



УДК 624.012

DOI: 10.22227/2949-1622.2025.1.18-25

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/RESEARCH ARTICLE

Численно-экспериментальные исследования преднапряженных сталебетонных балок

Ф.С. Замалиев*, Д.Ю. Филиппов

Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КГАСУ), Казань, Российская Федерация

* zamaliev49@mail.ru

Ключевые слова: сталебетонная балка, преднапряжение, численные исследования, образцы, натурные испытания

История статьи

Поступила в редакцию: 01.02.2025

Доработана: 20.02.2025

Принята к публикации: 28.02.2025

Для цитирования

Замалиев Ф.С., Филиппов Д.Ю. Численно-экспериментальные исследования преднапряженных сталебетонных балок // Железобетонные конструкции. 2025. Т. 9. № 1. С. 18–25.

Аннотация. Идея преднапряжения в железобетонных конструкциях достаточно широко применяется. Особенности напряженно-деформированного состояния преднапряженных железобетонных элементов изложены во многих научных статьях, разработаны рекомендации по способам преднапряжения. Использование преднапряжения в сталебетонных конструкциях достаточно новое явление. В СП 266.1325800.2016 по преднапряжению сталежелезобетонных конструкций рекомендации отсутствуют.

Цель исследования — оценка влияния предварительного напряжения на напряженно-деформированное состояние сталебетонных балок. Применение предварительного напряжения в сталебетонных балках позволяет оптимизировать их материалоемкость. Приведены методика и результаты численных исследований на основе компьютерного моделирования. Проведены экспериментальные исследования сталебетонных балок. Дан анализ результатов натурных испытаний и сравнение их с данными численных экспериментов.

Numerical and Experimental Investigations of Prestressed Steel-Concrete Beams

F.S. Zamaliev*, D.Yu. Filippov

Kazan State University of Architecture and Civil Engineering (KSUACE), Kazan, Russian Federation

* zamaliev49@mail.ru

Keywords: steel-concrete beam, prestressing, numerical studies, specimens, full-scale tests

Article history

Received: 01.02.2025

Revised: 20.02.2025

Accepted: 28.02.2025

Abstract. The idea of prestressing in reinforced concrete structures is widely used. Peculiarities of stress-strain state of prestressed reinforced concrete elements are described in many scientific articles, recommendations on prestressing methods are developed. The use of prestressing in steel-concrete structures is quite a new phenomenon. In SP 266.1325800.2016 there are no recommendations on prestressing of steel-reinforced concrete structures.

The aim of the study is to evaluate the effect of prestressing on the stress-strain state of steel-concrete beams.

Фарит Сахапович Замалиев, к.т.н., доцент кафедры Металлических конструкций и испытания сооружений, Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КГАСУ), 420043, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1; eLIBRARY SPIN-код: 4926-5781, ORCID: 0000-0002-3563-2994, E-mail: zamaliev49@mail.ru

Денис Юрьевич Филиппов, аспирант кафедры Металлических конструкций и испытания сооружений, Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КГАСУ), 420043, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1

© Замалиев Ф.С., Филиппов Д.Ю., 2025



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

For citation

Zamaliyev F.S., Filippov D.Yu. Numerical and Experimental Investigations of Prestressed Steel-Concrete Beams. *Reinforced concrete structures*. 2025; 1(9):18-25.

Application of prestressing in steel-concrete beams allows to optimize their material intensity. The methodology and results of numerical investigations on the basis of computer modeling are given. Experimental studies of steel-concrete beams are carried out. The results of full-scale tests are analyzed and compared with the data of numerical experiments.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность применения сталежелезобетонных конструкций в гражданском и промышленном строительстве с каждым годом возрастает. Применение преднапряжения в сталежелезобетонных конструкциях находится у нас в стране в начальной стадии, что также подтверждают новые технические решения, на которые выданы патенты [1], при этом отмечается, что необходимы научные исследования, после которых появятся рекомендации по применению преднапряжения в сталежелезобетонных конструкциях.

В обзорных статьях [2, 3] даны сегодняшнее состояние и перспективы развития сталежелезобетонных обычных конструкций, без преднапряжения. В статье [4] тоже без преднапряжения приведен параметрический анализ и тенденции исследований составных балок. В работе [5] представлены испытания плит на основе стального профнастила, совместно работающих со сталебетонными балками. Статья [6] посвящена экспериментальным исследованиям сталебетонных балок, где показан механизм передачи внутренних усилий от стальной части к бетону. Результаты численных и экспериментальных исследований и их сопоставление, а также напряженно-деформированное состояние стыка слоев отражены в статье [7]. Статья [8] посвящена вопросам применения сталежелезобетонных перекрытий в восстанавливаемых перекрытиях архитектурных памятников старой постройки. Источник [9] отражает особенности работы составных изгибаемых элементов, которые объединены вертикальными связями слоев. В статье [10] имеются результаты экспериментально-теоретических исследований сборных железобетонных балок с преднапряжением и без него. Статья [11] отражает работу сталебетонных балок с высокопрочным бетоном, но без преднапряжения.

Статья [12] посвящена численному моделированию преднапряженных сталебетонных балок на основе конечно-элементной модели при кратковременных длительных нагрузках. Результаты расчетов сравнены с экспериментальными данными других авторов. В работе [13] приведены параметрические исследования композитных сталебетонных балок таврового сечения при различных условиях предварительного напряжения. Рассмотрены различные случаи нагружения, профили арматуры, пролеты балок, разные размеры стальных балок и бетонного настила. Статья [14] посвящена изучению нелинейного поведения преднапряженных композитных балок. Проведены параметрические численные исследования эффективности усиления внешними натяжителями и сравнены с экспериментальными результатами.

Источник [15] отражает результаты исследований зоны сдвига сталебетонной неразрезной преднапряженной коробчатой балки. В статье [16] приведены параметрические исследования сталежелезобетонных балок, предварительно напряженных внешними арматурными элементами. Исследованы влияние расположения и форма арматурных элементов, длина арматуры, начальные усилия предварительного напряжения. Некоторые источники отражают исследование не только отдельных балок, а их совместную работу с монолитной плитой и стальным профнастилом [17].

Farit S. Zamaliyev, Candidate of Technical Sciences, Professor, Associate Professor, Department of Metal Structures and Testing of Structures, Kazan State University of Architecture and Civil Engineering (KSUACE), 1 Zelenaya St., Kazan, 420043, Russian Federation; eLIBRARY SPIN- code: 4926-5781, ORCID: 0000-0002-3563-2994, E-mail: zamaliyev49@mail.ru

Denis Yu. Filippov, Graduate student Department of Metal Structures and Testing of Structures, Kazan State University of Architecture and Civil Engineering (KSUACE), 1 Zelenaya St., Kazan, 420043, Russian Federation

Ранее в исследованиях преобладали стальные балки таврового сечения. В работе [18] изучено изгибное поведение преднапряженных трубобетонных балок, показано, что геометрическая конфигурация таких балок обеспечивает их более высокое сопротивление локальному выпучиванию стенки. Источник [19] отражает результаты испытаний двухпролетных преднапряженных сталебетонных балок общей длиной 9,8 м. Статья [20] посвящена экспериментальным исследованиям сталежелезобетонных преднапряженных сборных балок со шпильками, соединенными с балками из высокопрочной стали.

Статьи [21, 22] посвящены исследованиям сталежелезобетонных композитных балок с элементами из углепластика. Первая — исследованиям в области отрицательного момента, вторая — численным исследованиям композитных балок, усиленных пластинами из углепластика и преднапряженных несвязанной арматурой.

МЕТОД

Рассмотрим особенности напряженно-деформированного состояния преднапряженных сталежелезобетонных балок с наиболее распространенными параметрами, которые могут быть использованы как в составе ребристого перекрытия, так и изолированно. Проведем численные исследования путем компьютерного моделирования и экспериментальные исследования на моделях.

Расчетную модель балки создаем непосредственно в ПК Ansys. Сначала создается эскиз: геометрические фигуры, затем 3D тела. В режиме моделирования создаем геометрические модели. Задаем в программном комплексе материалы и их свойства. Анализ фактора напряженно-деформированного состояния в ПК Ansys производится с помощью функции нелинейного анализа.

Далее генерируется конечно-элементная сетка, затем между элементами модели балки создаются контакты. Для расчетной модели задаем граничные условия. Следующий шаг — задание нагрузок, задается величиной задаваемого усилия преднапряжения.

Расчет сталебетонных балок производился в ПК ANSYS. Для моделирования СБ балок были приняты следующие материалы: стальная часть из прокатной двутавровой балки С255 длиной 6000 мм, две фасонки на концах двутавра (играющие роль опорных ребер) толщиной 14 мм каждая. Вдоль двутавровой балки пропущены два арматурных стержня класса А800 диаметром 14 мм в полипропиленовой оболочке. Класс бетона по прочности В30. Модель СБ балки моделировалась по схеме свободно-опертой балки с распределенной погонной нагрузкой. Расчетный пролет составил 6000 мм. Нагрузка прикладывалась в 10 шагов по 2,6775 кН/м. Общая приложенная нагрузка составила 26,775 кН/м. Величина преднапряжения — 186 кН (рис. 1).

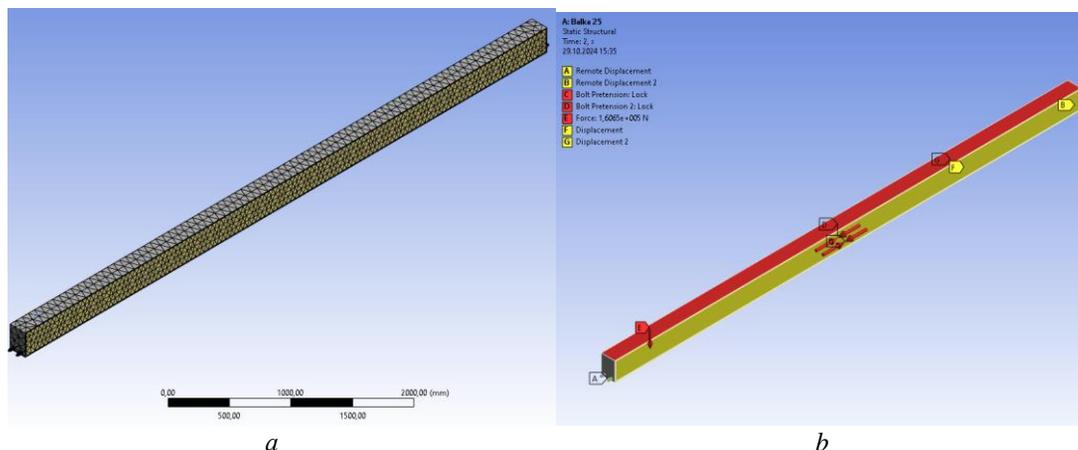


Рис. 1. Сталебетонная балка: *a* — генерация КЭ сетки; *b* — приложенные нагрузки и закрепления
Fig. 1. Steel-concrete beam: *a* — generation of KE mesh; *b* — applied loads and anchorages

Для экспериментальных исследований преднапряженная СБ балка была изготовлена из прокатной двутавровой балки № 20К1 С245 длиной 2000 мм, две фасонки на концах двутавра (играющие роль опорных ребер) толщиной 14 мм каждая. Вдоль двутавровой балки пропущены два арматурных стержня класса А500С диаметром 20 мм в полипропиленовой оболочке. Класс бетона по прочности В20. СБ балка испытывалась по схеме свободно-опертой балки двумя сосредоточенными силами в средней части пролета. Расчетный пролет — 1950 мм. Общая приложенная нагрузка составила 400 кН. Величина преднапряжения — 100 кН (рис. 2).



Рис. 2. Сталебетонная балка в установке: *a* — общий вид; *b* — измерение прогиба
Fig. 2. Steel-concrete beam in installation: *a* — General view; *b* — Deflection measurement

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Прогиб СБ балки пролетом 6 м при нагрузке 26,775 кН/м составил 31,46 мм; напряжения по низу двутавра при нагрузке 26,775 кН/м — 201 МПа; напряжения по верху двутавра при нагрузке 26,775 кН/м — –213,31 МПа; относительные деформации в сжатой зоне бетона при нагрузке 26,775 кН/м — $-6,99 \text{ мм/мм} \cdot 10^{-4}$. Эквивалентная железобетонная балка по расчету — $450 \times 200 \text{ мм}$ с 4 стержнями преднапряженной арматуры диаметром 14 мм класса А800.

Прогиб СБ балки пролетом 2 м при нагрузке 400 кН составил 7,14 мм; напряжения по низу двутавра при нагрузке 400 кН — 235 МПа; напряжения по верху двутавра при нагрузке 400 кН — –302 МПа; относительные деформации в сжатой зоне бетона при нагрузке 400 кН — $-9,1 \text{ мм/мм} \cdot 10^{-4}$. Сходимость предложенной КЭ модели с результатами эксперимента при нагрузке 400 кН составила: по деформациям — –3,12 %; по напряжениям нижней полки двутавра — 4,3 %; по напряжениям верхней полки двутавра — –9,76 %; по относительным деформациям сжатой зоны бетона — 4,93 % (таблица, рис. 3).

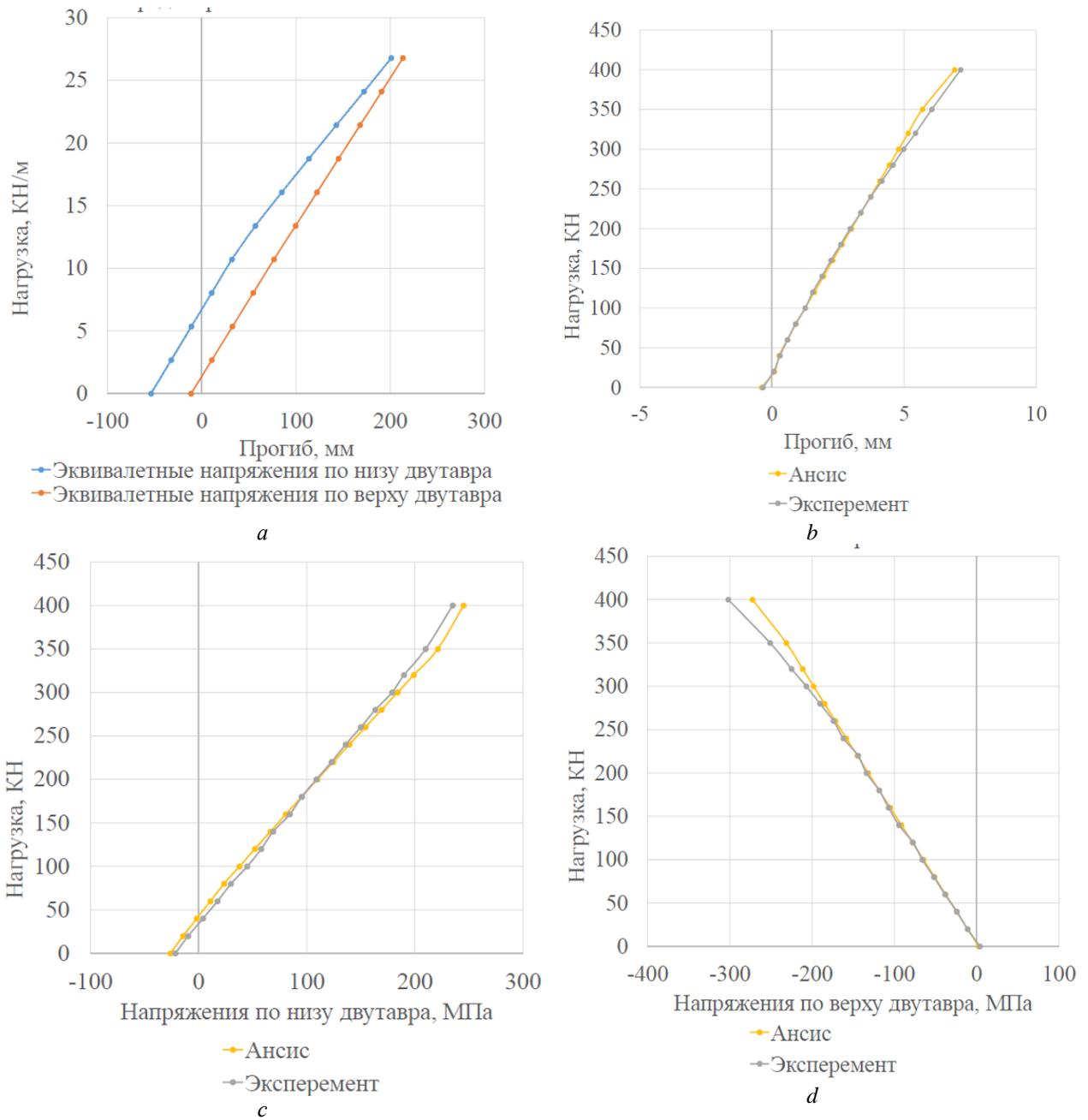


Рис. 3. Графики изменений напряжений и прогибов преднапряженной балки:

a — прогибов по низу и верху двутавра; *b* — изменение прогибов; *c* — изменение напряжений по низу двутавра; *d* — изменение напряжений по верху двутавра

Fig. 3. Graphs of changes in stresses and deflections of prestressed beam:

a — deflections at the bottom and top of the I-beam; *b* — change of deflections; *c* — change of stresses at the bottom of the I-beam; *d* — change of stresses at the top of the I-beam

Сходимость численных экспериментов с данными испытаний

	Прогибы	Напряжения		Относительные деформации сжатой зоны бетона
		в н.п.	в в.п.	
%	3,12	4,3	9,76	4,93

Convergence of numerical experiments with test data

	Deflections	Tensions		Relative deformations of the concrete compressed zone
		bottom shelf	top shelf	
%	3.12	4.3	9.76	4.93

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Сталежелезобетонные преднапряженные изгибаемые элементы используют на сегодняшний день не так широко из-за того, что такие системы недостаточно изучены и нет опыта их применения в строительной практике. Численные исследования и натурные испытания сталебетонных преднапряженных балок подтвердили перспективность подобной конструкции.

2. На основе изучения особенностей напряженно-деформированного состояния сталебетонных преднапряженных балок со стальными двутаврами получены численные результаты.

3. Сравнение результатов численного эксперимента с данными натурных испытаний показывает, что расхождения результатов численных экспериментов от натурных находятся:

- по напряжениям до 4,3 и 9,76 %;
- по прогибам до 3,12 %;
- по несущей способности до 7 %.

4. Анализ результатов численных исследований, полученных с помощью ПК ANSYS, показывает, что конечные результаты прогибов по нагрузкам не превышают 8 %, однако характер графиков сильно расходится. В численных экспериментах они прямолинейные, а в натурных испытаниях — криволинейные.

5. Для уменьшения количественного расхождения численных и экспериментальных результатов изгибаемых преднапряженных сталебетонных элементов необходимы дальнейшие исследования таких видов конструкций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тамразян А.Г., Замалиев Ф.С. Сталежелезобетонные перекрытия: новые методы их расчета // Известия КГАСУ. 2024. № 70.
2. Alsharari F., El-Sisi A.E.-D., Mutnbak M., Salim H., El-Zohairy A. Effect of the Progressive Failure of Shear Connectors on the Behavior of Steel-Reinforced Concrete Composite Girders // Buildings. 2022. Vol. 12 (5). No. 596. DOI: 10.3390/buildings12050596
3. Liu W., Fang Q., Chen L., Li Z., Zhang Y., Xiang, H. Blast resistance of prestressed steel-grouting composite beams under close-in explosions: Experiment and numerical analysis // Advances in Structural Engineering. 2022. Vol. 25 (7). Pp. 1519–1534. DOI: 10.1177/13694332221092676
4. Бабалич В.С., Андросов Е.Н. Сталежелезобетонные конструкции и перспектива их применения в строительной практике России // Успехи современной науки. 2017. № 4. С. 205–208.
5. Ernst S., Bridge R.Q., Wheeler A. Correlation of beam tests with pushout tests in steel-concrete composite beams // Journal of Structural Engineering. 2010. Vol. 136. Issue 2. Pp. 183–192. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-

9445(2010)136:2(183)

6. Colajanni P., Mendola L.L., Monaco A. Review of push-out and shear response of hybrid steel-trussed concrete beams // *Buildings*. 2018. Vol. 8 (10). P. 134. DOI: 10.3390/buildings8100134
7. Jurkiewicz B., Braymand S. Experimental study of a pre-cracked steel-concrete composite beam // *Journal of Constructional Steel Research*. 2007. Vol. 63 (1). Pp. 135–144. DOI: 10.1016/j.jcsr.2006.03.013
8. Замалиев Ф.С., Тамразян А.Г. К расчету сталежелезобетонных ребристых плит для восстанавливаемых перекрытий // *Строительство и реконструкция*. 2021. № 5 (97). С. 3–15.
9. Qiang X., Chen L., Jiang X. Flexure tests on steel-concrete composite beams strengthened with prestressed CFRP plates by string system // *FuheCailiaoXuebao/Acta Materiae Compositae Sinica*. Vol. 39 (11). Pp. 5135–5147. DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20220629.004
10. Shi B., Zhu W., Yang H., Liu W., Tao H., Ling Z. Experimental and theoretical investigation of prefabricated timber-concrete composite beams with and without prestress // *Engineering Structures*. 2020. Vol. 204. P. 109901 DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.109901
11. Travush V.I., Konin D.V., Krylov A.S. Strength of composite steel and concrete beams of high-performance concrete // *Magazine of Civil Engineering*. 2018. No. 3 (79). Pp. 36–44. DOI: 10.18720/MCE.79.4
12. Tiejiong Lou, Sergio M.R. Lopes, Adelino V. Lopes. Numerical modeling of externally prestressed steel–concrete composite beams // *Journal of Constructional Steel Research*. 2016. Vol. 121. Pp. 229–236. DOI: 10.1016/j.jcsr.2016.02.008
13. Anwar B. Abu-Sena, Ibrahim G. Shaaban, Mohamed S. Soliman, Khaled Abd-Allah Mohamed Gharib. Effect of geometrical properties on strength of externally prestressed steel–concrete composite beams // *Proceedings of the Institution of Civil Engineers — Structures and Buildings*. 2018. Vol. 173. Issue 1. Pp. 42–62. DOI: 10.1680/jstbu.17.00172
14. Tiejiong Lou, Theodore L. Karavasilis. Numerical assessment of the nonlinear behavior of continuous prestressed steel-concrete composite beams // *Engineering Structures*. 2019. Vol. 190. Pp. 116–127. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.04.031
15. Jun Sun, Zhenhong Yue, Yan He, Yasir Ibrahim Shah. Slip analysis of prestressed steel-concrete continuous composite beam // *Journal of King Saud University — Engineering Sciences*. 2022. DOI: 10.1016/j.jksues.2022.01.007
16. Marcela Moreira da Rocha Almeida, Alex Sander Clemente de Souza, Augusto Teixeira de Albuquerque, Alexandre Rossi. Parametric analysis of steel-concrete composite beams prestressed with external tendons // *Journal of Constructional Steel Research*. 2022. Vol. 189. P. 107087. DOI: 10.1016/j.jcsr.2021.107087
17. Marcela Moreira da Rocha Almeida, Alex Sander Clemente de Souza, Augusto Teixeira de Albuquerque. Experimental study of prestressed steel-concrete composite beams with profiled steel decking // *Journal of Constructional Steel Research*. 2022. Vol. 194. P. 107331. DOI: 10.1016/j.jcsr.2022.107331
18. Mohammad Reza Ghaemdoost, Jian Yang, Feiliang Wang, Siping Li, BabakJamhiri. Flexural behavior of prestressed concrete-filled steel tubular flange beams // *Structures*. 2022. Vol. 43. Pp. 1643–1667. DOI: 10.1016/j.istruc.2022.07.080
19. Fei Peng, Weichen Xue, Lili Bai. Flexural behavior of externally prestressed continuous steel-concrete composite beams // *Journal of Constructional Steel Research*. 2024. Vol. 212. P. 108282. DOI: 10.1016/j.jcsr.2023.108282
20. Gang Xiong, Liyu Feng, Yunhe Zou, Xuanding Wang, Jincheng Xie. Experimental study of high-strength steel-precast prestressed concrete composite beams under hogging moment // *Journal of Constructional Steel Research*. 2024. Vol. 219. P. 108784. DOI: 10.1016/j.jcsr.2024.108784
21. Fangzheng Shen, Bing Wang, Ping Zhuge, Hetao Qi. Flexural performance investigation of steel-concrete composite beams strengthened with prestressed CFRP tendons in the negative bending moment region // *Structures*. 2024. Vol. 61. P. 106025. DOI: 10.1016/j.istruc.2024.106025
22. Longlong Chen, Xuhong Qiang, Xu Jiang, Jie Bai. Numerical study of steel–concrete composite beams strengthened by CFRP plates with prestressed unbonded reinforcement system // *Engineering Failure Analysis*. 2024. Vol. 157. P. 107905. DOI:10.1016/j.engfailanal.2023.107905

REFERENCES

1. Tamrazyan A.G., Zamaliyev F.S. Steel reinforced concrete slabs new methods of their calculation. *Izvestia KSUAE*. 2024; 70. (in Russian).
2. Alsharari F., El-Sisi A.E.-D., Mutnbak M., Salim H., El-Zohairy A. Effect of the Progressive Failure of Shear Connectors on the Behavior of Steel-Reinforced Concrete Composite Girders. *Buildings*. 2022; 12(5):596. DOI: 10.3390/buildings12050596
3. Liu W., Fang Q., Chen L., Li Z., Zhang Y., Xiang H. Blast resistance of prestressed steel-grouting composite beams under close-in explosions: Experiment and numerical analysis. *Advances in Structural Engineering*. 2022; 25(7):1519-1534. DOI: 10.1177/13694332221092676
4. Babalich V.S., Androsov E.N. Steel-reinforced concrete structures and the prospect of their application in the construction practice of Russia. *Advances of modern science*. 2017; 4:205-208. (in Russian).

5. Ernst S., Bridge R.Q., Wheeler A. Correlation of beam tests with pushout tests in steel-concrete composite beams. *Journal of Structural Engineering*. 2010; 136(2):183-192. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2010)136:2(183)
6. Colajanni P., Mendola L.L., Monaco A. Review of push-out and shear response of hybrid steel-trussed concrete beams. *Buildings*. 2018; 8(10):134. DOI: 10.3390/buildings8100134
7. Jurkiewicz B., Braymand S. Experimental study of a pre-cracked steel-concrete composite beam. *Journal of Constructional Steel Research*. 2007; 63(1):135-144. DOI: 10.1016/j.jcsr.2006.03.013
8. Zamaliev F.S., Tamrazyan A.G. To the calculation of steel-reinforced concrete ribbed slabs for restored floors *Construction and reconstruction*. 2021; 5(97):3-15.
9. Qiang X., Chen L., Jiang X. Flexure tests on steel-concrete composite beams strengthened with prestressed CFRP plates by string system. *FuheCailiaoXuebao/Acta Materiae Compositae Sinica*. 2022; 39(11):5135-5147. DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20220629.004
10. Shi B., Zhu W., Yang H., Liu W., Tao H., Ling Z. Experimental and theoretical investigation of prefabricated timber-concrete composite beams with and without prestress. *Engineering Structures*. 2020; 204:109901. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.109901
11. Travush V.I., Konin D.V., Krylov A.S. Strength of composite steel and concrete beams of high-performance concrete. *Magazine of Civil Engineering*. 2018; 3(79):36-44. DOI: 10.18720/MCE.79
12. Tiejiong Lou, Sergio M.R. Lopes, Adelino V. Lopes Numerical modeling of externally prestressed steel-concrete composite beams. *Journal of Constructional Steel Research*. 2016; 121:229-236. DOI: 10.1016/j.jcsr.2016.02.008
13. Anwar B. Abu-Sena, Ibrahim G. Shaaban, Mohamed S. Soliman, Khaled Abd-Allah Mohamed Gharib. Effect of geometrical properties on strength of externally prestressed steel-concrete composite beams. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers — Structures and Buildings*. 2018; 173(1):42-62. DOI: 10.1680/jstbu.17.00172
14. Tiejiong Lou, Theodore L. Karavasilis. Numerical assessment of the nonlinear behavior of continuous prestressed steel-concrete composite beams. *Engineering Structures*. 2019; 190:116-127. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.04.031
15. Jun Sun, Zhenhong Yue, Yan He, Yasir Ibrahim Shah. Slip analysis of prestressed steel-concrete continuous composite beam. *Journal of King Saud University — Engineering Sciences*. 2022. DOI: 10.1016/j.jksues.2022.01.007
16. Marcela Moreira da Rocha Almeida, Alex Sander Clemente de Souza, Augusto Teixeira de Albuquerque, Alexandre Rossi. Parametric analysis of steel-concrete composite beams prestressed with external tendons. *Journal of Constructional Steel Research*. 2022; 189:107087. DOI: 10.1016/j.jcsr.2021.107087
17. Marcela Moreira da Rocha Almeida, Alex Sander Clemente de Souza, Augusto Teixeira de Albuquerque, Experimental study of prestressed steel-concrete composite beams with profiled steel decking. *Journal of Constructional Steel Research*. 2022; 194:107331. DOI: 10.1016/j.jcsr.2022.107331
18. Mohammad Reza Ghaemdoost, Jian Yang, Feiliang Wang, Siping Li, BabakJamhiri. Flexural behavior of prestressed concrete-filled steel tubular flange beams. *Structures*. 2022; 43:1643-1667. DOI: 10.1016/j.istruc.2022.07.080
19. Fei Peng, Weichen Xue, Lili Bai. Flexural behavior of externally prestressed continuous steel-concrete composite beams. *Journal of Constructional Steel Research*. 2024; 212:108282. DOI: 10.1016/j.jcsr.2023.108282
20. Gang Xiong, Liyu Feng, Yunhe Zou, Xuanding Wang, Jincheng Xie. Experimental study of high-strength steel-precast prestressed concrete composite beams under hogging moment. *Journal of Constructional Steel Research*. 2024; 219:108784. DOI: 10.1016/j.jcsr.2024.108784
21. Fangzheng Shen, Bing Wang, Ping Zhuge, Hetao Qi. Flexural performance investigation of steel-concrete composite beams strengthened with prestressed CFRP tendons in the negative bending moment region. *Structures*. 2024; 61:106025. DOI: 10.1016/j.istruc.2024.106025
22. Longlong Chen, Xuhong Qiang, Xu Jiang, Jie Bai. Numerical study of steel-concrete composite beams strengthened by CFRP plates with prestressed unbonded reinforcement system. *Engineering Failure Analysis*. 2024; 157:107905. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2023.107905