

УДК 624.016

## Гибридные конструкции балок на транспорте с применением металла и композитов

**В. В. Веселов**

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

**Для цитирования:** *Веселов В. В.* Гибридные конструкции балок на транспорте с применением металла и композитов // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 3. — С. 631–638. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-3-631-638

### Аннотация

**Цель:** Выполнить анализ возможного применения гибридных и комбинированных конструкций для перекрытий зданий и сооружений гражданского и промышленного назначения, в том числе на транспорте, расширить номенклатуру балочных конструкций, разработать инновационное конструктивное решение гибридной балки, обладающее низкой материалоемкостью при повышенной надежности и долговечности конструкции. **Методы:** Анализ преимуществ известных гибридных конструкций, применяемых для их проектирования материалов, расчет металлокомпозитной балки с применением существующих инженерных методик по СТО 38276489.003-2017 «Усиление стальных конструкций композитными материалами. Проектирование и технология производства работ» и численных методов расчета с привлечением расчетных программ. **Результаты:** Приводятся новые разработки балок с применением сталебетона и композитных материалов для проектируемых и усиливаемых конструкций. Разработана инновационная конструкция металлокомпозитной балки — стальная балка, усиленная системой внешнего армирования из композитного материала, защищаемая патентом на полезную модель, выполнен ее статический и конструктивный расчет с привлечением вычислительного комплекса SCAD, проанализированно напряженно-деформированное состояние, произведен анализ снижения расхода стали металлокомпозитной балки и других ее преимуществ в сравнении с традиционными решениями балок из стали и железобетона. **Практическая значимость:** Выявлены преимущества гибридных и комбинированных конструкций, выявлено снижение материалоемкости металлокомпозитной балки, усиленной боропластиком, в сравнении со стальной. Предложенное конструктивное решение балки может быть использовано в перекрытиях и покрытиях зданий и сооружений, транспортных сооружениях, особенно в условиях агрессивной окружающей среды, а также при капитальном ремонте и реконструкции объектов промышленного и гражданского назначения.

**Ключевые слова:** Здание, сооружение, гибридная конструкция, балка перекрытия, металлокомпозитная балка, численный расчет, надежность, долговечность.

## Введение

Гибридные и комбинированные конструкции из сталебетона, сталежелезобетона все чаще применяются в каркасах зданий и транспортных сооружениях [1], в том числе с использованием бионического подхода [2]. Применение подобных конструкций позволяет снизить расход стали, массу несущей конструкции объекта, трудоемкость ее изготовления при повышении надежности и долговечности. Весьма перспективным направлением по совершенствованию несущих элементов зданий и сооружений являются гибридные конструкции с применением композитов, в частности железобетонные и металлические конструкции с системами внешнего армирования из композитных сеток, холстов или ламинатов [3–5].

Номенклатура гибридных и комбинированных конструкций в России и мировой практике строительства развита пока недостаточно. На кафедре «Строительные конструкции, здания и сооружения» ПГУПС ведутся разработки гибридных сталебетонных, сталефибробетонных и металлокомпозитных балочных конструкций [6, 7].

## Практическое применение и результаты

Применение гибридных сталебетонных конструкций эффективно преимущественно в сжатых элементах: колоннах, стойках, опорах, сжатых частях балок и ферм, подкрановых балок, рамных и арочных конструкций. При этом бетон иногда можно располагать и в растянутых частях конструкций, но с учетом обжатия бетона за счет его предварительного напряжения [8]. Разработан целый ряд комбинированных балочных конструкций зданий и сооружений с применением сталебетона, которые запатентованы при участии автора [8–10]. В отдельных случаях под тяжелую транспортную нагрузку возможно применение сталефибробетона, позволяющего существенно повысить трещиностойкость бетона при отсутствии стержневой предварительно напряженной арматуры [11].

Применение металлокомпозитных конструкций для балок может быть эффективно в агрессивных условиях эксплуатации и большом расходе стали. Кроме того, применение композитов может быть рационально в качестве усиления эксплуатируемых конструкций, которые недопустимо ослаблять при ремонте сваркой или отверстиями под болты. Выполнен поиск конструктивных решений гибридных балок, в том числе разработанных на кафедре «Строительные конструкции, здания и сооружения» ПГУПС [12]. При участии автора предложена инновационная металлокомпозитная балка, защищаемая патентным решением [13].

Предлагаемая балка состоит из стенки, верхнего и нижнего поясов, которые составлены в двутавровое поперечное сечение и выполнены из листовой тонкостенной стали, балка может иметь несимметричное поперечное сечение с более развитым верхним поясом для повышения устойчивости балки и компенсации низкой прочности композита на сжатие, к поверхности стенки и поясов по всему периметру элементов приклеена композитная ткань при помощи эпоксидного клея, при этом стенка и пояса имеют перфорацию по всей площади элементов (рис. 1). Композитная ткань, приклеенная к поверхности поясов, может иметь увеличенную толщину в виде накладки в средней части по длине балки, где возникают максимальные нормальные напряжения от приложенных нагрузок. Композитная ткань, приклеенная к поверхности стенки, может иметь увеличенную толщину в виде поперечных ребер (например, композитных уголков), расположенных с равномерным шагом по длине балки, что обеспечивает местную устойчивость тонкой стенки.

В качестве композитного материала предлагается использовать полимерную основу, усиленную углеродными волокнами (углепластик) или борными волокнами (боропластик). Борные волокна обладают высокой чувствительностью к концентраторам напряжений, чем объясняется

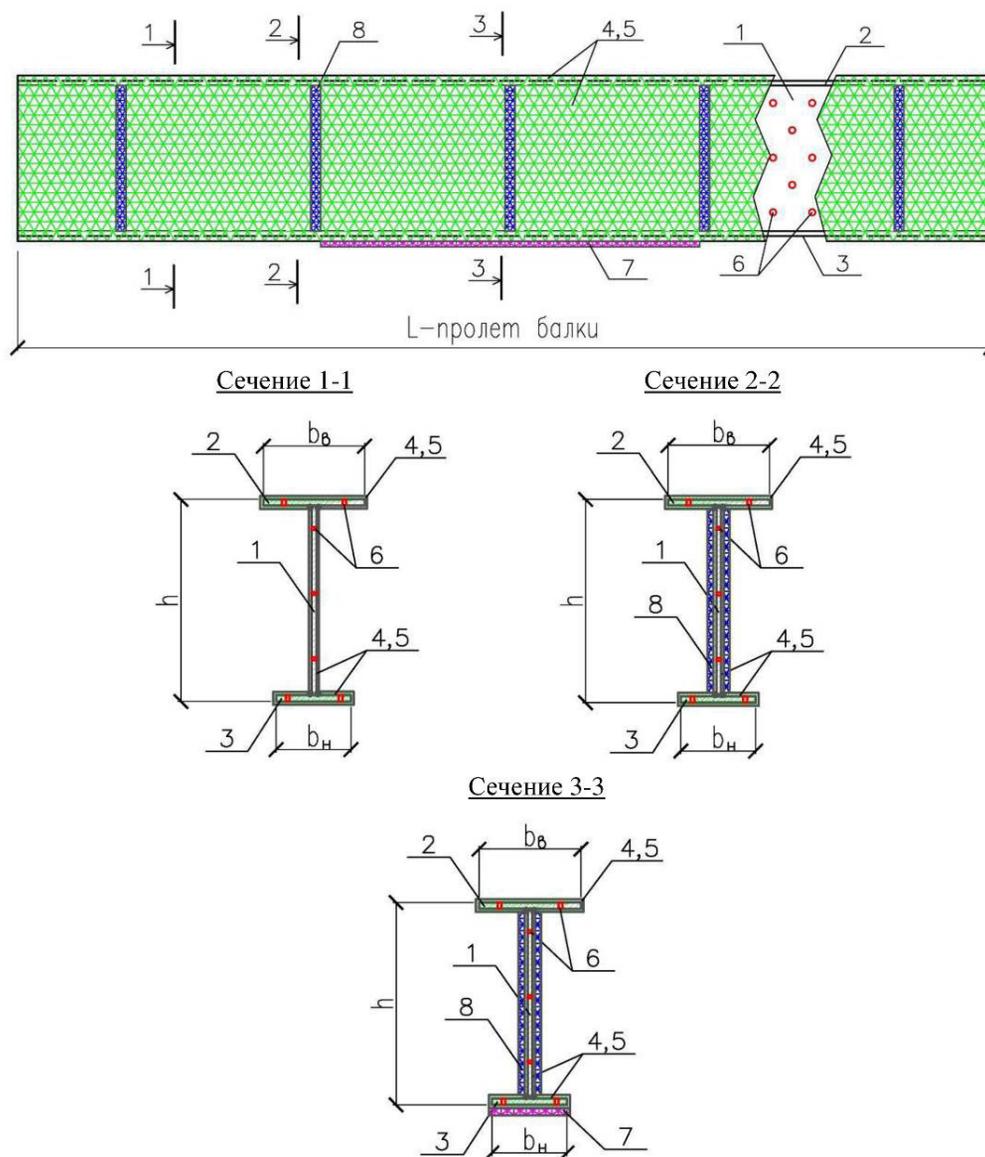


Рис. 1. Конструкция металлокомпозитной балки:  
 1 — стальная стенка, 2 — стальной верхний пояс, 3 — стальной нижний пояс,  
 4 — композитная ткань, 5 — слой эпоксидного клея, 6 — перфорация, 7 — накладка,  
 8 — поперечное ребро

их большая прочность как при сжатии, так и при растяжении [14]. Волокна бора выпускаются в виде моноволокон, комплексных нитей и лент.

Наличие композитной ткани с эпоксидным клеем на поверхности стенки и поясов повышает местную устойчивость элементов, несущую способность балки в целом, снижает расход стали и, как следствие, снижает материалоемкость балки.

Наличие композитной ткани с эпоксидным клеем на поверхности стенки и поясов также защищает элементы балки от коррозионного износа, уменьшает эксплуатационные расходы на восстановление защитного покрытия балки и повышает ее эксплуатационную надежность.

Наличие перфораций на поверхности стенки и поясов (рис. 1) обеспечивает надежное сцепле-

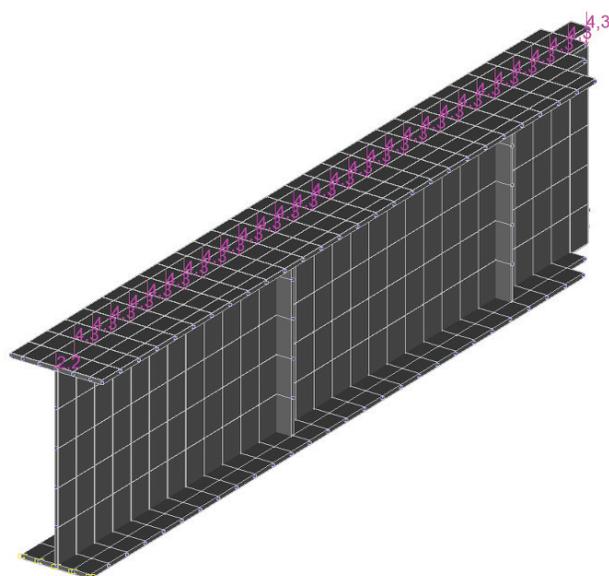


Рис. 2. Фрагмент расчетной модели балки в BK SCAD, КН

ние композитной ткани и эпоксидного клея с элементами балки, что повышает эксплуатационную надежность балки.

Наличие наклейки на поверхности композитной ткани с эпоксидным клеем на наиболее напряженном по длине участке балки (рис. 1) повышает несущую способность нижнего пояса, снижает расход стали на балку в целом и, как следствие, снижает материалоемкость балки.

Наличие поперечных ребер, приклеенных к поверхности композитной ткани по всей длине балки с равномерным шагом (рис. 1), повышает местную устойчивость стенки, снижает расход стали на балку в целом и, как следствие, снижает материалоемкость балки.

Несущая способность металлокомпозитной балки обеспечивается подбором марки стали, состава композита, размеров поперечного сече-

ния балки и ее элементов. Расчеты предлагаемой металлокомпозитной балки были выполнены с применением методики для подобных конструкций по СТО 38276489.003—2017 и численным моделированием в вычислительном комплексе BK SCAD (рис. 2). Все элементы балки моделировались пластинчатыми конечными элементами с размерами ячеек до 0,1–0,2 м.

Основные параметры рассчитываемой металлокомпозитной балки: пролет — 12 м, высота сечения — 675 мм, сечение стальной стенки — 663×6 мм, сечение стальных поясов — 260×11 мм, сталь марки С235, толщина композита на основной площади — 1,5 мм, толщина композита на поясах в наиболее нагруженных зонах — 3 мм, сечение композитных поперечных ребер — уголки 65×5 мм с шагом по длине балки — 1,2 м, материал композита — боропластик (плотность  $\rho = 2000 \text{ кг/м}^3$ , модуль упругости  $E = 250 \text{ ГПа}$ , предел прочности при сжатии/растяжении/изгибе  $R = 60/1300/1750 \text{ МПа}$ ) [15].

На рис. 3–5 приведены результаты расчета металлокомпозитной балки (деформации балки и поля основных напряжений). В таблице в качестве сравнительного анализа приведены весовые показатели и значения напряжений для стальной прокатной и предлагаемой металлокомпозитной балок.

По результатам расчетов балки, усиленной композитом, удалось уменьшить толщины стальной стенки и поясов при некотором увеличении касательных напряжений в стенке, что не является критичным, учитывая существенный запас напряжений в стенке и обеспеченную местную устойчивость за счет ребер жесткости.

#### Сравнительный анализ балок

Вариант балки	Нормальные напряжения в стальных поясах $\sigma_y$ , МПа	Касательные напряжения в стальной стенке $\tau$ , МПа	Вес балки, т
Стальная балка (двутавр 70 Б1)	224,2 < 230	29,4 < 133	1,55
Металлокомпозитная балка $h = 675 \text{ мм}$	229,8 < 230	57,9 < 133	1,04



Рис. 3. Деформированная схема балки, мм

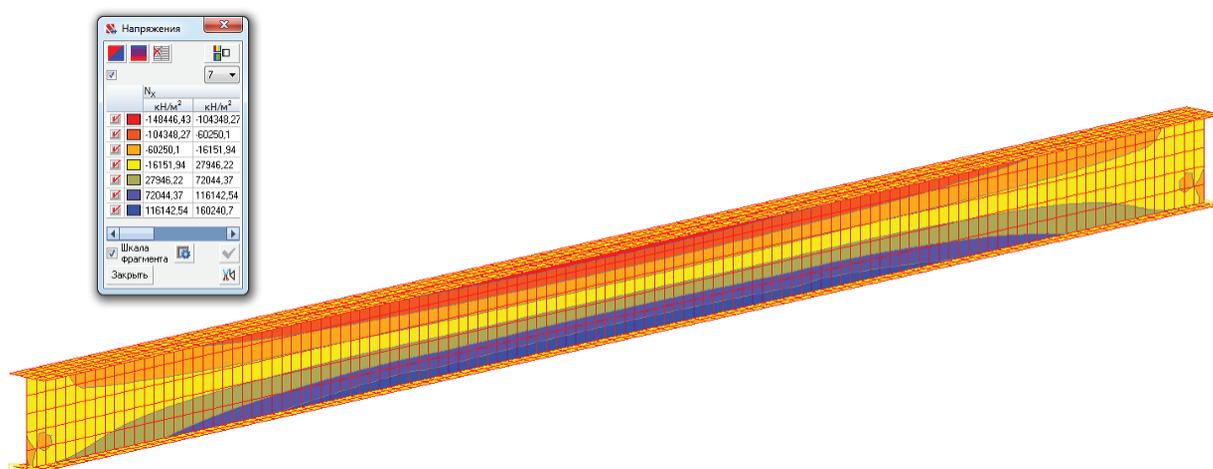


Рис. 4. Поля напряжений в стальной части балки, КПа

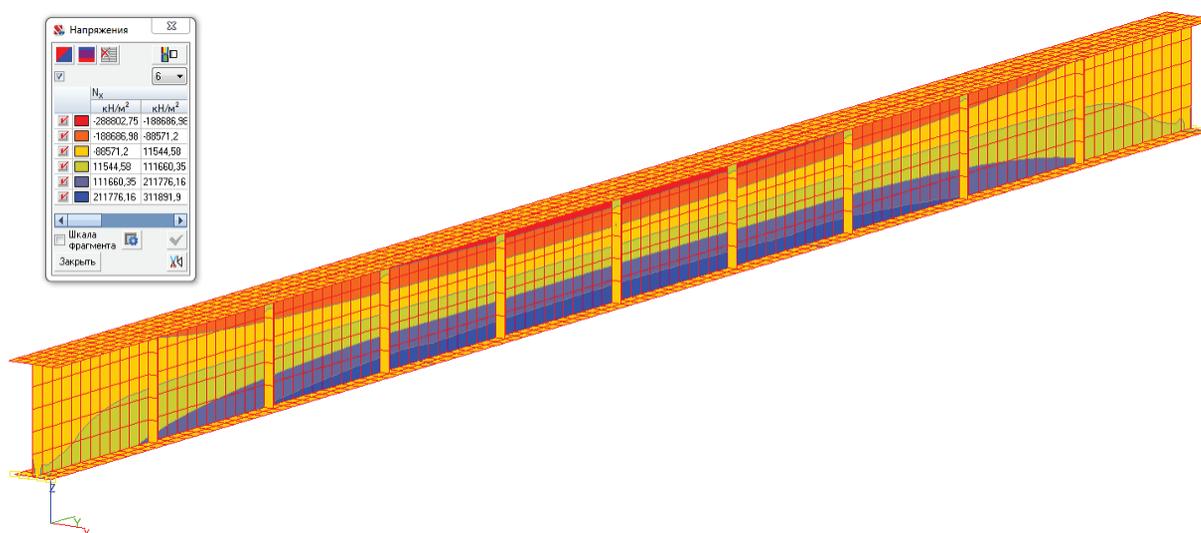


Рис. 5. Поля напряжений в композитной части балки

Установлено, что металлокомпозитная балка в сравнении с металлической имеет более низкий вес, разница составляет 32 % при экономии стали на 25 % и снижении эксплуатационных затрат.

### Заключение

Разработан ряд несущих гибридных сталебетонных и металлокомпозитных балочных конструкций для перекрытий зданий и сооружений, в том числе на транспорте. Предложено инновационное конструктивное решение металлокомпозитной балки, запатентованное при участии автора. Выполнен расчет балки по действующим методикам с использованием численных методов расчета. Рассмотренный вариант металлокомпозитной балки позволил уменьшить толщину стальных элементов балки, тем самым добиться снижения расхода стали, как следствие, ее веса. По предварительной экономической оценке стоимость металлокомпозитной балки будет несколько выше при существенном увеличении ее надежности и долговечности, а также снижении эксплуатационных затрат на восстановление защитного антикоррозийного покрытия. Предложенное конструктивное решение балки может быть рационально к применению в агрессивных условиях эксплуатации, а также при реконструкции и капитальном ремонте объекта при невозможности временного ослабления несущей конструкции.

### Библиографический список

1. Веселов В. Применение сталежелезобетонных балочных конструкций в транспортном строительстве / В. Веселов // Конспекты лекций по сетям и системам 402 LNS. — С. 269. — DOI: 10.1007/978-3-030-96380-4\_30.
2. Темнов В. Сетка из раковин бионического типа для эксплуатации в экстремальных условиях обитания / В. Темнов, М. Абу-Хасан, Д. Чарник и др. // Серия конференций IOP: материаловедение и инженерия. — 2020. — С. 022023.
3. Бикбаева К. А. Усиление металлических конструкций композитными материалами / К. А. Бикбаева, К. С. Савинкова // Молодой ученый. — 2018. — № 11(197). — С. 71–73.
4. Zou X. A review on FRP-concrete hybrid sections for bridge applications / X. Zou, H. Lin, P. Feng et al. // Composite Structures. — 2021. — № 262. — P. 113336. — DOI: 10.1016/j.compstruct.2020.113336.
5. Ali H. T. Fiber reinforced polymer composites in bridge industry / H. T. Ali, R. Akrami, S. Fotouhi, M. Yusuf, M. Fotouhi // Structures. — 2021. — № 30. — С. 774–785. — DOI: 10.1016/j.istruc.2020.12.092.
6. Веселов В. Гибридные балочные конструкции транспортных зданий / В. Веселов, К. Талантова // Конспекты лекций по сетям и системам 402 LNS. — С. 278. — DOI: 10.1007/978-3-030-96380-4\_31.
7. Егоров В. В. Усиление стальной стенки гибридной балочной строительной конструкции композитными материалами / В. В. Егоров, М. С. Абу-Хасан, А. М. Федоров // Инновационные технологии в строительстве и геоэкологии: материалы VIII Международной научно-практической интернет-конференции (23.06.2021). — С. 10–15.
8. Патент № 2675002. Российская Федерация, МПК E04C 3/294. Предварительно напряженная сталебетонная балка / В. В. Веселов, М. В. Копачева, Т. Д. Абагурова. Заявл. 21.02.2018; опубл. 14.12.2018. — Бюл. № 35.
9. Патент № 2627810. Российская Федерация, МПК E04C 3/07, E04C 3/293, E04B 1/30. Сталебетонная балка / В. В. Егоров, В. В. Веселов. Заявл. 19.05.2016; опубл. 11.08.2017. — Бюл. № 23.
10. Патент № 170094. Российская Федерация, МПК B66 C/00. Подкрановая балка / В. В. Веселов. Заявл. 18.10.2016; опубл. 13.04.2017. — Бюл. № 11.
11. Талантова К. В. Сталефибробетон. Дизайн. Терминология / К. В. Талантова // Вестник Евразийской науки. — 2020. — Т. 12. — № 4. — DOI: 10.15862/69SAVN420.
12. Патент № 2745288. Российская Федерация, МПК E04C 3/29. Балка композиционной структуры / В. В. Егоров, А. М. Федоров. Заявл. 01.10.2020; опубл. 23.03.2021. — Бюл. № 9.

13. Патент № 211900. Российская Федерация, МПК E04C 3/29. Металлокомпозитная балка / В. В. Веселов, Е. И. Никонова. Заявл. 13.12.2021; опубл. 28.06.2022. — Бюл. № 19.

14. Химическая энциклопедия: в 5 т. / Гл. ред. И. Л. Кнунянц. — М.: Советская энциклопедия, 1988. — Т. 1: Абл-Дар. — 623 с.

Дата поступления: 27.06.2022

Решение о публикации: 04.09.2022

**Контактная информация:**

ВЕСЕЛОВ Виталий Владиславович — канд. техн. наук, доц.; veselov.1977@inbox.ru

## Beam Hybrid Structures with Metal and Composites in Transport

V. V. Veselov

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

**For citation:** Veselov V. V. Beam Hybrid Structures with Metal and Composites in Transport // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 3, pp. 631–638. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2022-3-631-638

### Summary

**Purpose:** To pursue the analysis of hybrid and combined frame possible usage for overlaps of buildings and structures for civil and industrial purposes, including on transport, to expand beam structure nomenclature, to develop innovative structural solution of hybrid beam with material low consumption but with frame increased reliability and durability. **Methods:** Analysis of the advantages of known hybrid frames, of materials, used for their projection; metal composite beam calculation using existing engineering techniques in accordance with STO 38276489.003-2017 “Strengthening of steel structures with composite materials. Projection and techniques of work production” and numerical calculation methods involving calculation software programs. **Results:** New workouts for beams with the use of steel concrete and composite materials for projected and strengthened structures are presented. Innovative frame of metal composite beam has been developed — steel beam strengthened with external reinforcement system of composite material, protected by a useful model patent, its static and structural calculation has been performed using SCAD computing complex; stress-strain state has been analyzed, the analysis of steel consumption reduction for a metal composite beam and of its other advantages in comparison with steel and reinforced concrete beam traditional solutions has been carried out. **Practical significance:** The advantages of hybrid and combined structures are revealed, the decrease in material capacity for a metal composite beam strengthened by boroplastics in comparison with a steel one is revealed. The proposed structural solution of a beam can be used in overlaps and coverings for buildings and structures, transport buildings, especially, in aggressive environment conditions as well as during major repairs and reconstruction of industrial and civil purpose facilities.

**Keywords:** Building, frame, hybrid structure, overlap beam, metal composite beam, numerical calculation, reliability, durability.

### References

1. Veselov V. *Primenenie stalezhelezobetonnykh balochnykh konstruktsiy v transportnom stroitel'stve. Konspekty lektsiy po setyam i sistemam 402 LNS, s.269.* DOI:

10.1007/978-3-030-96380-4\_30 [The use of steel-reinforced concrete beam structures in transport construction. Lecture Notes on Networks and Systems 402 LNS, p. 269. DOI: 10.1007/978-3-030-96380-4\_30]. (In Russian)

2. Temnov V., Abu-Khasan M., Charnik D., Kuprava L., Egorov V. *Setka iz rakovin bionicheskogo tipa dlya ekspluatatsii v ekstremal'nykh usloviyakh obitaniya. Seriya konferentsiy IOP: materialovedenie i inzheneriya 2020. S. 022023* [Mesh of bionic shells for exploitation in extreme living conditions. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering]. (In Russian)
3. Bikbaeva K. A., Savinkova K. S. Usilenie metallicheskikh konstruktsiy kompozitnymi materialami [Strengthening of metal structures with composite materials]. *Molodoy uchenyy* [Young scientist]. 2018, I. 11 (197), pp. 71–73. (In Russian)
4. Zou X., Lin H., Feng P., Bao Y., Wang J. A review on FRP-concrete hybrid sections for bridge applications. *Composite Structures*, 2021, 262, 113336. DOI: 10.1016/j.compstruct.2020.113336.
5. Ali H.T., Akrami R., Fotouhi S., Yusuf M., Fotouhi M. Fiber reinforced polymer composites in bridge industry. *Structures*. 2021, 30, pp. 774–785. DOI: 10.1016/j.istruc.2020.12.092.
6. Veselov V., Talantova K. *Gibridnye balochnye konstruktsii transportnykh zdaniy. Konspekty lektsiy po setyam i sistemam 402 LNNS, str.278*. [Hybrid beam structures of transport buildings. Lecture notes on networks and systems]. DOI: 10.1007/978-3-030-96380-4\_31 (In Russian)
7. Egorov V. V., Abu-Khasan M. S., Fedorov A. M. Usilenie stal'noy stenki gibridnoy balochnoy stroitel'noy konstruktsii kompozitnymi materialami [Strengthening the steel wall of a hybrid beam building structure with composite materials]. *Innovatsionnye tekhnologii v stroitel'stve i geoekologii. Materialy VIII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy internet-konferentsii (23.06.2021)* [Innovative technologies in construction and geocology. Materials of the VIII International Scientific and Practical Internet Conference (06/23/2021)]. Pp. 10–15. (In Russian)
8. Veselov V. V., Kopacheva M. V., Abaturova T. D. *Patent № 2675002. Rossiyskaya Federatsiya, MPK E04S 3/294. Predvaritel'no napryazhennaya stalebetonnaya balka* [Patent No. 2675002. Russian Federation, IPC E04C 3/294. Prestressed reinforced concrete beam]. (In Russian)
9. Egorov V. V., Veselov V. V. *Patent № 2627810. Rossiyskaya Federatsiya, MPK E04C 3/07, E04C 3/293, E04V 1/30. Stalebetonnaya balka* [Patent No. 2627810. Russian Federation, IPC E04C 3/07, E04C 3/293, E04B 1/30. Reinforced concrete beam]. (In Russian)
10. Veselov V. V. *Patent № 170094. Rossiyskaya Federatsiya, MPK V66 S/00. Podkranovaya balka / Zayavl. 18.10.2016; opubl. 13.04.2017. Byul. № 11* [Patent No. 170094. Russian Federation, IPC B66 C/00. Crane beam. Appl. 10/18/2016; publ. 04/13/2017]. (In Russian)
11. Talantova K. V. *Stalefibrobeton. Dizayn. Terminologiya* [Steel fiber reinforced concrete. Design. Terminology]. 2020 DOI: 10.15862/69SAVN420 *Vestnik Evraziyskoy nauki* 2020, I. 4, vol. 12/2020. DOI: 10.15862/69SAVN420. (In Russian)
12. Egorov V. V., Fedorov A. M. *Patent № 2745288. Rossiyskaya Federatsiya, MPK E04C 3/29. Balka kompozitsionnoy struktury. Zayavl. 01.10.2020; opubl. 23.03.2021 g. — Byul. № 9* [Patent No. 2745288. Russian Federation, IPC E04C 3/29. Beam of compositional structure]. (In Russian)
13. Veselov V. V., Nikonova E. I. *Patent № 211900. Rossiyskaya Federatsiya, MPK E04C 3/29. Metallokompozitnaya balka. Zayavl. 13.12.2021; opubl. 28.06.2022 g. — Byul. № 19* [Patent No. 211900. Russian Federation, IPC E04C 3/29. Metal-composite beam. Appl. 12/13/2021; publ. June 28, 2022 - Bull. No. 19]. (In Russian)
14. *Khimicheskaya entsiklopediya* [Chemical encyclopedia]. Moscow: Sovetskaya entsiklopediya Publ., 1988, vol. 1, 623 p. (In Russian)

Received: June 27, 2022

Accepted: September 4, 2022

**Author's information:**

Vitaliy V. VESELOV — PhD in Engineering, Associate Professor; veselov.1977@inbox.ru