

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2025. Т. 27. № 6. С. 272–281.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2025; 27 (6): 272–281.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 69.059.22

DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-6-272-281

EDN: LUIPJ

ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ГЛАВНЫХ БАЛОК МОСТОВ С ПРЕДНАПРЯЖЕНИЕМ КОМПОЗИТНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ В КАЧЕСТВЕ МАТЕРИАЛА УСИЛЕНИЯ

Дмитрий Николаевич Смердов¹, Максим Олегович Ящук²

¹*Сибирский государственный университет путей сообщения,
г. Новосибирск, Россия*

²*Ростовский государственный университет путей сообщения,
г. Ростов-на-Дону, Россия*

Аннотация. Актуальность работы обусловлена наличием на сети автомобильных дорог России большого парка мостовых сооружений с железобетонными пролетными строениями, рассчитанными на устаревшие нормативные нагрузки. Эти конструкции подвержены физическому износу, накоплению дефектов и моральному старению, что снижает их несущую способность и требует эффективных методов усиления.

Цель работы – обоснование методики расчета несущей способности железобетонных главных балок мостов, усиленных предварительно напряженными полимерными композиционными материалами (ПКМ), для восстановления и повышения их эксплуатационных характеристик.

Материалы и методы исследования включают анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) усиленного элемента в три стадии: от действия постоянных нагрузок, от преднапряжения ПКМ и в предельном состоянии. Анализ основан на методе предельных состояний с использованием нелинейных деформационных моделей бетона и арматуры. Расчетный подход верифицирован комплексными лабораторными испытаниями.

Результаты. Рассмотрены три стадии напряженно-деформированного состояния изгибаемого железобетонного элемента. Первая стадия соответствует действию усилий на главные балки от полных расчетных постоянных нагрузок, вторая стадия – действие усилий от предварительного напряжения полимерных композиционных материалов; третья стадия соответствует предельному состоянию с учетом напряженно-деформированного состояния конструкций первой и второй стадий. Показаны эпюры напряжений в разных стадиях напряженно-деформированного состояния сечения с учетом усиления балочного элемента.

Ключевые слова: углеродное волокно, преднапряженные полимерные композиционные материалы, несущая способность, деформация, напряженно-деформированное состояние, предел прочности, балка

Для цитирования: Смердов Д.Н., Ящук М.О. Обоснование методики расчета железобетонных главных балок мостов с преднапряжением композитными материалами в качестве материала усиления // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 6. С. 272–281. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-6-272-281. EDN: LUIPJ

ORIGINAL ARTICLE

CALCULATION TECHNIQUE OF REINFORCED CONCRETE BRIDGE BEAMS REINFORCED BY PRESTRESSED COMPOSITE MATERIALS

Dmitriy N. Smerdov¹, Maxim O. Yashchuk²¹Siberian State Transport University, Novosibirsk, Russia²Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russia

Abstract. The paper provides a rationale for the calculation technique of concrete beams reinforced by prestressed composite materials. Three stages of the stress-strain state of a bending reinforced concrete element are considered. The first stage includes forces affecting the main beams from full design constant loads, the second stage is the action of forces from the preliminary stress of polymer composite materials; the third stage is the ultimate state taking into account the stress-strain state of the two previous structures. Stress-strain curves are obtained for different stages, taking into account the beam reinforcement.

Purpose: Substantiation of the calculation technique for the bearing capacity of reinforced concrete beams reinforced with prestressed polymer composites for the restoration and improvement of their performance characteristics.

Design/methodology/approach: The analysis of numerical models of elements under loads and comparison of the obtained results with the laboratory experimental data. The limit-state-based analysis utilizes nonlinear deformation models of concrete and reinforcement. The calculation technique is verified by the laboratory tests.

Research findings: Theoretical and experimental studies substantiate the proposed calculation technique for reinforced concrete bridge beams reinforced with prestressed composite materials.

Practical implications: The calculation technique show a high accuracy in comparison with laboratory research.

Originality/value: Previously, there is no calculation technique for reinforced concrete beams reinforced with prestressed composite materials.

Keywords: carbon fiber, prestressed polymer composite materials, load-bearing capacity, deformation, stress-strain state, tensile strength, beam

For citation: Smerdov D.N., Yashchuk M.O. Calculation Technique of Reinforced Concrete Bridge Beams Reinforced by Prestressed Composite Materials. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2025; 27 (6): 272–281. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-6-272-281. EDN: LUHPIJ

На сети автомобильных дорог Российской Федерации насчитывается более 45 000 мостов [16]. Пролетные строения выполнены преимущественно из железобетона, но также существуют металлические и сталежелезобетонные. Наиболее часто встречающиеся конструкции главных балок железобетонных пролётных строений автодорожных мостовых сооружений: выпуск 56 инв. № 147/1, выпуск 56 (д) и серия 3.503.1-81. Представленные типы пролётных строений имеют ограниченный срок службы, не превышающий 35–40 лет. Следует обозначить, что данные главные балки пролётных строений запроектированы под старые проектные нагрузки: Н-30 – для выпуска соответственно 56 и 56 (д) и нагрузки А-11 – для серии 3.503.1-81. Основные недостатки данных нагрузок в сравнении с актуальной А-14 – затруднительный пропуск сверхнормативной нагрузки, сниженная грузоподъёмность и моральный износ конструк-

ций. Наиболее распространенные типы поперечных сечений главных балок пролетных строений мостов – это балки таврового поперечного сечения (рис. 1).

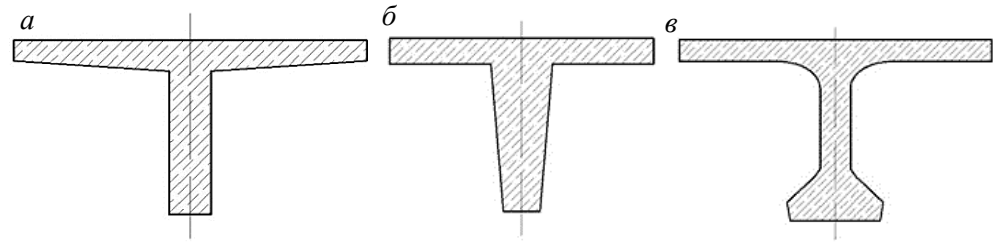


Рис. 1. Наиболее распространенные типы пролетных строений, запроектированные под старые нагрузки:

a – выпуск 56 инв. № 147/1; *б* – выпуск 56 (д); *в* – серия 3.503.1-81 [4]

Fig. 1. The most common types of span structures designed for former load values: *a* – issue 56 inv. No. 147/1; *b* – issue 56 (d); *c* – series 3.503.1-81 [4]

Пролетные строения мостов в процессе эксплуатации подвергаются физическому износу от интенсивной подвижной и тяжеловесной нагрузок, ударов негабаритных грузов, техногенных и природно-климатических воздействий – у балок пролетных строений появляются различные неисправности и дефекты [1–6], природа появления которых более подробно описана ниже.

1. Разрушение гидроизоляции проявляется в обводнении конструкций главных балок пролетного строения с последующим образованием коррозии на боковых гранях балки и ее нижнем поясе.

2. Удары от негабаритного транспорта и расположенных на нем грузов разрушают нижний пояс балок (образование сколов, продергивание арматурных стержней с одновременным выключением их из работы в зоне растяжения).

3. Отсутствие или низкое качество капитального ремонта является причиной устройства дорожной одежды с толщиной, превышающей нормативную (рис. 2).

4. Выщелачивание, характерные трещины, химическая коррозия с обнажением арматурного слоя, а также обрушение защитного слоя бетона связаны не только с разрушением гидроизоляции, но и с неправильным водоотводом с элементов мостового сооружения.

5. Дефекты и нарушение работоспособности деформационных швов отрицательно влияют на трещиностойкость балочных элементов моста: при их смещении или нарушении целостности может образовываться система трещин с раскрытием более 0,3–0,4 мм.

6. Раковины на поверхности главных балок пролетного строения – это один из технологических недостатков при бетонировании конструкции, в будущем непосредственно влияющий на снижение надежности работы конструкции.

7. Карбонизация поверхности бетона приводит к снижению его щелочности и, как следствие, к ускоренной коррозии арматуры.

Таким образом, данные дефекты и неисправности отрицательно влияют на несущую способность и со временем могут приводить мостовые сооружения к аварийному техническому состоянию с угрозой обрушения пролетных кон-

струкций мостов на участках автомобильных дорог. Эффективным способом восстановления несущей способности главных балок железобетонных пролетных строений мостов является метод усиления их полимерными композиционными материалами [7–15]. Дальнейшее развитие данного направления было связано с применением предварительно напряженных полимерных композиционных материалов – углеродных ламелей (преднапряженные ПКМ). При этом для использования предварительно напряженных ПКМ требовалась разработка технологии преднапряжения ламелей с использованием специальных устройств [13–16], а также проведение лабораторных экспериментов, которые были реализованы [11]. Следующий шаг, необходимый для полноценного внедрения в практику строительства мостов технологии преднапряжения ПКМ, – это разработка методики расчета главных балок железобетонных пролетных строений мостов, усиленных предварительно напряженными ПКМ, которая представлена ниже.

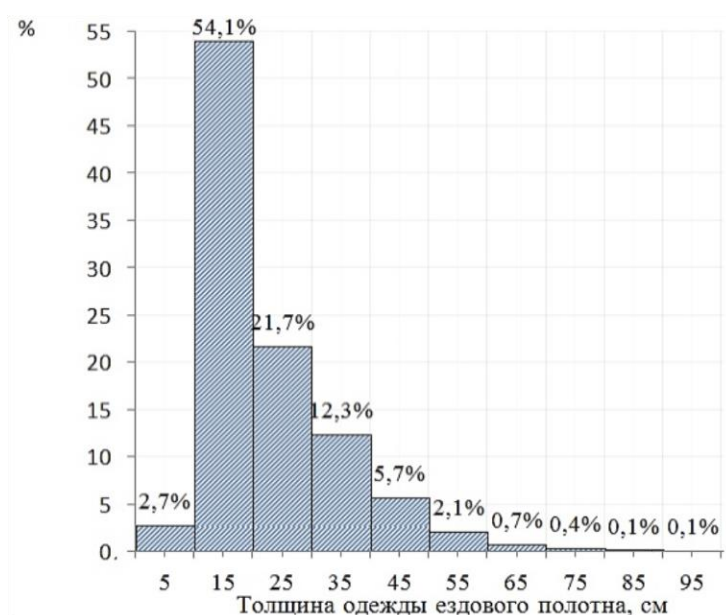


Рис. 2. Завышенная толщина дорожной одежды на автодорожных мостах [4]

Fig. 2. Excessive thickness of the road pavement on bridges

Методика расчета подразумевает рассмотрение трех стадий напряженно-деформированного состояния изгибаемого железобетонного элемента. Первая стадия соответствует действию усилий на главные балки от полных расчетных постоянных нагрузок, вторая стадия – действие усилий от предварительного напряжения полимерных композиционных материалов, третья стадия соответствует предельному состоянию с учетом напряженно-деформированного состояния конструкций первой и второй стадий.

На рис. 3 показано расположение внутренних усилий и формы эпюр нормальных напряжений в сжатой и растянутой зоне бетона для трех стадий напряженно-деформированного состояния для сечения.

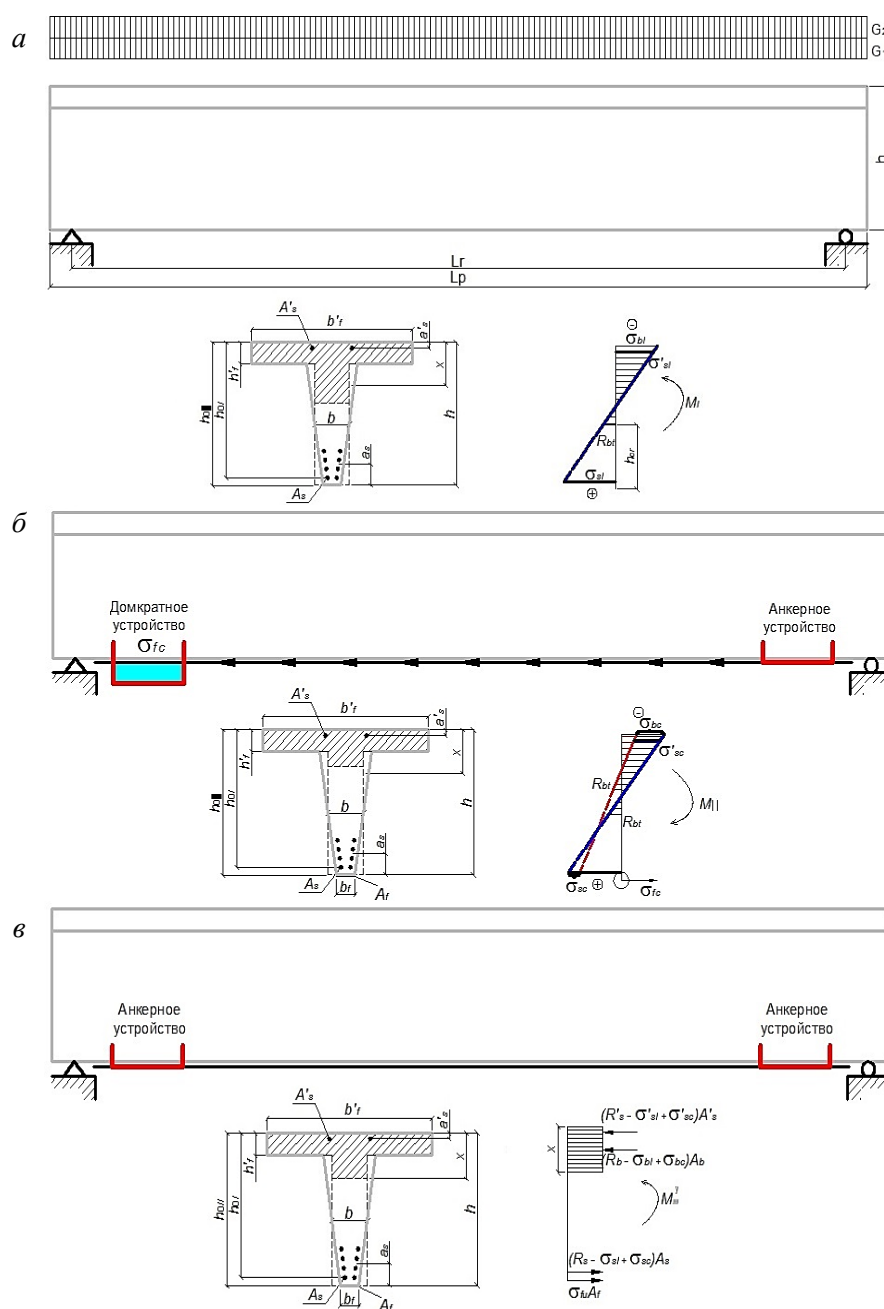


Рис. 3. Стадии работы изгибаемого железобетонного элемента:

a – стадия № 1 (нагрузка от собственного веса балки); *б* – стадия № 2 (стадия преднапряжения ПКМ, установленного на нижней грани балочного элемента); *в* – стадия № 3 (предельное состояние, полное включение в работу с балочным элементом материала ПКМ)

Fig. 3. Performance stages of a flexural reinforced concrete element:

a – stage 1 (dead load); *b* – prestress stage 2 (polymer composite installed on the lower beam edge); *c* – stage 3 (ultimate state, full engagement of the polymer composite)

При расчете усиленных железобетонных конструкций следует ограничивать напряжения в полимерном композиционном материале предельной величиной, что предотвращает возможность разрушения бетонного основания, на которое нанесен композиционный материал, или его возможное отслоение по контакту «клей-бетон». Значение предельных напряжений в материале усиления, расположенном на нижней грани балки, следует определять по формуле

$$\sigma_{fu} = k_s \sqrt{\frac{R_b E_{ft} b_f}{\sum t_f}} \leq \gamma_c (R_{ft} - \sigma_{fc}), \quad (1)$$

где k_s – коэффициент, учитывающий тип конструкции усиления; b_f – единичная ширина полосы материала усиления; t_f – толщина одного слоя композиционного материала, мм; E_{ft} – модуль упругости композиционного материала, МПа.

Нормальные напряжения σ_{bt} , σ_{st} , σ'_{st} , σ_{bc} , σ_{sc} и σ'_{sc} определяются с использованием нелинейной деформационной модели. Принятая в расчетах диаграмма деформирования бетона приведена на рис. 4. На участке диаграммы 0–1 зависимость между напряжениями и деформациями в бетоне принята по формуле $\sigma_b = E_b \varepsilon_b (1 - \omega)$, а на участке 0–2 – по формуле $\sigma_b = E_b \varepsilon_b$.

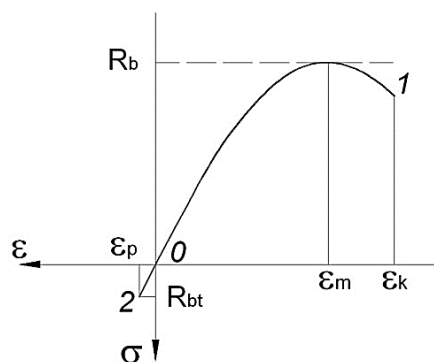


Рис. 4. Диаграмма деформирования бетона при одноосном сжатии и растяжении
Fig. 4. Stress-strain curve of concrete at uniaxial compression and tension

Функция пластичности для бетона принята в виде

$$\omega = \frac{E_b \varepsilon_b}{4R_b}, \quad (2)$$

где R_b – расчетное сопротивление бетона сжатию.

Диаграмма деформирования рабочей арматуры принята в виде диаграммы Прандтля (рис. 4). На участке диаграммы 0–1 напряжения в арматуре определяются по закону Гука [1], участок 1–2 соответствует площадке текучести, для которой $\sigma_s = R_s$ (рис. 5).

Относительные деформации в нормальном сечении элемента определяются по формуле

$$\varepsilon = \frac{M_{\omega} + M}{E_b I_{red}} y, \quad (3)$$

где M_{ω} – внутренний момент в нормальном сечении элемента от действия внешних сил; M – внешний изгибающий момент; I_{red} – приведенный момент инерции нормального сечения; y – координата по высоте сечения, начало которой расположено на уровне нейтральной оси.

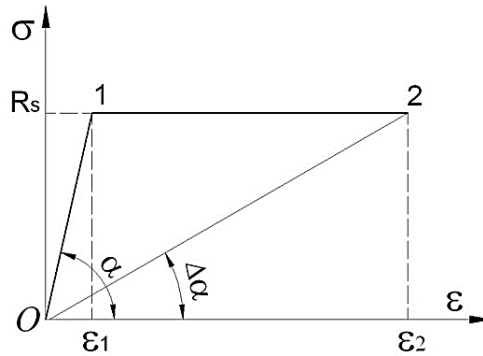


Рис. 5. Диаграмма деформирования арматуры
Fig. 5. Reinforcement strain diagram

Внутренний момент в нормальном сечении определяется по формуле

$$M_{\omega} = \sum_{i=1}^n \int_A \sigma_i^b y_i^b dA + \sum_{k=1}^m \sigma_k^s y_k^s A_k^s, \quad (4)$$

где n – количество слоев бетона в нормальном сечении с различными прочностными и деформативными характеристиками; m – количество стержней рабочей арматуры; A – площадь нормального сечения; A_k^s – площадь поперечного сечения k -го стержня рабочей арматуры.

Выводы

В результате проведенных экспериментальных испытаний [9, 11] создано обоснование инженерной методики расчета преднапряженных изгибаемых элементов по определению несущей способности усиленных железобетонных элементов мостов.

Методика расчета преднапряженных ПКМ изгибаемых железобетонных элементов основана на методе предельных состояний и учитывает три стадии напряженно-деформированного состояния эксплуатируемых главных балок железобетонных пролетных строений автодорожных мостов, подвергаемых усилению предварительно напряженными ПКМ.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Бокарев С.А., Власов Г.М., Неровных А.А., Смердов Д.Н. Коэффициенты надежности для композиционных материалов, применяемых для усиления железобетонных элементов мостовых конструкций // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2012. № 2 (35). С. 222–229.
2. 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.

3. Бокарев С.А., Устинов В.П., Яинов А.Н., Смердов Д.Н. Усиление пролетных строений с использованием композитных материалов // Путь и путевое хозяйство. 2008. № 6. С. 30–31.
4. Бокарев С.А., Яцук М.О. Усиление железобетонных пролетных строений мостов преднапряженными полимерными композиционными материалами // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2016. № 1 (61). С. 98–107. EDN: VTFJPP
5. Клементьев А.О., Смердов Д.Н., Смердов М.Н. Экспериментальные исследования прочности и деформативности изгибаемых железобетонных элементов, армированных в сжатой и растянутой зоне неметаллической композиционной арматурой // Транспорт Урала. 2014. № 4 (43). С. 50–55.
6. Неволин Д.Г., Клементьев А.О., Смердов Д.Н., Смердов М.Н. Методика расчета изгибаемых бетонных элементов, армированных полимерными композиционными материалами // Транспорт Урала. 2015. № 3 (46). С. 98–101.
7. Неволин Д.Г., Смердов М.Н., Смердов Д.Н. Экспериментальные исследования несущей способности железобетонных конструкций горнотехнических зданий и сооружений // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2015. № 8. С. 138–142.
8. Плевков В.С., Балдин И.В., Невский А.В. К определению расчетных напряжений в стальной и углекомпозитной арматуре нормальных сечений железобетонных элементов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2017. № 1 (60). С. 96–113.
9. Смердов Д.Н., Соловьев Л.Ю., Яцук М.О., Хамидуллина Н.В. Контроль усиления элементов мостов // Путь и путевое хозяйство. 2022. № 8. С. 22–23. EDN: YFEGHP
10. Смердов Д.Н., Клементьев А.О. Расчет по прочности сечений, нормальных к продольной оси изгибаемых железобетонных элементов с комбинированным армированием металлической и полимерной композиционной арматурой, с использованием нелинейной деформационной модели материалов // Наукоедение : интернет-журнал. 2017. Т. 9. № 1. С. 34.
11. Смердов Д.Н., Яцук М.О. Экспериментальные исследования несущей способности изгибаемых железобетонных элементов, усиленных преднапряженными полимерными композиционными материалами // Научный журнал строительства и архитектуры. 2019. № 3 (55). С. 72–83. EDN: EBFJY
12. Яцук М.О., Кобелев К.В. Особенности работы устройств для усиления конструкций железобетонных мостов с применением полимерных композиционных материалов // Транспорт: наука, образование, производство (Транспорт-2016) : труды Международной научно-практической конференции. Ростов-на-Дону : РГУПС, 2017. Т. 4. С. 142–145. EDN: XWVFVIZ
13. Яцук М.О. Программа лабораторных исследований железобетонных балок, усиленных преднапряженными полимерными композиционными материалами // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. 2017. № 3. С. 158–170. EDN: ZITQSD
14. Martynuk I., Popov O., Yashchuk M., Opatskikh A. Comparative analysis of methods for calculating the load capacity of a metal bridge span // International scientific siberian transport forum TRANSSIBERIA. 2021. V. 2. P. 529–537. DOI: 10.1007/978-3-030-96383-5_59. EDN: IBWANF
15. Klementev A.O., Smerdov D.N. Indicators of Reliability of Artificial Structures with Elements Made of Polymer Composite Materials at all Stages of their Life Cycle on the Basis of Risk Assessment // Transportation Research Procedia. 2017. V. 20. P. 624–629.
16. Smerdov D.N., Yashchuk M.O. Reinforced Concrete Elements Strengthened by Pre-stressed Fibre-reinforced Polymer (FRP) // Transportation Research Procedia. 2021. V. 54. P. 157–165.

REFERENCES

1. Bokarev S.A., Vlasov G.M., Nerovnykh A.A., Smerdov D.N. Composite Material Reliability for Reinforcing Bridge Concrete Elements. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2012; 2 (35): 222–229. (In Russian)
2. Bokarev S.A., Smerdov D.N., Nerovnykh A.A. Methodology for calculating the strength of sections of operated reinforced concrete spans reinforced with composite materials. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Stroitel'stvo*. 2010; 10 (622): 63–74. (In Russian)
3. Bokarev S.A., Ustinov V.P., Yashnov A.N., Smerdov D.N. Strengthening Spans Using Composite Materials. *Path and track management*. 2008; (6): 30–31. (In Russian)

4. Bokarev S.A., Yashchuk M.O. Reinforcement of Concrete Bridge Spans with Prestressed Polymer Composite Materials. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya*. 2016; 1 (61): 98–107. EDN: VTFJPP (In Russian)
5. Klementyev A.O., Smerdov D.N., Smerdov M.N. Strength and Deformability of Bending Reinforced Concrete Elements in Compressed and Tensile Zone with Non-Metallic Composite Reinforcement. *Transport of the Urals*. 2014; (4 (43)): 50–55. (In Russian)
6. Nevolin D.G., Klementyev A.O., Smerdov D.N., Smerdov M.N. Calculation method for bending concrete elements reinforced with polymer composite materials. *Transport Urala*. 2015; 3 (46): 98–101. (In Russian)
7. Nevolin D.G., Smerdov M.N., Smerdov D.N. Load-Bearing Capacity of Reinforced Concrete Structures of Mining Buildings. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal*. 2015; (8): 138–142. (In Russian)
8. Plevkov V.S., Baldin I.V., Nevsky A.V. Estimated Stresses in Steel and Carbon Reinforced Composite Rebar of Normal Sections in Concrete Structures. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2017; 1 (60): 96–113. (In Russian)
9. Smerdov D.N., Soloviev L.Yu., Yashchuk M.O., Khamidullina N.V. Reinforcement Control of Bridge Elements. In *Put' i putevye khozyaistvo*. 2022; (8): 22–23. EDN: YFEGHP (In Russian)
10. Smerdov D.N., Klementyev A.O. Strength Analysis of Sections Normal to Longitudinal Axis of Concrete Elements Reinforced with Metal and Polymer Composites using Nonlinear Deformation Model of Materials. *Naukovedenie: internet-zhurnal*. 2017; 9 (1): 34. (In Russian)
11. Smerdov D.N., Yashchuk M.O. Load-Bearing Capacity of Concrete Elements Reinforced with Prestressed Polymer Composite Materials. *Nauchnyi zhurnal stroitel'stva i arkhitektury*. 2019; 3 (55): 72–83. EDN: EBFIJY (In Russian)
12. Yashchuk M.O., Kobelev K.V. Operation of devices for structural reinforcement of concrete bridges with polymer composites. In: *Proc. Int. Sci. Conf. 'Transport: Science, Education, Production'*, vol. 4. Rostov-on-Don, 2017. Pp. 142–145. EDN: XWVIZ (In Russian)
13. Yashchuk M.O. Laboratory Research Program for Concrete Beams Reinforced with Prestressed Polymer Composites. *Transport. Transportnye sooruzheniya. Ekologiya*. 2017; (3): 158–170. EDN: ZITQSD (In Russian)
14. Martynyuk I., Popov O., Yashchuk M., Opatskikh A. Comparative Analysis of Methods for Calculating the Load Capacity of a Metal Bridge Span. In: *International Scientific Siberian Transport Forum TRANSSIBERIA*, vol. 2. 2021. Pp. 529–537. DOI: 10.1007/978-3-030-96383-5_59. EDN: IBWAHF
15. Klementev A.O., Smerdov D.N. Indicators of Reliability of Artificial Structures with Elements Made of Polymer Composite Materials at all Stages of their Life Cycle on the Basis of Risk Assessment. *Transportation Research Procedia*. 2017; 20: 624–629.
16. Smerdov D.N., Yashchuk M.O. Reinforced Concrete Elements Strengthened by Pre-stressed Fibre-Reinforced Polymer (FRP). *Transportation Research Procedia*. 2021; 54: 157–165.

Сведения об авторах

Смердов Дмитрий Николаевич, канд. техн. наук, доцент, Сибирский государственный университет путей сообщения, 630049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191, DNS-smerdov@mail.ru

Ящук Максим Олегович, ст. преподаватель, Ростовский государственный университет путей сообщения, 344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, 2, maxum1986@gmail.com

Authors Details

Dmitriy N. Smerdov, PhD, A/Professor, Siberian State Transport University, 191, Dusi Koval'chuk St., 630049, Novosibirsk, Russia, DNSsmerdov@mail.ru

Maxim O. Yashchuk, Senior Lecturer, Rostov State Transport University, 2, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya Sq., 344038, Rostov-on-Don, Russia, maxum1986@gmail.com

Вклад авторов

Смердов Д.Н. – концепция теоретического исследования, общее руководство работой, методология, проверка и утверждение выводов, редактирование финального текста.

Яцук М.О. – сбор и систематизация литературных источников, проведение анализа данных, подготовка исходного текста рукописи, оформление списка литературы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authors contributions

Smerdov D.N. – conceptualization, supervision, methodology, writing–review and editing.

Yashchuk M.O. – literature, data analysis, writing–original draft preparation.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 27.10.2025

Одобрена после рецензирования 18.11.2025

Принята к публикации 18.11.2025

Submitted for publication 27.10.2025

Approved after review 18.11.2025

Accepted for publication 18.11.2025