типовому проекту. Общая длина балок составляет 14,06 м, а расчетный пролет – 13,5 м. Рабочая арматура класса А-II. Прочность бетона балок Б-1 и БП-1 на сжатие была определена неразрушающим способом – эталонным молотком Кашкарова. Для определения прочности бетона балок на растяжение использовался метод «pull-off» (местное отрывание бетона на фиксированной площади). Значение прочности указано в табл. 1.

В исследовании рассмотрены две балки: обычная Б-1 и усиленная двумя композитными лентами БП-1.

Армированный стекловолокном полимер (GFRP) и армированный углеродным волокном полимер (CFRP) приклеивались к внешней поверхности бетона с помощью клея на основе эпоксидной смолы для улучшения характеристик долговечности бетона.

Физические свойства двух видов армированного волокнами пластика и эпоксидного клея приведены в табл. 2.

На рис. 1 показаны два типа волокнистых композитов – GFRP и CFRP.

**Таблица 1.** Прочность бетона балок Б-1 и БП-1

**Table 1.** Concrete strength of beams B-1 and BP-1

Шифр балки	Прочность бетона, МПа	
	на сжатие	на растяжение
Б-1	22,3	1,53
БП-1	28,0	2,31

**Таблица 2.** Прочность стеклопластика и клея из эпоксидной смолы

**Table 2.** Strength of fiberglass and epoxy resin adhesive

Материалы	Прочность на разрыв, МПа	Модуль упругости, ГПа	Удлинение при разрыве, %
GFRP	2450~2550	75~85	2,25~2,35
CFRP	3470~3570	250~270	1,68~1,78
Клей из эпоксидной смолы	52,3~56,3	2,5~2,9	2,20~2,30

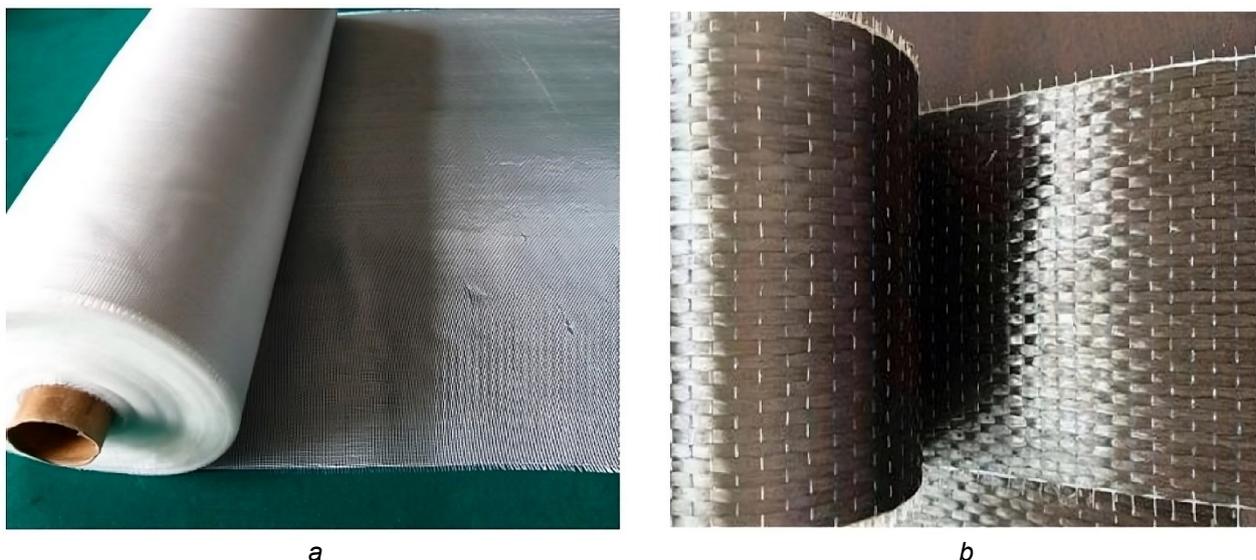
Композитные ленты CFRP сечением 120×1,4 мм были приклеены к нижней поверхности балки БП-1 двухкомпонентным клеем из эпоксидной смолы, причем верхнюю ленту довели до опор, а нижнюю оборвали в пролете на расстоянии 195 см от опор.

Ленты GFRP были наклеены на боковой поверхности нижней части ребра по всей длине пролета.

Для дополнительной анкеровки наклеенных лент использовали высокопрочную ткань

SikaWrap, наклеенную двумя слоями между опорной и первой от опоры поперечными диафрагмами с расположением рабочих волокон во взаимно перпендикулярных направлениях.

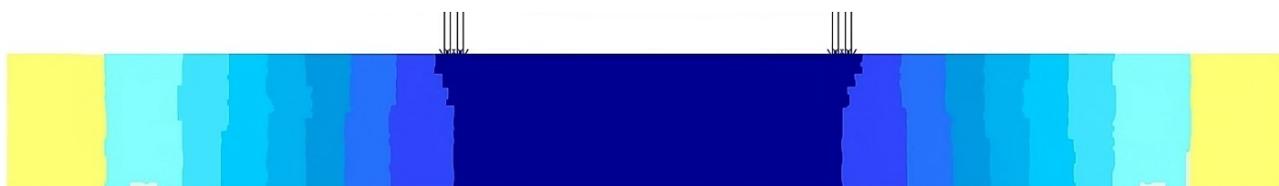
Испытания на изгиб и сжатие проводились на образцах двух типов. Метод испытаний осуществлялся в соответствии со спецификацией (GBT 50081-2019). Во время экспериментов на осевое сжатие нагрузка прикладывалась со скоростью 0,5 МПа/с.



**Рис. 1. Волокнистая ткань: а – ткань из стекловолокна; б – ткань из углеродного волокна**  
**Fig. 1. Fiber fabric: a – fiberglass fabric; b – carbon fiber fabric**

Сборные призмы из трещиноватого бетона испытывались на четырехточечный изгиб с нагрузкой, приложенной со скоростью 0,05 МПа/с. Данные о смещении образца под действием нагрузки во время сжатия, регистрировались. В ходе испытания датчики деформации были прикреплены к центру нижней части образца, а деформация фиксировалась прибором статической деформации.

Общее количество конечных элементов в модели – 39 400, узлов – 45 738. Применяя шаговый и шагово-итерационный методы, использовали кусочно-линейный закон деформирования материалов № 14 библиотеки с соответствующим алгоритмом. Как и в натурном эксперименте, внешнюю нагрузку прикладывали пошагово к узлам, согласно рис. 2.



**Рис. 2. Изополя вертикальных перемещений балок с большим пролетом среза и соприкасающихся напряжений на боковой грани перед разрушением**  
**Fig. 2. Isofields of vertical displacements of beams with a large section span and contiguous stresses on the side face before destruction**

Во избежание эффекта местного смятия в местах приложения нагрузки были установлены пластины размерами 0,01×0,01 м с заданной жесткостью. Такое же количество жестких пластин с такими же размерами было установлено в местах возле опор. Способ опирания балки задавался исключением перемещений по соответствующим осям.

Высокая механическая прочность композитной арматуры является результатом вклада нескольких механизмов упрочнения, а именно: эффекта передачи нагрузки, упрочнения Холла-Петча, упрочнения Орована,

несоответствия коэффициента теплового расширения (КТР) и модуля упругости (МУ).

Передача нагрузки от мягкой и податливой матрицы к жестким и твердым частицам под действием внешней нагрузки способствует упрочнению основного материала.

Модифицированная модель сдвига, предложенная Нардоне и Прево, обычно используется для прогнозирования вклада в упрочнение за счет передачи нагрузки в композитах, армированных частицами [25]:

$$\Delta\sigma_{LT} = \nu_p \sigma_m \left[ \frac{(l + t)A}{4l} \right],$$

где  $v_p$  – объемная доля частиц,  $\sigma_m$  – предел текучести неармированной матрицы,  $l$  и  $t$  – размер частицы параллельно и перпендикулярно направлению нагрузки, соответственно.

Для случая равноосных частиц уравнение сводится к следующему:

$$\Delta\sigma_{LT} = \frac{1}{2} v_p \sigma_m.$$

Размер зерна оказывает сильное влияние на прочность металла, поскольку границы зерен могут препятствовать движению дислокаций. Это связано с различной ориентацией соседних зерен и высоким нарушением решетки, характерным для этих областей, что препятствует движению дислокаций в непрерывной плоскости скольжения [26]. Уравнение Холла-Петча связывает прочность со средним размером зерна (d):

$$\Delta\sigma_{H-p} = \frac{k_y}{\sqrt{d}},$$

где  $k_y$  – коэффициент упрочнения (характерная константа каждого материала).

Частицы играют фундаментальную роль в конечном размере зерен в матрицах композитов, поскольку они могут взаимодействовать с границами зерен, действуя как точки прижатия, замедляя или останавливая их рост. Увеличение  $v_p$  (объемной доли) и уменьшение  $d_p$  (диаметра частиц) приводит к более мелкой структуре, что теоретически моделируется уравнением Зенера [27]:

$$d_m = \frac{4\alpha d_p}{3v_p},$$

где  $\alpha$  – пропорциональная константа.

Так называемый механизм Орована заключается во взаимодействии наночастиц с дислокациями. Нераскалывающиеся керамические армирующие частицы удерживают пересекающиеся дислокации и способствуют изгибанию дислокаций вокруг частиц (петли Орована) под действием внешней нагрузки [28]. Эффект Орована может быть выражен следующей формулой:

$$\Delta\sigma_{OR} = \frac{0.13bG}{d_p \left( \sqrt[3]{\frac{1}{2} v_p} - 1 \right)} \ln \left( \frac{d_p}{2b} \right),$$

где  $b$  – вектор Бюргера, а  $G$  – матричный модуль сдвига.

Несоответствие коэффициента теплового расширения (КТР) и модуля упругости (МУ) между армирующими элементами и матрицей устраняется в процессе охлаждения и деформации материала путем образования геометрически необходимых дислокаций (ГНД).

Плотность ГНД из-за несоответствия КТР

и МУ может быть оценена следующими выражениями [29]:

$$\rho^{КТР} = \frac{A\Delta\alpha\Delta T v_p}{b d_p (1 - v_p)},$$

$$\rho^{МУ} = \frac{6M_3}{\pi v_p^3} \varepsilon,$$

где  $A$  – геометрическая постоянная,  $\Delta\alpha$  – разница в КТР, а  $\Delta T$  – разница между температурой испытания и температурой обработки или термообработки. Затем, комбинированное усиление, вызванное несоответствием КТР и МУ, может быть рассчитано с помощью уравнения Тейлора [30]:

$$\sigma_{КТР+МУ} = \sqrt{3}\beta G b \left( \sqrt{\rho^{КТР}} + \sqrt{\rho^{МУ}} \right),$$

где  $\beta$  – константа.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Сечение балки смоделировано в виде клеяма высотой 85 см. Ширина ребра составляет 12 см, а ширина полочки – 139 см. Высота полочки условно принята неизменной по ширине сечения, она составляет 10 см.

Для описания нелинейного деформирования железобетона был использован 11-й экспоненциальный закон. Сравнение результатов расчетов балок в ПК «Лира» с экспериментальными данными приведено на рис. 3.

Измеренные кривые зависимости сжимающей деформации от нагрузки для каждого образца показаны на рис. 4. Кривая образца из обычного бетона имеет только монотонный повышающийся участок, как показано на рис. 4, а. Результаты испытаний на осевое сжатие свидетельствуют о том, что предельная несущая способность образцов уменьшается. Кривая образца, армированная углепластиком и стеклопластиком, показана на рис. 4, б. Кривая образца из углепластика и стекловолокна состоит из восходящих сегментов. Показатели сжатия образцов из углеволоконной ткани по сравнению с образцами из обычного бетона увеличиваются на 441,33 кН. По сравнению с образцами из обычного бетона, характеристики сжатия образцов из стекловолокна увеличиваются на 199,62 кН.

Итак, прочность на сжатие образцов, армированных углепластиком и стеклопластиком, значительно повышается, поскольку волоконная ткань ограничивает боковую деформацию образца. В свою очередь кривые напряжения–деформации армированных образцов отличаются от кривых обычных образцов, а прочность на сжатие и пиковая деформация улучшаются. Образцы считаются поврежденными, когда растягивающие напряжения углепластика и стеклопластика достигают максимального предела прочности материала при численном моделировании.

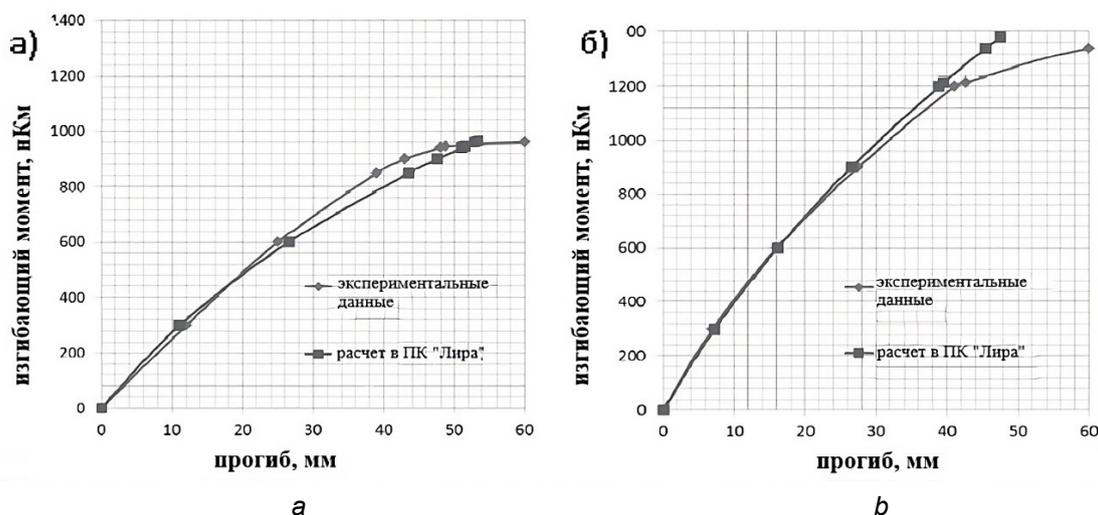


Рис. 3. График нагрузки-прогиба для: а – балки Б-1; б – балки БП-1  
Fig. 3. Load-deflection graph for: a – beams B-1; b – beams BP-1

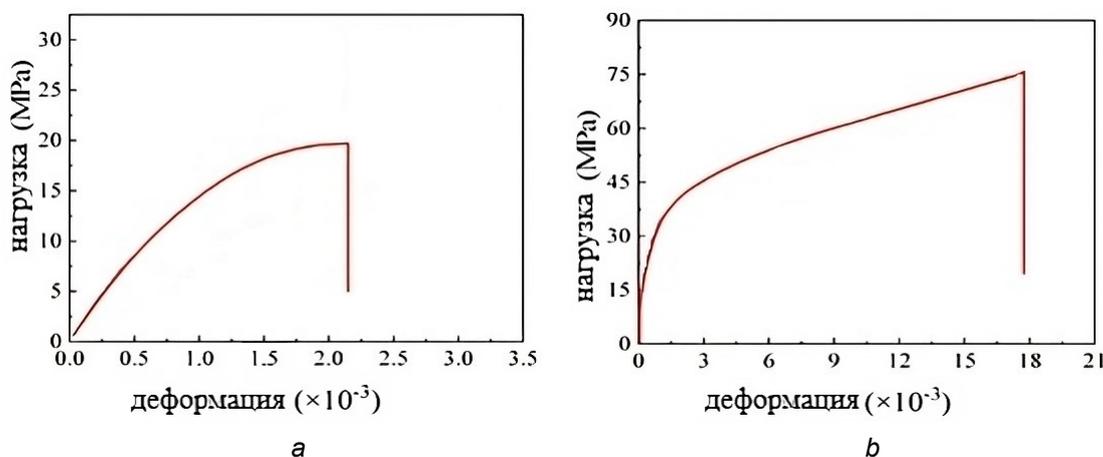


Рис. 4. Кривые напряжения–сжатия–деформации образцов: а – неармированный образец; б – образец, усиленный углеродным и стекловолокном  
Fig. 4. Compression-strain stress curves of specimens: a – non-reinforced specimen; b – carbon and glass fiber reinforced specimen

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, подводя итоги, можно сделать следующие выводы. Для многих конструкций, которые работают на изгиб и внецентренное сжатие, а также подвергаются воздействию внешней среды (в частности мостовые балки, опоры мостов), оптимальным

решением является усиление с использованием внешней композитной арматуры. Результаты моделирования работы конструкций, усиленных внешней композитной арматурой в ПК «Ли́ра», описанные в данной статье, являются достаточно точными для использования при проектировании усиления.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Мухамедиев Т.А., Майоров С.А. Учет работы сжатой композитной полимерной арматуры при расчете прочности сжатых элементов по деформационной модели // Бетон и железобетон. 2022. № 4-5 (612-613). С. 66–71. <https://doi.org/10.31659/0005-9889-2022-612-613-4-5-66-71>. EDN: DYBLFC.
2. Парфенов А.А., Сивакова О.А., Гусарь О.А., Балакирева В.В. Работа и разрушение бетона в условиях высокой и низкой температуры // Строительные материалы. 2019. №. 3. С. 64–66. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-768-3-64-66>. EDN: ZIKFHV.
3. Сулейманова Л.А. Поведение бетона под нагрузкой, механизм его разрушения и оценка этого процесса // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2016. №. 1. С. 68–75. EDN: VCQCWL.

4. Кузнецова И.С., Степанова В.Ф., Бучкин А.В., Миусов С.П. Исследования поведения бетонных плит с арматурой композитной полимерной при пожаре // Бетон и железобетон. 2021. № 5-6 (607-608). С. 32–37. EDN: RMCNYR.
5. Имомназаров Т.С., Аль Сабри Сахар А.М., Дирие М.Х. Применение композитной арматуры // Системные технологии. 2018. № 2 (27). С. 24–29. EDN: XTFJZR.
6. Гиль А.И., Бадалова Е.Н., Лазовский Е.Д. Стеклопластиковая и углепластиковая арматура в строительстве: преимущества, недостатки, перспективы применения // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F. Строительство. Прикладные науки. 2015. № 16. С. 48–53. EDN: VURVNH.
7. Михеев В.В. Исследование влияния длины сцепления ФАП с бетоном на несущую способность железобетонных изгибаемых элементов, усиленных внешним армированием на примере железобетонной балки // Молодой учёный. 2022. № 21 (416) С. 28–33.
8. Леонова А.Н., Шевчук Е.А., Губская К.В. Основные виды композитной арматуры. Её преимущества и недостатки // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). 2020. № 2. С. 334–338. EDN: PPTIYN.
9. Комарова Н.Д. Композиционные материалы в строительстве // Университетская наука. 2018. № 2 (6). С. 13.
10. Etman E.E., Mahmoud M.H., Hassan A., Mowafy M.H. Flexural behaviour of concrete beams reinforced with steel-FRP composite bars // Structures. 2023. Vol. 50. P. 1147–1163. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.02.098>.
11. Кисляков К.А., Попугаев А.И. Основные проблемы внедрения композитной арматуры // Фотинские чтения. 2017. № 1 (7). С. 64–68. EDN: YJBUUP.
12. Аксенов М.А., Леонова А.Н. Перспективные методы усиления строительных конструкций композитными материалами на углеродной основе // Высокие интеллектуальные технологии в науке и образовании: материалы I Международной научно-практической конференции. 2017. Т. 1. (г. Санкт-Петербург, 22 марта 2017 г.). Санкт-Петербург: Информационный издательский учебно-научный центр «Стратегия будущего», 2017. С. 74–80. EDN: YOJJDZ.
13. Бокарев С.А., Смердов Д.Н. Нелинейный анализ железобетонных изгибаемых конструкций, усиленных композитными материалами // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2010. № 2. С. 113–125. EDN: MNGZUN.
14. 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 (622). С. 63–74. EDN: OZIDQX.
15. Волик А.Р., Новицкий Я.Я. Экспериментальные исследования железобетонных балок с внешним армированием растянутой грани композитными тканями // Вестник Гродненского государственного университета имени Янки Купалы. Серия 6. Техника. 2022. Т. 12. № 1. С. 117–125. EDN: UPPKRI.
16. Смоляго Г.А., Обернихина Я.Л. Прочность и деформативность изгибаемых железобетонных элементов, усиленных углепластиком // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. ВГ Шухова. 2022. № 4. С. 25–38. <https://doi.org/10.34031/2071-7318-2021-7-4-25-38>. EDN: MIRHHG.
17. Волик А.Р., Сазон С.А., Чурило К.Ю. Особенности испытаний на растяжение композитной арматуры // Вестник Гродненского государственного университета имени Янки Купалы. Серия 6. Техника. 2020. Т. 10. № 1. С. 110–118. EDN: UJZDBY.
18. Шушунин Д.Н., Комаров М.В., Логинова С.А. Перспектива модификации полимерного связующего композитной арматуры углеродными нанотрубками // Молодые ученые – развитию Национальной технологической инициативы (Поиск). 2020. № 1. С. 748–750. EDN: KNLEKX.
19. Weina Zhao, Te Ma, Hongwei Song, Wu Yuan, Ruixing Wang, Zhe Wang, et al. Effects of tangential supersonic airflow on the laser ablation of laminated CFRP // Journal of Materials Research and Technology. 2021. Vol. 14. P. 1985–1997. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.07.101>.
20. Меркулов С.И., Акимов Э.К. Прочность наклонных сечений балок с композитной стержневой арматурой // Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения: материалы Международных академических чтений (г. Курск, 18 ноября 2020 г.). Курск: Университетская книга, 2020. С. 180–185. EDN: FQXHSY.
21. Белуцкий И.Ю., Сим А.Д. Эффективность и исследования в области усиления пролетных строений мостов предварительно напряженными композитными материалами // Дальний Восток: проблемы развития архитектурно-строительного комплекса. 2015. № 1. С. 270–276. EDN: SZCYIF.
22. Atwater M., Phillips J., Leseman Z.C. Controlling carbon nanofiber morphology for improved composite reinforcement // International Journal of Materials and Structural Integrity. 2009. № 3. P. 179–186. <https://doi.org/10.1504/IJMSI.2009.028612>.
23. Рогатнев Ю.Ф., Минани Ж., Соколов О.О., Хорохордин А.М. Влияние значения процента армирования композитной арматуры на напряженно-деформированное состояние двухслойных изгибаемых

- бетонных элементов // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2020. № 4 (45). С. 67–75. <https://doi.org/10.24866/2227-6858/2020-4-7>. EDN: ZMJFRV.
24. Javadian A.A., Wielopolski M.B., Smith I.F.C., Hebel D.E. Bond-behavior study of newly developed bamboo-composite reinforcement in concrete // *Construction and Building Materials*. 2016. Vol. 122. P. 110–117. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.084>.
25. Gaillitis R., Sprince A., Kozlovksis T., Pakrastins L., Volkova V. Impact of polypropylene, steel, and PVA fibre reinforcement on geopolymer composite creep and shrinkage deformations // 5th International Conference: Innovative Materials, Structures and Technologies. *Journal of Physics: Conference Series* (Riga, 28–30 September 2022). 2023. Vol. 2423. P. 012030. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2423/1/012030>.
26. Chen B., Colmars J., Bai R., Naouar N., Boisse P. Kinematic modeling of transverse shear in textile composite reinforcements forming // *International journal of mechanical sciences*. 2023. Vol. 245. P. 108129. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2023.108129>.
27. Мухамедиев Т.А., Майоров С.А. Расчет прочности внецентренно сжатых бетонных элементов с композитной полимерной арматурой // Вестник НИЦ «Строительство». 2022. № 33 (2). С. 150–160. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-2\(33\)-150-160](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-2(33)-150-160). EDN: IMCDFS.
28. Степанова В.Ф., Мухамедиев Т.А., Кудряков К.Л., Бучкин А.В., Юрин Е.Ю. Экспериментальные исследования прочности сжатых бетонных элементов, армированных композитной полимерной арматурой // Вестник НИЦ «Строительство». 2022. № 33 (2). С. 173–182. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-2\(33\)-173-182](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-2(33)-173-182). EDN: IZTUTQ.
29. Бучкин А.В., Степанова В.Ф., Стрижак В.А., Юрин Е.Ю., Никишов Е.И. Неразрушающий контроль композитной полимерной арматуры // Вестник НИЦ «Строительство». 2020. № 24 (1). С. 23–35. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2020-1\(24\)-23-35](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2020-1(24)-23-35). EDN: ZTVGJC.
30. Peixin Yang, Wu Yuan, Hongwei Song, Chenguang Huang. Reinforcement mechanisms of low-strength fragile material under in-plane shear loading by composite lattice structures // *Composite structures*. 2023. Vol. 306. P. 116562. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.116562>.

## REFERENCES

1. Mukhamediev T.A. Accounting for the work of compressed composite polymer reinforcement when calculating the strength of compressed elements according to the deformation model. *Beton i zhelezobeton*. 2022;4-5:66-71. (In Russ.). <https://doi.org/10.31659/0005-9889-2022-612-613-4-5-66-71>. EDN: DYBLFC.
2. Parfenov A.A., Sivakova O.A., Gusar' O.A., Balakireva V.V. Operation and destruction of concrete at high and low temperatures. *Stroitel'nye materialy = Construction materials*. 2019;3:64-66. (In Russ.). <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-768-3-64-66>. EDN: ZIKFHV.
3. Suleymanova L.A. Behavior of concrete under load, mechanism of its destruction and evaluation of this process. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta imeni V.G. Shukhova = Bulletin of the Belgorod state technological university named after V.G. Shukhov*. 2016;1:68-75. (In Russ.). EDN: VCQCWL.
4. Kuznetsova I.S., Stepanova V.F., Buchkin A.V., Miyusov S.P. Studies of the behavior of concrete slabs with composite polymer reinforcement in case of fire. *Beton i zhelezobeton*. 2021;5-6(607-608):32-37. (In Russ.). EDN: RMCNYR.
5. Imomnazarov T.S., Al-Sabri S.A.M., Dirie M.H. The use of composite reinforcement. *Sistemnye tekhnologii*. 2018;2:24-29. (In Russ.). EDN: XTFJZR.
6. Hil A., Badalova E., Lazouski Y. Glass fiber and carbon fiber reinforcement in construction: advantages, disadvantages, prospects of application. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya F. Stroitel'stvo. Prikladnye nauki = Herald of Polotsk state university. Series F. Civil engineering. applied sciences*. 2015. № 16. S. 48–53. (In Russ.). EDN: VURVNH.
7. Mikheev V. V. Investigation of the influence of the adhesion length of FRP with concrete on the bearing capacity of reinforced concrete bending elements reinforced with external reinforcement on the example of a reinforced concrete beam. *Molodoi uchenyi = Young Scientist*. 2022;21:28-33. (In Russ.).
8. Leonova A. N., Shevchuk E. A., Gubskaya K. V. The main types of composite reinforcement. Its advantages and disadvantages. *Nauka. Tekhnika. Tekhnologii (politekhnikeskii vestnik) = Science. Engineering. Technology (polytechnical bulletin)*. 2020;2:334-338. (In Russ.). EDN: PPTIYN.
9. Komarova N.D. Composite materials in construction. *Universitetskaya nauka = University science*. 2018;2(6):13. (In Russ.).
10. Etman E.E., Mahmoud M.H., Hassan A., Mowafy M.H. Flexural behaviour of concrete beams reinforced with steel-FRP composite bars. *Structures*. 2023;50:1147-1163. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.02.098>.
11. Kislyakov K.A., Parugaev A.I. The main problems of the introduction of composite reinforcement. *Fotinskie chteniya*. 2017;1:64-68. (In Russ.). EDN: YJBUUP.

12. Aksenov M.A., Leonova A.N. Promising methods of strengthening building structures with carbon-based composite materials. In: *Vysokie intellektual'nye tekhnologii v nauke i obrazovanii: materialy I Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii = High intellectual technologies in science and education: proceedings of the I International Scientific and Practical Conference*. 22 March 2017, Saint Petersburg. Saint Petersburg: Information Publishing Educational and Scientific Center "Strategy of the Future"; 2017. Vol. 1. p. 74-80. (In Russ.). EDN: YOJJDZ.
13. Bokarev S.A., Smerdov D.N. The nonlinear analysis of bending reinforced concrete structures strengthened by composite materials. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta = Vestnik tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Journal of construction and architecture*. 2010;2:113-125. (In Russ.). EDN: MNGZUN.
14. Bokarev S.A., Smerdov D.N., Nerovnykh A.A. Methodology for calculating the strength of sections of ex-plicable reinforced concrete superstructures reinforced with composite materials. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Stroitel'stvo*. 2010;10:63-74. (In Russ.). EDN: OZIDQX.
15. Volik A.R., Novitski Ya.Ya. Experimental studies of reinforced concrete beams with external reinforcement of the tensioned face using composite fabrics. *Vestnik Grodnenskogo gosudarstvennogo universiteta imeni Yanki Kupaly. Seriya 6. Tekhnika = Vestnik of Yanka Kupala state university of Grodno. Series 6. Engineering science*. 2022;12:1:117-125. (In Russ.). EDN: UPPKRI.
16. Smolyago G.A., Obernikhina Ya.L. Strength and deformation of bended reinforced concrete elements reinforced with carbon fiber. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shukhova = Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2022;4:25-38. <https://doi.org/10.34031/2071-7318-2021-7-4-25-38>. EDN: MIRHHG. (In Russ.)
17. Volik A.R., Sazon S.A., Churilo K.Yu. Features of tensile tests of composite reinforcement. *Vestnik Grodnenskogo gosudarstvennogo universiteta imeni Yanki Kupaly. Seriya 6. Tekhnika = Vestnik of Yanka Kupala state university of Grodno. Series 6. Engineering science*. 2020;10:1:110-118. (In Russ.)
18. Shushunin D.N., Komarov M.V., Loginova S.A. The prospect of modification of polymer bonding composite reinforcement with carbon nanotubes. *Molodye uchenye – razvitiyu Natsional'noi tekhnologicheskoi initsiativy (Poisk)*. 2020;1:748-750. EDN: KNLEKX.
19. Weina Zhao, Te Ma, Hongwei Song, Wu Yuan, Ruixing Wang, Zhe Wang, et al. Effects of tangential supersonic airflow on the laser ablation of laminated CFRP. *Journal of Materials Research and Technology*. 2021;14:1985-1997. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.07.101>.
20. Merkulov S.I., Akimov E.K. Strength of inclined sections of beams with composite rod armature. In: *Bezopasnost' stroitel'nogo fonda Rossii. Problemy i resheniya: materialy Mezhdunarodnykh akademicheskikh chtenii = Safety of the construction Fund of Russia. Problems and solutions: materials of International academic readings*. 18 November 2020, Kursk. Kursk: University Book; 2020. p. 180-185. (In Russ.). EDN: FQXHSY.
21. Belutsky I.Y., Sim A.D. Efficiency and research in the field of strengthening of bridge spans prestressed FRP. *Dal'nii Vostok: problemy razvitiya arkhitekturno-stroitel'nogo kompleksa*. 2015;1:270-276. (In Russ.). EDN: SZCYIF.
22. Atwater M., Phillips J., Leseman Z.C. Controlling carbon nanofiber morphology for improved composite reinforcement. *International journal of materials and structural integrity*. 2009;3:179-186. <https://doi.org/10.1504/IJMSI.2009.028612>.
23. Rogatnev Yu.F., Minani J.1, Sokolov O.O., Khorokhordin A.M. Influence of the ratio of reinforcement of composite reinforcement on the stress-strain state of two-layer bending concrete elements. *Vestnik Inzhenernoi shkoly Dal'nevostochnogo federal'nogo universiteta = FEFU: School of engineering bulletin*. 2020;4:67-75. (In Russ.). <https://doi.org/10.24866/2227-6858/2020-4-7>. EDN: ZMJFRV.
24. Javadian A.A., Wielopolski M.B., Smith I.F.C., Hebel D.E. Bond-behavior study of newly developed bamboo-composite reinforcement in concrete. *Construction and Building Materials*. 2016;122:110-117. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.084>.
25. Gailitis R., Sprince A., Kozlovksis T., Pakrastins L., Volkova V. Impact of polypropylene, steel, and PVA fibre reinforcement on geopolymer composite creep and shrinkage deformations. *5th International conference: innovative materials, structures and technologies. journal of physics: conference series*. 28-30 September 2022, Riga. 2023. Vol. 2423. P. 012030. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2423/1/012030>.
26. Chen B., Colmars J., Bai R., Naouar N., Boisse P. Kinematic modeling of transverse shear in textile composite reinforcements forming. *International journal of mechanical sciences*. 2023;245:108129. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2023.108129>.
27. Mukhamediev T.A., Mayorov S.A. Strength calculation of non-centrally compressed concrete elements with composite polymer reinforcement. *Vestnik NITS «Stroitel'stvo» = Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2022;33(2):150-160. (In Russ.). [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-2\(33\)-150-160](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-2(33)-150-160). EDN: IMCDFS.
28. Stepanova V.F., Mukhamediev T.A., Kudyakov K.L., Buchkin A.V., Yurin E.Yu. Experimental studies into the strength of compressed concrete elements reinforced with fiber-reinforced polymer rebars. *Vestnik NITS*

«*Stroitel'stvo*» = *Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2022;33(2):173-182. (In Russ.).  
[https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-2\(33\)-173-182](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-2(33)-173-182). EDN: IZTUTQ.

29. Buchkin A.V., Stepanova V.F., Strizhak V.A., Yurin E.Yu., Nikishov E.I. Non-destructive testing of fiber reinforced polymer rebars. *Vestnik NITS «Stroitel'stvo» = Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2020;24(1):23-35. (In Russ.). [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2020-1\(24\)-23-35](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2020-1(24)-23-35). EDN: ZTVGJC.

30. Peixin Yang, Wu Yuan, Hongwei Song, Chenguang Huang. Reinforcement mechanisms of low-strength fragile material under in-plane shear loading by composite lattice structures. *Composite structures*. 2023;306:116562. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.116562>.

### Информация об авторах

**Ластовка Анатолий Васильевич**,  
к.т.н., доцент, доцент кафедры  
строительных конструкций  
и управляемых систем,  
Сибирский федеральный университет,  
660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79,  
Россия,  
e-mail: last\_pro@mail.ru, office@sfu-kras.ru  
<https://orcid.org/0000-0003-0751-1631>

**Деордиев Сергей Владимирович**,  
к.т.н., доцент,  
заведующий кафедрой строительных  
конструкций и управляемых систем,  
Сибирский федеральный университет,  
660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79,  
Россия,  
e-mail: deordievsv@yandex.ru  
<https://orcid.org/0000-0003-2026-820X>  
Author ID: 144121

**Мурзинцев Арсений Константинович**,  
ведущий инженер,  
АО «Россети Янтарь»  
236022, г. Калининград, ул. Театральная, 34,  
Россия,  
e-mail: arseniimurzincev@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0001-8378-7408>

### Information about the authors

**Anatoly V. Lastovka**,  
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,  
Associate Professor of the Department  
of Building Structures and Controlled Systems  
Siberian Federal University  
79 Svobodny Ave, Krasnoyarsk 660041,  
Russia,  
e-mail: last\_pro@mail.ru, office@sfu-kras.ru  
<https://orcid.org/0000-0003-0751-1631>

**Sergey V. Deordiev**,  
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,  
Head of the Department  
of Building Structures and Controlled Systems,  
Siberian Federal University,  
79 Svobodny Ave, Krasnoyarsk 660041,  
Russia,  
e-mail: deordievsv@yandex.ru  
<https://orcid.org/0000-0003-2026-820X>  
Author ID: 144121

**Arsenii K. Murzintcev**,  
Lead Engineer,  
JSC "Rosseti Yantar"  
34 Teatralnaya St., Kaliningrad 236022,  
Russia,  
e-mail: arseniimurzincev@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0001-8378-7408>

### Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

### Информация о статье

Статья поступила в редакцию 28.08.2023.  
Одобрена после рецензирования 12.09.2023.  
Принята к публикации 14.09.2023.

### Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

### Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

### Information about the article

The article was submitted 28.08.2023.  
Approved after reviewing 12.09.2023.  
Accepted for publication 14.09.2023.