



УДК 624.012

DOI: 10.22227/2949-1622.2023.3.86-95

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/ RESEARCH ARTICLE

Восстановление железобетонных конструкций на примере пролетных строений мостов, поврежденных в результате динамических воздействий

О.А. Симаков^{1*}

¹Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Российская Федерация

*simakovoa@mgsu.ru

Ключевые слова: восстановление, усиление, динамическое воздействие, внешнее армирование.

История статьи

Поступила в редакцию: 03.04.2023

Доработана: 15.04.2023

Принята к публикации: 21.04.2023

Для цитирования

Симаков О.А. Восстановление железобетонных конструкций на примере пролетных строений мостов, поврежденных в результате динамического воздействия, Железобетонные конструкции. 2023. Т. 3. № 3. С. 86–94.

Аннотация. Проблема восстановления железобетонных конструкций, получивших динамические воздействия (в результате столкновения с автотранспортом, повреждения в результате демонтажа близлежащих конструкций, взрывные и иные аварийные воздействия), является достаточно актуальным вопросом. Действующие нормативные документы в части восстановления и усиления железобетонных конструкций не в полной мере соответствуют именно вопросам, связанным с результатами динамических воздействий, имеющих характерные особенности. Также объем опубликованных научных работ по данной тематике не является достаточным и подразумевает необходимость дальнейших исследований. Тем не менее к настоящему времени проведено определенное количество работ по восстановлению таких конструкций с последующими испытаниями и подтверждением необходимого уровня надежности. В статье рассмотрен опыт восстановления железобетонных конструкций пролетных строений мостов, получивших повреждения в результате динамического удара от автотранспорта – результаты дорожно-транспортных происшествий. Проведен анализ и рассмотрены характерные повреждения, а также наиболее целесообразные варианты восстановления конструкций. Основным рекомендованным вариантом усиления является усиление конструкций с применением внешнего армирования на основе композиционных материалов из углеволокна. Приведены результаты как расчетного обоснования, так и результаты статических испытаний в лабораторных условиях и реальных конструкций после восстановления.

Reconstruction of Reinforced Concrete Structures on The Example of Bridge Spans Damaged as a Result of Dynamic Impacts

Oleg A. Simakov^{1*}

¹Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), Moscow, Russian Federation

*simakovoa@mgsu.ru

Олег Александрович Симаков, канд. техн. наук, доцент каф. Железобетонные и каменные конструкции, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; eLIBRARY SPIN-код: 2040-7137, Scopus: 57193263878, ResearcherID: AAG-1930-2022, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6665-4291>, E-mail: simakovoa@mgsu.ru.

© Симаков О.А., 2023



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Keywords: restoration, reinforcement, dynamic impact, external reinforcement

Article history

Received: 03.04.2023

Revised: 15.04.2023

Accepted: 21.04.2023

For citation

Simakov O.A. Reconstruction of Reinforced Concrete Structures on the Example of Bridge Spans Damaged as a Result of Dynamic Impacts. *Reinforced concrete structures*. 2023;3(3):86–94.

Abstract. The problem of restoring reinforced concrete structures that have received dynamic impacts (emergency as a result of collisions with vehicles, damage as a result of dismantling nearby structures, explosive impacts) is quite an urgent issue. The current regulatory documents regarding the restoration and reinforcement of reinforced concrete structures do not fully correspond to the issues related to the results of dynamic impacts that have characteristic features. Also, the volume of published scientific papers on this topic is not sufficient and implies the need for further research. Nevertheless, to date, a certain amount of work has been carried out to restore such structures with subsequent tests and confirmation of the required level of reliability. The article considers the experience of restoring reinforced concrete structures of bridge spans that were damaged as a result of dynamic impact from vehicles - the result

ВВЕДЕНИЕ

Железобетонные конструкции по результатам непроектных, как правило, аварийных динамических нагрузок (наезд авто или железнодорожного транспорта, аварии в ходе технологических процессов или реконструкции, взрывные воздействия) требуют того или иного уровня восстановления. Оценить объем значимых повреждений, требующих проведения не только восстановительных работ, но и усиления конструкций, по отношению к незначительным повреждениям, для которых достаточно восстановления защитного слоя, не представляется возможным.

В то же время имеется целый ряд объектов – пролетные строения мостов, для которых были выполнены работы по восстановлению и усилению несущей способности. Для данных конструкций характерны динамические повреждения от наезда негабаритного автотранспорта.

КЛАССИФИКАЦИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ

Вопросам оценки несущей способности железобетонных конструкций, получивших динамические повреждения [1-4], а также применения композитных материалов для усиления [1, 5-11] посвящено целый ряд исследований, нормативных документов и методических материалов.

Повреждения в результате столкновения автомашин с пролетными строениями можно разделить на следующие [12-20]:

- незначительные (рис. 1.а). При этом арматура не повреждена, повреждения только в защитном слое бетона (фиксируются на основе ультразвукового исследования либо непосредственно вскрытия конструкции). Как правило, в данном случае применяются методы восстановления бетона специальными ремонтными составами;
- значительные повреждения (рис. 1.б). При этом фиксируются повреждения в том числе рабочей арматуры. Требуется усиление конструкций или замена конструкции в целом. Возможны различные варианты усиления с повышением несущей способности;
- обрушение конструкций. В данном случае возможно только устройство новых обрушенных элементов.

Рассматривая значительные повреждения, можно выделить следующие характерные варианты повреждения (рис. 2):

Oleg A. Simakov, Candidate of Technical Sciences, Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoe highway, Moscow, 129337, Russian Federation, eLIBRARY SPIN-код: 2040-7137, Scopus: 57193263878, Researcher ID: AAG-1930-2022, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6665-4291>, E-mail: simakovoa@mgsu.ru.



Рисунок 1. Повреждения конструкций пролетных строений: *a*–незначительные; *b*–значительные, требующие усиления;

Figure 1. Damage to superstructure structures: *a*–minor; *b*–significant, requiring reinforcement

- продольная трещина вдоль балки (рисунок 2.а). Трещина, как правило, на глубину до 80 мм (определяется на основе ультразвукового исследования) и расположена в верхней части стенки – при ударе место максимального момента (действие нагрузки из плоскости балки). При этом фактически рабочей арматурой становится поперечная арматура, которой недостаточно для восприятия данной нагрузки;

- локальное разрушение бетона с повреждение стержней рабочей арматуры (рис. 2.б). Особую опасность представляет повреждение напрягаемой рабочей арматуры, которой насыщена (как правило в пределе) нижняя часть балки. На данный момент не известно исследований и соответственно отсутствуют нормативные документы, позволяющие оценить остаточной ресурс поврежденной напрягаемой арматуры (канаты). В этой связи, учитывая уровень ответственности конструкции, поврежденные стержни в последующей работе не учитываются.

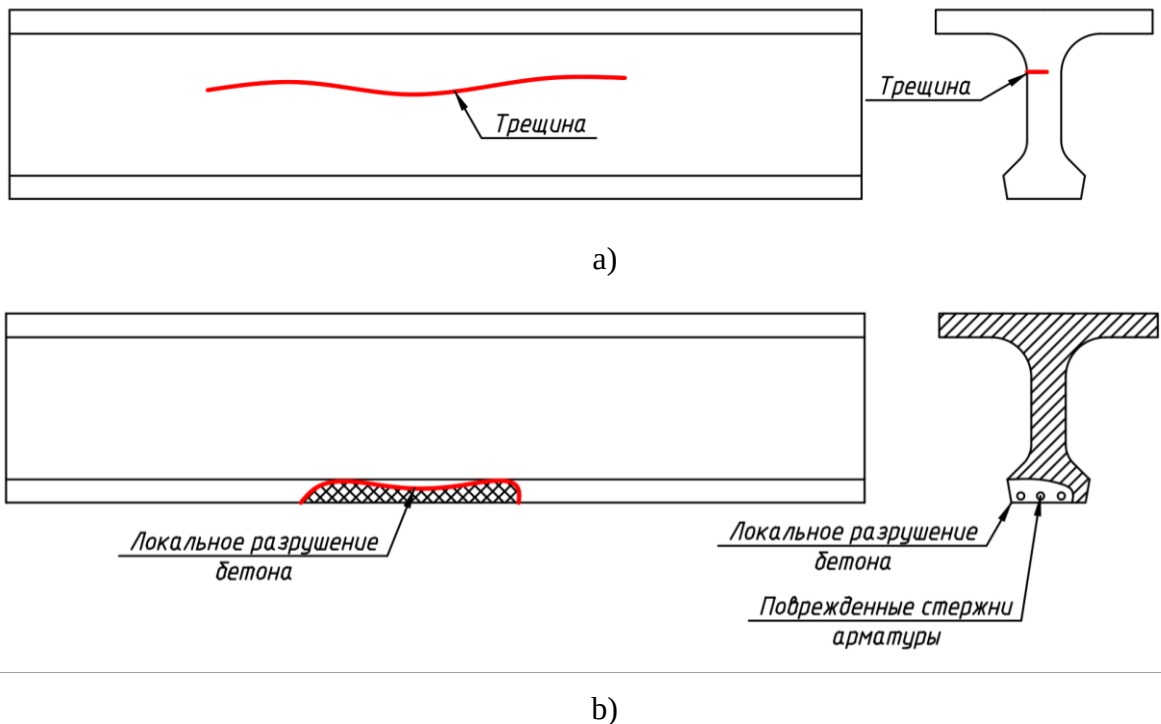


Рисунок 2. Классификация значительных повреждений пролетных строений мостов: *a*–продольная трещина в стенке; *b*–локальное разрушение бетона;

Figure 2. Classification of significant damage to bridge spans: *a*–longitudinal crack in the wall; *b*–local destruction of concrete

МЕТОД

В случае повреждения пролетного строения с образованием продольной трещины без повреждения рабочей напрягаемой арматуры фактическое усиление сводится к ремонту данной трещины и восстановлению поврежденной поперечной арматуры. Наиболее целесообразно выполнять усиление системами внешнего армирования на основе углеродных волокон по схеме на рис. 3. На данном рисунке представлено как исходное состояние конструкции до усиления, так и результат восстановления.



a)



b)

Рисунок 3. Повреждения конструкций пролетных строений: а) общий вид; б) восстановление поврежденной балки

Figure 3. Damage to superstructure structures: a) close view; b) restoration of a damaged beam

Вертикальное армирование типовых балок наиболее применимых серий составляет А400 Ø8-12 с шагом 100-200 мм.

Методика расчета наклонных сечений с внешним армированием представлена в [5, 6] и подразумевает учет внешнего армирования на основе углеродных волокон по формулам (1) по стандарту [5] и (2) по [5]:

$$F_k \geq \frac{\Delta Q}{\sum \sigma_k \sin \alpha}, \tag{1}$$

где F_k – площадь сечения ленты на длине пересечения ее возможной трещины; σ_k – предельные напряжения во внешнем армировании, определяются, как не более 0,9 от расчетного сопротивления внешнего армирования; α – угол наклона элементов внешнего армирования к горизонту.

$$Q_{fw} = \psi_f \frac{A_{fw} \cdot R_{fw} \sin \alpha \cdot C_{fw}}{s_f}, \tag{2}$$

где ψ_f - коэффициент, зависящий от принятой схемы наклейки и принимается равным 0,85 для двух и трехсторонних хомутов, A_{fw} – площадь поперечного сечения внешнего армирования, R_{fw} – расчетное сопротивление внешнего поперечного армирования, C_{fw} – длина проекции наклонного сечения, s_f – шаг хомутов.

Оценивая эффективность внешнего армирования для характерного сечения балки, можно получить следующее требуемое внешнее армирование (применяются углеродные ленты, возможно применение углеродных сеток, применение ламинатов не допустимо) для компенсации поврежденной арматуры (табл. 1).

Таблица 1

Эквивалентные параметры внешнего армирования для компенсации поперечной арматуры

№ п/п	Поврежденная арматура	Методика [6]	Методика [7]
1.	A400 Ø8 шаг 200	плотность 230, ширина 150 шаг 300	плотность 230, ширина 150 шаг 450
2.	A400 Ø10 шаг 150	плотность 300, ширина 150 шаг 300	плотность 300, ширина 150 шаг 300
3.	A400 Ø12 шаг 100	плотность 530, ширина 300 шаг 400	плотность 530, ширина 300 шаг 500

Table 1

Equivalent parameters of external reinforcement to compensate for transverse reinforcement

#	Damaged reinforcement	Method [6]	Method [7]
1.	A400 Ø8 шаг 200	density 230, width 150 space 300	density 230, width 150 space 450
2.	A400 Ø10 шаг 150	density 300, width 150 space 300	density 300, width 150 space 300
3.	A400 Ø12 шаг 100	density 530, width 300 space 400	density 530, width 300 space 500

С усилением пролетных балок в случае повреждения продольных стержней ситуация обстоит сложнее по следующим аспектам:

- с учетом армирования канатной арматурой и невозможности оценки остаточного ресурса элементов, имеющих те или иные повреждения (рис. 4), необходимо полностью компенсировать поврежденные арматурные стержни;

- площадь внешнего продольного армирования ограничена в том числе габаритами нижней плоскости, по которой выполняется усиление (усиление по боковым поверхностям нижней части балка не эффективно).



Рисунок 4. Значительные повреждения балки, повреждение рабочей арматуры
Figure 4. Significant damage to the beam, damage to the working fittings

В общем виде схема усиления представлена на рис. 5.

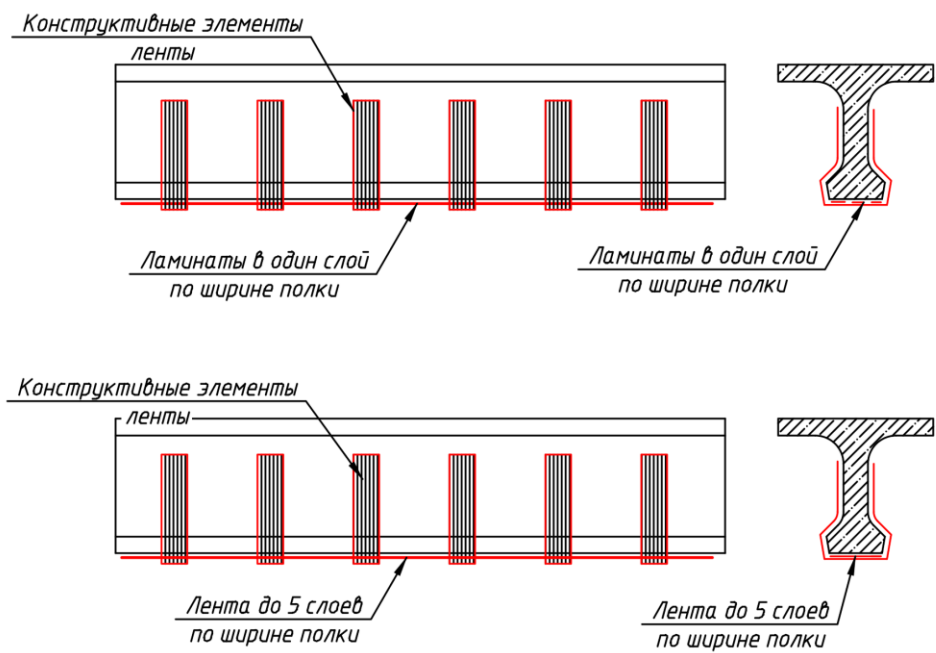


Рисунок 5. Характерная схема усиления нормального сечения пролетного строения
Figure 5. Characteristic scheme of reinforcement of the normal section of the superstructure

Расчет данного усиления возможен по методикам [5-8]. При этом свод правил допускает применение деформационной модели (рис. 6) (1):

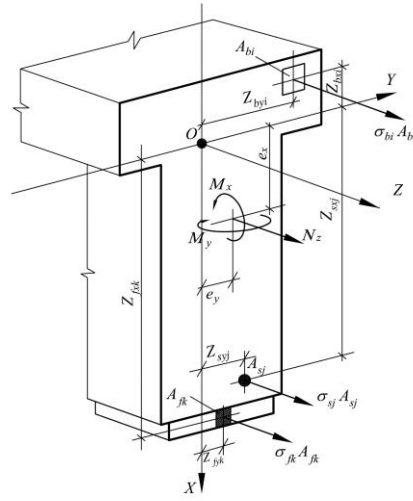


Рис. 6. Расчетная схема
Figure 6. Design scheme

$$\begin{aligned}
 M_y &= \sum_i \sigma_{bi} A_{bi} Z_{byi} + \sum_j \sigma_{sj} A_{sj} Z_{syj} + \sum_k \sigma_{fk} A_{fk} Z_{fyk}, \\
 M_x &= \sum_i \sigma_{bi} A_{bi} Z_{bxi} + \sum_j \sigma_{sj} A_{sj} Z_{sxj} + \sum_k \sigma_{fk} A_{fk} Z_{fxk}, \\
 N_z &= \sum_i \sigma_{bi} A_{bi} + \sum_j \sigma_{sj} A_{sj} + \sum_k \sigma_{fk} A_{fk}, \\
 \varepsilon_{bi} &= \varepsilon_0 + \frac{1}{r_x} Z_{bxi} + \frac{1}{r_y} Z_{byi}, \\
 \varepsilon_{sj} &= \varepsilon_0 + \frac{1}{r_x} Z_{sxj} + \frac{1}{r_y} Z_{syj}, \\
 \varepsilon_{fk} &= \varepsilon_0 + \frac{1}{r_x} Z_{fxk} + \frac{1}{r_y} Z_{fyk}, \\
 \sigma_{bi} &= E_b \cdot \nu_{bi} \cdot \varepsilon_{bi}, \\
 \sigma_{sj} &= E_{sj} \cdot \nu_{sj} \cdot \varepsilon_{sj}, \\
 \sigma_f &= E_f \cdot (\varepsilon_f - \varepsilon_{bt}^0) \geq 0.
 \end{aligned} \tag{1}$$

Результаты сопоставительного расчета показывают следующие возможные вариации восстановления поврежденной рабочей арматуры – табл. 2.

Таблица 2

Варианты усиления			
№ п/п	Поврежденная арматура	Эквивалентное сечение усиления углеродными лентами	Эквивалентное сечение усиления углеродными ламинатами
1.	Канаты К-7 (1 шт)	Лента 2 х 300х530 (плотность)	Ламинат 100х1,2(δ)
2.	Канаты К-7 (5 шт)	Лента 5 х 300х530 (плотность)	Ламинат 3 х 100х1,4(δ)
3.	Канаты К-7 (7 шт)	Невозможно	Ламинат 4 х 100х1,4(δ)

Table 2

Reinforcement options			
#	Damaged reinforcement	Equivalent cross-section of carbon ribbon reinforcement	Equivalent cross-section reinforcement with carbon laminates
1.	Ropes K-7 (1 units)	ribbon 2 x 300x530 (density)	laminate 100x1.2(δ)
2.	Ropes K-7 (5 units)	ribbon 5 x 300x530 (density)	laminate 3 x 100x1.4(δ)
3.	Ropes K-7 (7 units)	Unable	laminate 4 x 100x1.4(δ)

ПРАКТИЧЕСКОЕ ПОДТВЕРЖДЕНИЕ

Практическое подтверждение безопасной эксплуатации усиленных внешним армированием пролетных строений мостов регулярно подтверждается натурными испытаниями – на конструкцию мостового полотна в определенном порядке выстраивают колонну груженных самосвалов (нагрузка уточняется взвешиванием). Прочность и безопасная эксплуатация подтверждается: расчетным обоснованием, натурными испытаниями в ходе которых контролируется трещинообразование и деформации.

С учетом проведенных усилений, а также регулярным мониторингом (достоверно известно о более 7-ми-летнем мониторинге одного из мостов) можно говорить о достаточном уровне надежности данных конструкций.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Внешнее армирование на основе композитных материалов позволяет выполнить ремонт и усиление существующих пролетных строений мостов в большинстве случаев. При этом существуют различные методики расчета, представленные в нормативных документах различного уровня и направления. По большей части следует ориентироваться на методики, апробированные для данного направления, т.к. рекомендации по расчету железобетонных конструкций с усилением внешним армированием по большей части эмпирические, соответственно показывают наилучшую сходимость с натурными экспериментами применительно к соответствующим типам и размерам конструкций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Рассмотрены основные варианты повреждения пролетных конструкций мостов в результате динамических воздействия (как правило аварии с автотранспортом). Приведена классификация характерных дефектов и повреждений.

2. По результатам проведен расчетный анализ возможных повреждений пролетных строений, которые можно восстановить без демонтажа конструкций с применением композитных материалов на основе углеродных волокон. Произведена оценка различных материалов для усиления конструкций, которая показала наибольшую эффективность ламинатов по отношению к углеродным лентам.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает благодарность организациям ООО «КСС» г. Москва, ТОО «Geo-Star» г. Алматы, за предоставленные материалы и консультации по реально выполненным работам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шилин А.А., Пиеничный В.А., Картузов Д.В. Усиление железобетонных конструкций композиционными материалами. М.: «Стройиздат», 2004
2. Алексейцев А.В. Анализ устойчивости колонны при горизонтальных ударных воздействиях, Железобетонные конструкции. 2023. Т. 2. № 2. С. 3–12
3. Тамразян А.Г. Методология анализа и оценки надежности состояния и прогнозирование срока службы железобетонных конструкций, Железобетонные конструкции. 2023. Т. 1. № 1. С. 5–18.
4. Галютудинов З.Р. Исследование железобетонных балок на податливых опорах при кратковременном динамическом нагружении, Железобетонные конструкции. 2023. Т. 1. № 1. С. 28–36
5. ОДМ 218.3.027-2013 Рекомендации по применению тканевых композиционных материалов при ремонте железобетонных конструкций мостовых сооружений. М.: Росавтодор, 2015.
6. СП 164.1325800.2014 Усиление железобетонных конструкций композитными материалами. Правила проектирования. (Изм. №1). М., 2021.
7. Руководство по усилению железобетонных пролетных строений железнодорожных мостов системой внешнего армирования на основе углеродных волокон. Утверждено Распоряжением ОАО "РЖД" от 19.12.2013 № 2805р.
8. ACI 440.2R-17. Guide to the Design and Construction of Externally Custom FRP Systems for Strengthening Concrete Structures.
9. Breveglieri M., Barrouche JA, Dalfré M., Aprile A. Parametric study of the effectiveness of the NSM technique for strengthening the flexural continuous RC plates, Composites Part B: Engineering. 2012. 43 (4). Pp. 1970-1987.
10. Lu T., Lopish S.M., Lopish A.V. Neutral axis depth and moment redistribution in FRP and reinforced concrete beams are continuous, Composites Part B: Engineering. 2015. 70. Pp. 44-52.
11. Польской П.П., Махляк Д.Р. Композитные материалы – как основа эффективности в строительстве и реконструкции зданий и сооружений, Инженерный вестник Дона. 2012. № 4. URL: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n4p2y2012/1307>
12. Soheli K.M.A., Al-Jabri K., Al-Abri A.H.S. Behavior and design of reinforced concrete building columns subjected to low-velocity car impact, Structures. Elsevier, 2020. Vol. 26, № May. P. 601–616.
13. Yi N.H. et al. Collision capacity evaluation of RC columns by impact simulation and probabilistic evaluation, Journal of Advanced Concrete Technology. 2015. Vol. 13, № 2. P. 67–81.
14. Abdelkarim O.I., ElGawady M.A. Dynamic and static behavior of hollow-core FRP-concrete-steel and reinforced concrete bridge columns under vehicle collision, Polymers (Basel). 2016. Vol. 8, № 12. P. 1–17.
15. Wu M., Jin L., Du X. Dynamic responses and reliability analysis of bridge double-column under vehicle collision, Eng Struct. Elsevier, 2020. Vol. 221, № June. P. 111035.
16. Li R.W., Zhou D.Y., Wu H. Experimental and numerical study on impact resistance of RC bridge piers under lateral impact loading, Eng Fail Anal. 2020. Vol. 109, № November 2019. P. 1–19.
17. Demartino C., Wu J.G., Xiao Y. Response of shear-deficient reinforced circular RC columns under lateral impact loading, Int J Impact Eng. 2017. Vol. 109. P. 196–213.
18. Liu B. et al. Experimental investigation and improved FE modelling of axially-loaded circular RC columns under lateral impact loading, Eng Struct. Elsevier Ltd, 2017. Vol. 152. P. 619–642.
19. Yan J. et al. Experimental and numerical analysis of CFRP strengthened RC columns subjected to close-in blast loading, Int J Impact Eng. Elsevier, 2020. Vol. 146, № May. P. 103720.
20. Gholipour G., Zhang C., Mousavi A.A. Numerical analysis of axially loaded RC columns subjected to the combination of impact and blast loads, Eng Struct. Elsevier, 2020. Vol. 219, № January. P. 110924.

REFERENCES

1. Shilin A.A., Pshenichny V.A., Kartuzov D.V. Strengthening reinforced concrete structures with composite materials. Moscow: "Stroyizdat", 2004
2. Alekseytsev A.V. Stability of the RC Column under Horizontal Impacts. *Reinforced concrete structures*. 2023;2(2). Pp. 3-12. (In Russ.) <https://doi.org/10.22227/2949-1622.2023.2.3-12>
3. Tamrazian A.G. Methodology for the Analysis and Assessment of the Reliability of the State and Prediction the Service Life of Reinforced Concrete Structures. *Reinforced concrete structures*. 2023;1(1). Pp.5-18. (Рус.)
4. Galyautdinov Z.R. Study of Reinforced Concrete Beams on Yielding Supports under Short-Term Dynamic Loading. *Reinforced concrete structures*. 2023;1(1). Pp. 28-36. (Рус.)

5. ODM 218.3.027-2013 Recommendations for the use of fabric composite materials in the repair of reinforced concrete structures of bridge structures. Moscow: Rosavtodor, 2015.
6. SP 164.1325800.2014 Reinforcement of reinforced concrete structures with composite materials. Design rules. (Change No. 1). Moscow, 2021.
7. Guidelines for strengthening reinforced concrete spans of railway bridges with an external reinforcement system based on carbon fibers. Approved by Order of Russian Railways OJSC dated December 19, 2013 No. 2805p.
8. ACI 440.2R-17. Guide to the Design and Construction of Externally Custom FRP Systems for Strengthening Concrete Structures.
9. Breveglieri M., Barrouche JA, Dalfré M., Aprile A. Parametric study of the effectiveness of the NSM technique for strengthening the flexural continuous RC plates. *Composites Part B: Engineering*. 2012. 43(4). pp. 1970-1987.
10. Lu T., Lopish S.M., Lopish A.V. Neutral axis depth and moment redistribution in FRP and reinforced concrete beams are continuous. *Composites Part B: Engineering*. 2015. 70. Pp. 44-52.
11. Polskoy P.P., Mailyan D.R. Composite materials - as a basis for efficiency in the construction and reconstruction of buildings and structures. *Engineering Bulletin of the Don*. 2012. No. 4. URL: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n4p2y2012/1307>.
12. Sohel K.M.A., Al-Jabri K., Al Abri A.H.S. Behavior and design of reinforced concrete building columns subjected to low-velocity car impact. *Structures. Elsevier*. 2020. Vol. 26, № May. P. 601–616.
13. Yi N.H. et al. Collision capacity evaluation of RC columns by impact simulation and probabilistic evaluation. *Journal of Advanced Concrete Technology*. 2015. Vol. 13, № 2. P. 67–81.
14. Abdelkarim O.I., ElGawady M.A. Dynamic and static behavior of hollow-core FRP-concrete-steel and reinforced concrete bridge columns under vehicle collision. *Polymers (Basel)*. 2016. Vol. 8, № 12. P. 1–17.
15. Wu M., Jin L., Du X. Dynamic responses and reliability analysis of bridge double-column under vehicle collision. *Eng Struct*. 2020. Vol. 221, № June. P. 111035.
16. Li R.W., Zhou D.Y., Wu H. Experimental and numerical study on impact resistance of RC bridge piers under lateral impact loading. *Eng Fail Anal*. 2020. Vol. 109, № November 2019. P. 1–19.
17. Demartino C., Wu J.G., Xiao Y. Response of shear-deficient reinforced circular RC columns under lateral impact loading. *Int J Impact Eng*. 2017. Vol. 109. P. 196–213.
18. Liu B. et al. Experimental investigation and improved FE modeling of axially-loaded circular RC columns under lateral impact loading. *Eng Struct*. 2017. Vol. 152. P. 619–642.
19. Yan J. et al. Experimental and numerical analysis of CFRP strengthened RC columns subjected to close-in blast loading. *Int J Impact Eng*. 2020. Vol. 146, № May. P. 103720.
20. Gholipour G., Zhang C., Mousavi A.A. Numerical analysis of axially loaded RC columns subjected to the combination of impact and blast loads. *Eng Struct*. 2020. Vol. 219, № January. P. 110924.