НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER УДК 624.011.78 DOI: 10.22227/1997-0935.2024.12.1883-1895

Экспериментальные исследования несущей способности балок составного двутаврового сечения из пултрузионных стеклопластиковых профилей (ПСП)

Марат Айдарович Салахутдинов, Далер Насимович Арипов, Арслан Реджепович Ханеков, Сергей Сергеевич Киселев

Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КГАСУ); г. Казань, Россия

аннотация

Введение. В статье рассматриваются результаты натурных испытаний балок составного двутаврового сечения из пултрузионных стеклопластиковых профилей (ПСП) для оценки их несущей способности и прогибов. Актуальность исследования обусловлена ограничением применения сплошных балок из пултрузионных стеклопластиковых профилей для относительно больших пролетов, что требует применения балок составного сечения. Разработаны конструктивные решения балок составного двутаврового сечения из пултрузионных стеклопластиковых профилей, пояса которых выполнены из парных уголков, со сплошной и перфорированной стенками. В настоящее время отсутствует действующая нормативная документация на уровне сводов правил или ГОСТ, в которых приведена методика расчета несущей способности для составных сечений из ПСП, особенно балок с перфорированной стенкой.

Материалы и методы. Экспериментальные исследования выполнялись на трехточечный изгиб. В процессе натурных испытаний фиксировались вертикальные перемещения балок и деформации стенки относительно полок. Результаты. По результатам натурных испытаний определены несущая способность, прогибы составной двутавровой балки со сплошной и перфорированной стенками. Проведен сравнительный анализ с результатами экспериментальных и численных исследований.

Выводы. Значимость натурных испытаний заключается в оценке несущей способности и прогибов балок составного двутаврового сечения из пултрузионных стеклопластиковых профилей при трехточечном изгибе, возможности дальнейшего развития и совершенствования методики их расчета.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: пултрузия, стеклопластиковый профиль, несущая способность, балка составного двутаврового сечения, изгиб балки, перфорированная стенка

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: *Салахутдинов М.А., Арипов Д.Н., Ханеков А.Р., Киселев С.С.* Экспериментальные исследования несущей способности балок составного двутаврового сечения из пултрузионных стеклопластиковых профилей (ПСП) // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 12. С. 1883–1895. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.12.1883-1895

Автор, ответственный за переписку: Арслан Реджепович Ханеков, khanekova@kgasu.ru

Experimental studies of the bearing capacity of composite cross section beams made of pultrusion fiberglass rofile (PFP)

Marat A. Salakhutdinov, Daler N. Aripov, Arslan R. Khanekov, Sergey S. Kiselev Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE); Kazan, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The article discusses the results of field tests of composite I-beam beam made of pultrusion fiberglass profiles (PSP) to assess their bearing capacity and deflections. The relevance of the study is due to the limited use of solid beams made of pultrusion fiberglass profiles for relatively large spans, which requires the use of composite beams. Constructive solutions have been developed for beams of composite I-section made of pultrusion fiberglass profiles, the belts of which are

made of paired corners, with solid and perforated walls. Currently, there is no current regulatory documentation at the level of codes of practice or GOST, which provides a method for calculating the bearing capacity for composite sections made of PSP, especially beams with a perforated wall.

Materials and methods. Experimental studies were performed on a three-point bend. During the field tests, vertical movements of the beams and wall deformations relative to the shelves were recorded.

Results. According to the results of field tests, the bearing capacity, deflections, and composite I-beams with solid and perforated walls were determined. A comparative analysis with the results of experimental and numerical studies has been carried out.

Conclusions. The significance of field tests is to assess the bearing capacity and deflections, beams of composite I-section made of pultrusion fiberglass profiles with three-point bending, the possibility of further development and improvement of their calculation methods.

KEYWORDS: pultrusion, fiberglass profile, bearing capacity, composite cross-section beam, bending of the beam, perforated wall

FOR CITATION: Salakhutdinov M.A., Aripov D.N., Khanekov A.R., Kiselev S.S. Experimental studies of the bearing capacity of composite cross section beams made of pultrusion fiberglass rofile (PFP). *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(12):1883-1895. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.12.1883-1895 (rus.).

Corresponding author: Arslan R. Khanekov, khanekova@kgasu.ru.

введение

Полимерные композиты широко применяются при строительстве объектов транспортной инфраструктуры и жилищно-коммунального хозяйства, а также в гражданском и промышленном строительстве, как самостоятельные конструктивные системы [1], так и в виде элементов усиления несущих конструкций углепластиком на эпоксидных адгезивах [2, 3]. Композитные материалы используются в бетонах в качестве арматуры [4]. Использование пултрузионных стеклопластиковых профилей в определенной мере является альтернативой традиционным материалам в промышленном и гражданском строительстве. Составные балки могут выйти из строя в результате местной и общей потери устойчивости, а также их взаимодействияи [5-7]. Местная устойчивость балок из ПСП исследована для различных типов поперечных сечений [8-10], как экспериментально [11–15], так и с применением аналитических и численных подходов [16-17]. При прочностном анализе конструкции из пултрузионных стеклопластиковых профилей используется, как правило, феноменологический подход к описанию свойств композитного материала, согласно которому композит рассматривается как условно однородный анизотропный материал [18]. Рекомендации по расчету и конструированию данных профилей показывают, что одной из проблем при разработке конструкций из стеклопластика является обеспечение требуемой прочности и деформативности [19], зависящих от решения узловых соединений [20], которые выполняются преимущественно болтами [21].

Ферменные и рамные конструкции из ПСП известны в практике строительства уже более 30 лет [22]. Пултрузионные стеклопластиковые профилия могут применяться в пешеходных и автомобильных мостах [23–25], временных каркасных сооружениях [26]. В основном для покрытия и перекрытия зданий или сооружений применяются балки из ПСП сплошного сечения (двутавры, швеллеры, квадратные и прямоугольные трубы). Однако, величина максимального пролета таких балок ограничена и зависит от шага их установки. Для обеспечения больших пролетов требуется применение балок составного сечения из ПСП. В настоящее время отсутствует действующая норма-



Рис. 1. Разработанные балки составного двутаврового сечения из ПСП: *a* — со сплошной стенкой; *b* — с перфорированной стенкой: *l* — парные уголки верхнего пояса, *2* — парные уголки нижнего пояса, *3* — сплошная стенка, *4* — болт М16, *5* — средний лист, *6* — крайний лист

Fig. 1. Designed beams of composite I-beam section made of PSP: a — with continuous stem; b — with a perforated stem: 1 — top flange double angle, 2 — lower chord double angle, 3 — continuous stem, 4 — bolt M16, 5 — medium plate, 6 — margin plate

тивная документация на уровне сводов правил или ГОСТ, в которых приведена методика расчета несущей способности для составных сечений из ПСП, особенно балок с перфорированной стенкой. Таким образом, необходимо проводить натурные исследования таких балок для оценки их фактической несущей способности и возможности разработки их методики расчета.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Разрабатываются балки составного двутаврового сечения высотой 500 мм со сплошной (рис. 1, *a*) и перфорированной стенками (рис. 1, *b*) из ПСП пролетом 6 м.

Верхняя и нижняя полки балки выполнены из уголков сечением 105 × 13 мм, стенка сплошной балки —



Рис. 2. Схема стенда испытаний: *а* — для балки составного двутаврового сечения со сплошной стенкой из ПСП; *b* — для балки составного двутаврового сечения с перфорированной стенкой из ПСП; *c* — поперечный вид балки *a*: *l* — тензодатчики, *2* — болты М16, *3* — опорная рама, *4* — металлические распорки, *5* — гидравлический универсальный домкрат, *6* — металлическая опора, *7* — труба диаметром 45 × 3 мм, *8* — опорная пластина

Fig. 2. The scheme of the test bench: a — for a beam of composite I-beam section with a continuous stem made of PSP; b — for a beam of composite I-beam section with a perforated stem made of PSP; c — cross-section view of beam a: 1 — strain gauge, 2 — bolt M16, 3 — bearing frame, 4 — steel lagging, 5 — hydraulic universal jack, 6 — steel support, 7 — pipe diameter 45×3 mm, 8 — support plate



Рис. 3. Испытательный стенд и экспериментальные образцы из ПСП: *a* — со сплошной стенкой; *b* — с перфорированной стенкой: *l* — экспериментальный образец, *2* — испытательный стенд, *3* — гидравлический домкрат, *4* — тензостанция, *5* — тахеометр

Fig. 3. Test bench and test specimen: a — for a beam of composite I-beam section with a continuous stem made of PSP; b — for a beam of composite I-beam section with a perforated stem made of PSP: 1 — test specimen, 2 — test bench, 3 — hydraulic universal jack, 4 — strain-gauge station, 5 — tacheometer

двойной толщины из пултрузионных стеклопластиковых листов размерами 500 × 400 мм толщиной 10 мм каждый по всей длине балки, установленных в шахматном порядке со смещением в 200 мм.

Полки балки составного двутаврового сечения с перфорированной стенкой выполнены из пултрузионных стеклопластиковых уголков сечением 105 × 13 мм, стенка выполнена из пултрузионных стеклопластиковых листов, крайние — размерами 500 × 400 мм толщиной 10 мм, средние — размерами 500 × 200 мм толщиной 10 мм, установленные с шагом 230 мм [27].

Элементы полок и стенки балок составного сечения соединены между собой стальными болтами M16 без контролируемого натяжения, установленными с шагом 100 мм. Натурные испытания проводились на базе НОЦ «Прочность» КГАСУ¹. Образцы балок составного двутаврового сечения из ПСП для испытания предоставлены ООО «Татнефть-Пресскомпозит»². На рис. 2 приведена схема испытаний балок.

По краям балок дополнительно установлены опорные пластины для преждевременного разрушения опорной зоны. В рамках натурного испытания

² Композиционные материалы SMC/BMC технологичность. Качество. Профессионализм. URL: https://www.tnpc.ru/ (дата обращения: 25.10.2023).



Рис. 4. Испытания балки со сплошной стенкой: *a*, *b* — деформации в виде смещения элементов сплошной стенки балки относительно поясов; *с* — общий вид деформации балки

Fig. 4. Testing of a solid wall beam: a, b — deformations in the form of displacement of the elements with a continuous stem of the beam relative to the belts; c — general view of beam deformation

¹ Научно-образовательный центр «Прочность» КГАСУ. URL: https://www.kgasu.ru/science/noc/#prochnost (дата обращения: 12.12.2023).

Экспериментальные исследования несущей способности балок составного двутаврового сечения из пултрузионных стеклопластиковых профилей (ПСП)



а



Рис. 5. Испытания балки с перфорированной стенкой: а, b — деформации в виде смещения элементов перфорированной стенки балки относительно поясов; с — деформации элемента стенки; d — общий вид деформации балки: l риски, 2 — точка измерения перемещения, 3 — срез на 2 мм

Fig. 5. Testing of a beam with a perforated wall: a, b — deformations in the form of displacement of the elements with a perforated stem of the beam relative to the belts; c — deformations of the stem element; d — general view of beam deformation: 1 — marks, 2 — movement measurement points, 3 — shear by 2 mm

принята следующая последовательность подготовки балок составного двутаврового сечения из ПСП:

1. Установка балок на металлические опоры, выполненные из двутавра 20К1. В качестве шарнирных опор использованы круглые трубы диаметром 45, толщиной 3 мм.

2. Установка гидравлического универсального домкрата ДУ20П250 (с максимальным усилием 20 тс). Гидравлический домкрат «ВНЭР-5,0 И40Т1-В» оборудован силоизмерительным оборудованием «ТензоМ70-20.0-С3», а также функцией вывода результатов испытаний на дисплей компьютера.

3. Зачистка поверхностей элементов из пултрузионных стеклопластиковых профилей (ПСП) в местах установки тензорезисторов BF120-10AA.

4. Установка тензорезисторов BF120-10AA на поверхность элементов из ПСП.

5. Установка металлических распорок в середине и на концах балок составного двутаврового сечения из ПСП.

Далее выполняется проверка работоспособности измерительной системы и испытание балок составного двутаврового сечения из ПСП (рис. 3). Натурные испытания производились на действие сосредоточенной нагрузки. Нагрузка прикладывалась поэтапно ступенями не более 0,1 контрольной нагрузки по прочности. На каждой ступени осуществляется выдержка нагрузки в течение 10 мин. Показания приборов считываются постоянно на каждой ступени нагружения.

Для моделирования работы балки составного двутаврового сечения из ПСП как подстропильной конструкции испытания проводятся на трехточечный изгиб. Перед нагружением производится выверка нагрузочных приспособлений относительно заранее нанесенных разметочных рисок на поверхности балки. Таким образом, все возникающие в результате испытаний неравномерности напряжений в поперечных сечениях обусловлены только случайными эксцентриситетами.

В процессе натурного испытания балок составного двутаврового сечения из ПСП при помощи тахеометра «Topcon ES-55» фиксировались вертикальные перемещения на каждом шаге приложения нагрузки (рис. 3).

В ходе испытаний балки со сплошной стенкой наблюдалось равномерное деформирование стенки и полок, увеличение прогиба. При этом предпосылки к хрупкому разрушению не выявлено (рис. 4).

В ходе испытания балки с перфорированной стенкой наблюдался значительный рост деформации элементов, сопровождающийся резкими увеличениями прогибов. Произошло хрупкое разрушение элементов стенок в виде взрыва в зоне болтового соединения с поясами (рис. 5).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

По результатам испытаний определены прогибы балок и построены графики зависимости от нагрузки (рис. 6, 7).

Значение предельного прогиба для балок ($f_{_{3KCH}} = 30$ мм) достигнуто при сосредоточенной нагрузке для балки со сплошной стенкой $P_{_{3KCH}} = 61,3$ кH, для балки с перфорированной стенкой $P_{_{3KCH}} = 19,32$ кH.

Известны результаты численных исследований балки составного двутаврового сечений из ПСП, полученные в программном комплексе «Ansys»¹. По аналогии с [27] дополнительно выполнено моделирование конечно-элементной модели балки составного двутаврового сечения со сплошной стенкой из ПСП. Таким образом, для выполнения сравнительного анализа воспользуемся результатами экспериментальных и численных исследований (рис. 8, 9).

Перед испытаниями выполнен расчет по Руководству³, при этом за расчетное значение несущей

³ Руководство по проектированию и расчету строительных конструкций из пултрузионных стеклопластиковых профилей производства ООО «Татнефть-Пресскомпозит», разработанного ЦНИИСК им. Кучеренко. 2016.



Рис. 6. Зависимости прогиба от экспериментальной нагрузки по результатам испытания балки составного двутаврового сечения из ПСП со сплошной стенкой

Fig. 6. The dependence of the deflection on the experimental load according to the test results of a composite I-beam with a continuous stem is made of PSP



Рис. 7. Зависимости прогиба от экспериментальной нагрузки по результатам испытания балки составного двутаврового сечения из ПСП с перфорированной стенкой

Fig. 7. The dependence of the deflection on the experimental load according to the test results of a composite I-beam with a perforated stem is made of PSP

способности принимается наименьшее, полученное из расчетов по прочности при поперечном изгибе $M_{X \text{nec}}^{\text{np}\varrho} = 27574,79 \text{ кH} \cdot \text{см}$, при продольном изгибе $M_{X \text{nec}}^{\text{np}\chi} = 8292,4 \text{ кH} \cdot \text{см}$, и при местной устойчивости $M_{X \text{nec}}^{\text{nyvr}} = 70660 \text{ кH} \cdot \text{см}$, т.е. при продольном изгибе

Согласно Руководству¹, для определения прогибов и перемещений должно выполняться условие:

$$f \le f_u,\tag{1}$$

где f — прогиб (выгиб) и перемещение элемента конструкций (или конструкции в целом), определяемые с учетом факторов, влияющих на их значения по формуле (2);

 f_u — предельный прогиб (выгиб) или перемещение, устанавливаемые по СП 20.13330⁴.

$$f_{\max} = \frac{Pl^3}{48EI} + \frac{Pl}{4GA_q},$$
 (2)

где *P* — нормативное значение сосредоточенной нагрузки, кН; *E* — расчетное значение модуля упругости, для ПСП определяемый по формуле (4);

I — момент инерции всего сечения относительно центральной оси, м⁴;

G — расчетное значение модуля упругости при сдвиге, для ПСП принимаем по формуле (3), кН/м²;

 A_q — часть площади сечения профиля, которая сопротивляется сдвигу, м².

Принимается наименьшее из полученных при растяжении и сжатии, кН/м².

Расчетное значение модуля упругости для ПСП, принимаем по формулам (3) и (4):

$$G^{P} = G^{H} \cdot \gamma_{T} \cdot \gamma_{w} \cdot \gamma_{\mu\tau}; \qquad (3)$$

$$E^{P} = E^{H} \cdot \gamma_{T} \cdot \gamma_{w} \cdot \gamma_{\mu n}, \qquad (4)$$

где *G*^н — нормативное значение модуля упругости при сдвиге;

Е^н — нормативное значение модуля упругости при растяжении, сжатии;

γ_т — коэффициент условий работы при постоянно действующих повышенных температура;

γ_w — коэффициент условий работы, учитываемый при постоянном увлажнении поверхности конструкций из профилей конденсатом, обрызгиванием,

⁴ СП 20.13330.2016. Свод правил. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07–85* (утв. Приказом Минстроя России от 03.12.2016 № 891/пр) (ред. от 30.12.2020).



Рис. 8. Зависимость прогиба от нагрузки (для балки со сплошной стенкой из ПСП) по результатам экспериментального и численного исследований

Fig. 8. The dependence of deflection on load (with a continuous stem made of PSP) according to the results of experimental and numerical research

проливом или длительном нахождении конструкций из профилей в воде (под слоем воды);

γ_{дл} — коэффициент условий работы, учитывающий длительную нагруженность конструкций.

Для нахождения предварительной нагрузки при прогибе в 3 см, преобразуем формулу (5):

$$P = \frac{f_u}{\left(\frac{l^3}{48EI} + \frac{l}{4GA_q}\right)} = \frac{3}{\left(\frac{600^3}{48 \cdot 2000 \cdot 70844, 3} + \frac{600}{4 \cdot 300 \cdot 100}\right)} = 81,61 \text{ kH.}$$
(5)

Подставляя нормативное значение сосредоточенной нагрузки в формулу (2), получим максимальный прогиб $f_{max} = 3$ см.

Предельное значение нагрузки по результатам теоретического расчета составило $P_{\text{теор}} = 81,61$ кH, экспериментальное значение $P_{_{3KC\Pi}} = 63$ кH. Значение предельной нагрузки, полученной в результате экс-

перимента, меньше на 22,8 % по сравнению с теоретическим расчетом. Такое расхождение можно объяснить отсутствием в существующей методике расчета возможности учитывать податливость узловых соединений стыка полок и стенки. Также для балок со сплошной стенкой не учитывается эффект многослойности стенки, т.е. когда общая толщина стенки, составленная из нескольких пластин, не является «монолитной» между собой.

При этом предельное значение нагрузки по результатам численных расчетов составляет $P_{\text{числ}} = 65,79 \text{ кH},$ что на 4,2 % больше экспериментальных данных.

Для случая балки с перфорированной стенкой невозможно использовать методику расчета, приведенную в Руководстве¹, ввиду отсутствия методики определения момента инерции и положения нейтральной линии в местах, где нет стенки в составе составной балки (с учетом совместной работы всего сечения балки). При этом предельное значение нагрузки по результатам численных расчетов составляет $P_{\text{числ}} = 19,52 \text{ кH}$, что на 1,13 % больше экспериментальных данных.



Рис. 9. Зависимости прогиба от нагрузки (для балки с перфорированной стенкой из ПСП) по результатам экспериментального и численного исследований

Fig. 9. The dependence of deflection on load (with a perforated stem made of PSP) according to the results of experimental and numerical research

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам экспериментальных исследований балок составного двутаврового сечения из ПСП можно сделать следующие выводы:

1. Несущая способность балки составного двутаврового сечения со сплошной стенкой из пултрузионных стеклопластиковых профилей определяется прочностью на изгиб, при этом прогиб достигает предельного значения при нагрузке 90 % от расчетных.

2. Несущая способность балки составного двутаврового сечения со сплошной стенкой из ПСП выше в три раза балки с перфорированной стенкой. При этом балка с перфорированной стенкой требует дальнейшего изучения, с позиции разработки и совершенствования методики ее расчета и проектирования.

3. В балке составного двутаврового сечения с перфорированной стенкой из пултрузионных стеклопластиковых профилей значение прогибов является определяющим ее несущую способность.

4. Сравнительный анализ результатов экспериментального исследования балки составного двутаврового сечения со сплошной стенкой из ПСП с результатами численного исследования показал, что предварительный прогиб в 30 мм для пролета 6 м достигается при нагрузке $P_{_{эксп}} = 61,3$ кН, $P_{_{числ}} = 65,79$ кН соответственно. Таким образом отличие составляет 22,8 %.

5. Сравнительный анализ результатов экспериментального исследования балки составного двутаврового сечения с перфорированной стенкой из ПСП с результатами численного исследования показал, что предварительный прогиб в 30 мм для пролета 6 м достигается при нагрузке $P_{3ксп} = 19,3$ кН, $P_{числ} = 19,52$ кН соответственно. Таким образом отличие составляет 1,13 %, что подтверждает хорошую сходимость результатов.

6. Методику расчета по оценке несущей способности изгибаемых элементов, приведенную в Руководстве¹, возможно использовать для составных балок со сплошной стенкой. Однако, указанную методику невозможно применить для составных балок с перфорированной стенкой ввиду отсутствия методики определения момента инерции и положения нейтральной линии в местах, где нет стенки в составе составной балки (с учетом совместной работы всего сечения балки). Существующие методики расчета не позволяют учитывать податливость узловых соединений стыка полок и стенки. Также для балок со сплошной стенкой не учитывается эффект многослойности стенки, т.е. когда общая толщина стенки, составленная из нескольких пластин, не является «монолитной» между собой.

7. По результатам сравнительного анализа установлено, что применение конечно-элементной модели, в том числе с учетом физико-механических характеристик ПСП, позволяет получать достоверные данные с результатами экспериментальных исследований, что дает возможность использовать данный метод для дальнейших исследований.

Перспективные направления дальнейших исследований связаны с разработкой аналитической методики расчета балок составного сечения из ПСП, определением податливости узловых соединений стыка полок и стенки составной балки, определением их НДС под действием распределенных и сосредоточенных нагрузок.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Кузнецов И.Л., Салахутдинов М.А., Арипов Д.Н., Фахрутдинов А.Э. Разработка и экспериментальные исследования конструкций навеса над трибунами из пултрузионных стеклопластиковых профилей // Известия вузов. Строительство. 2019. № 9. С. 96–108. DOI: 10. 32683/0536-1052-2019-729-9-96-108. EDN PUHXJW.

2. Сулейманов А.М. Эффективные композиционные материалы строительного назначения // Полимерные композиционные материалы нового поколения для гражданских отраслей промышленности : сб. докл. научн. конф. Всеросс. науч.-исслед. институт авиационных материалов. М., 2015. С. 184–195. EDN UUZBZX.

3. Шакиров А.Р., Сулейманов А.М. Выбор конструктивно-подобного образца для испытания на ползучесть клеевых соединений элементов усиления конструкций // Известия КГАСУ. 2023. № 4 (66). С. 8–16. DOI: 10.52409/20731523 2023 4 8. EDN AIRICV.

4. Антаков И.А., Сулейманов А.М. Деформативность изгибаемых бетонных элементов, армированных полимерной композитной арматурой // Известия КГАСУ. 2023. № 3 (65). С. 101–109. DOI: 10.52409/ 20731523_2023_3_101. EDN HJVCIL.

5. *Fiore V., Calabrese I., Scalici T., Valenza A.* Evolution of the bearing failure map of pinned flax composite laminates aged in marine environment // Composites Part B Engineering. 2020. No. 187. P. 107864. DOI: 10.1016/j.compositesb.2020.107864

6. Гимранов Л.Р., Гайнетдинов Р.Г., Багаутдинов Р.М., Атяшева И.С. Составная балка с гофрированной стенкой из тонкостенных оцинкованных профилей // Промышленное и гражданское строительство. 2023. № 4. С. 29–36. DOI: 10.33622/0869-7019.2023.04.29-36. EDN EQIPVY.

7. Lei Cao, Dan Zeng, Yang Liu, Zhaochao Li, Hao Zuo. Deflection calculation method for UHPC composite beams considering interface slip and shear deformation // Engineering Structures. 2023. No. 281 (5). P. 115710. DOI: 10.1016/j.engstruct/2023/115710

8. Zeinali E., Nazari A., Showkati H. Experimentalnumerical study on lateral-torsional buckling of PFRP under pure bending // Composites Structures. 2020. No. 237 (1). P. 111925. DOI: 10.1016/j.compositesb.2020.111925

9. Correia J.R., Branco F.A., Silva N.M., Camotim D., Silvestre N. et al. First-order, buckling and postbuckling behaviour of GFRP pultruded beams. Part 1: experimental study // Comput Struct. 2011. No. 89 (21–22). Pp. 2052–64. DOI: 10.1016/j.compstruc.2011.07.005

10. *Estep D.D.* Bending and shear behavior of pultruded glass fiber reinforced polymer composite beams with closed and open sections. West Virginia University, 2014.

11. Fernandes L.A., Gonilha J., Correia J.R., Silvestre N., Nunes F. et al. Web-crippling of GFRP pultruded profiles. Part 1: experimental study // Compos. Struct. 2015. No. 1 (120). Pp. 655–577.

12. *Liu T., Harries K.A.* Flange local buckling of pultruded GFRP box beams // Compos. Struct. 2018. No.1. Vol. 189. Pp. 463–472. DOI: 10.1016/j.compstruct.2018.01.101

13. *Vieira J.D., Liu T., Harries K.A.* Flexural stability of pultruded glass fibre-reinforced polymer I-sections // Proceedings of the Institution of Civil Engineers — Structures and Buildings. 2017. No. 171 (11). Pp. 855–866. DOI: 10.1680/jstbu.16.00238

14. *Ganesan G., Kumaran G.* An experimental study on the behaviour of GFRP pultruded I beam reinforced with CFRP laminates // International Journal of Advanced Technology and Engineering Exploration. 2018. No. 5 (45). Pp. 232–242. DOI: 10.19101/IJATEE.2018.545012

15. Vieira E.D., Vieira J.D., Cardoso D.C. Local buckling of pultruded GFRP I-section subject to bending // Conference : Brazilian Conference on Composite Materials. 2018. DOI: 10.21452/bccm4.2018.06.05

16. Каюмов Р.А., Шакирзянов Ф.Р., Гимранов Л.Р., Гимазетдинов А.Р. Определение характеристик вязкоупругой модели стеклопластика по результатам изгиба труб квадратного сечения // Известия КГАСУ. 2022. № 2 (60). С. 37–44. DOI: 10.52409/20731523_2022 2_37. EDN BYHQBR.

17. *Liu T*. Stability behavior of pultruded glassfiber reinforced polymer I-Sections subject to flexure (Doctoral dissertation, University of Pittsburgh). 2017. URL: https://d-scholarship.pitt.edu/31511/1/LiuT_ ETDPITT2017.pdf.

 Cardoso D.C., Vieira J.D. Comprehensive local buckling equations for FRP I-sections in pure bending or compression // Composite Structures. 2017. No. 15 (182).
Pp. 301–10. DOI: 10.1016/j.compstruct.2017.09.027

19. *Kasiviswanathan M., Upadhyay A.* Flange buckling behaviour of FRP box-beams: a parametric study // Journal of Reinforced Plastics and Composites. 2018. No. 37 (2). Pp. 105–17. DOI: 10.1177/0731684417736142

20. Kasiviswanathan M., Upadhyay A. Effect of Shear Lag on Buckling of FRP Box-Beams / Rao A., Ramanjaneyulu K. (eds.) // Recent Advances in Structural Engineering. Vol. 2. Lecture Notes in Civil Engineering.Vol. 12. Singapore, 2019. DOI: 10.1007/978-981-13-0365-4 65

21. Каюмов Р.А., Луканин С.А., Паймушин В.Н., Холмогоров С.А. Идентификация механических характеристик армированных волокнами композитов // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Физ.-матем. науки. 2015. Т. 157. Кн. 4. С. 112–132. EDN VBEYRR.

22. Martins D., Proenca M., Correira J.R., Gonilha J., Arruda M., Silvestre N. Development of a novel beam to column connection system for pultruded GFRP tubular profiles // Composite Structures. 2017. No. 171. Pp. 263–276. DOI: 10.1016/j.compstruct. 2017.03.049

23. *Satasivam S., Feng P., Bai Y., Caprani C.* Composite actions within steel-FPR composite beam systems

with novel blind bolt shear connections // Engineering structures. 2017. No. 138. Pp. 63–73. DOI: 10.1016/.eng-struct.2017.01.068

24. Кузнецов И.Л., Фахрутдинов А.Э., Арипов Д.Н. Исследование болтовых соединений элементов из пултрузионных стеклопластиковых профилей (ПСП) // Полимерные композитные материалы нового поколения. Трансфер инноваций из авиации в приоритетные сектора экономики России : сб. ст. Всеросс. науч.-техн. конф. ВИАМ. Ульяновск, 2018. С. 6–15.

25. *Mutsuyoshi H., Nguyen H., Zatar W., Ishihama T.* Flexural behavior of pultruded hybrid fiber-reinforced polymer I-beam with bonded-and-bolted splice joints // Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board. 2016. No. 2592 (1). Pp. 45–55. DOI: 10.3141/2592-06

Поступила в редакцию 6 марта 2024 г. Принята в доработанном виде 27 августа 2024 г. Одобрена для публикации 27 августа 2024 г. 26. Sebastian W.M., Ross J., Keller T., Luke S. Load response due to local and global indeterminacies of FRP-deck bridges // Composites Part B: Engineering. 2012. Vol. 43. No. 4. Pp. 1727–1738. DOI: 10.1016/j.compositesb. 2012.01.061

27. Adilardi A., Russo S. Innovative design approach to a GFRP pedestrian bridge: Structural aspects, engineering optimization and maintenance // Proc., 15th Int. Conf. on Bridge Maintenance, Safety and Management. CRC Press. Balkema, Taylor and Francis Group, Leiden, Netherlands, 2010. Pp. 2455–2459.

28. Салахутдинов М.А., Каюмов Р.А., Арипов Д.Н., Ханеков А.Р. Численное исследование несущей способности балки составного двутаврового сечения из пултрузионных стеклопластиковых профилей // Известия КГАСУ. 2022. № 2 (60). С. 15. DOI: 10.52409/20731523_2022_2_15. EDN BHRXOY.

ОБ АВТОРАХ: Марат Айдарович Салахутдинов — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры металлических конструкций и испытания сооружения; Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КГАСУ); 420043, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1; РИНЦ: 6070-2960, Scopus AuthorID: 825789; lider-kazann@yandex.ru;

Далер Насимович Арипов — кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры металлических конструкций и испытания сооружения; Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КГАСУ); 420043, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1; РИНЦ: 8877-9543, Scopus AuthorID: 1004265; architector-1992@mail.ru;

Арслан Реджепович Ханеков — аспирант, ассистент кафедры металлических конструкций и испытания сооружения; Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КГАСУ); 420043, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1; РИНЦ: 5786-6122, Scopus AuthorID: 1157384, ORCID: 0000-0002-6202-2040; khanekova@kgasu.ru;

Сергей Сергеевич Киселев — студент; Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КГАСУ); 420043, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1, kazanbuilder2002@gmail.com.

Вклад авторов:

Салахутдинов М.А. — научное руководство, научное редактирование текста.

Арипов Д.Н. — проведение экспериментальных, численных и аналитических исследований, научное редактирование текста.

Ханеков А.Р. — проведение экспериментальных, численных исследований, обработка собранного материала, написание исходного текста.

Киселев С.С. — доработка текста, написание и оформление статьи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Kuznetsov I.L., Salahutdinov M.A., Aripov D.N., Fakhrutdinov A.E. Development and experimental studies of canopy structures over bleachers made of pultrusion fiberglass profiles. *News of universities. Construction.* 2019; 9:96-108. DOI: 10.32683/0536-1052-2019-729-9-96-108. EDN PUHXJW. (rus.). 2. Sulejmanov A.M. Effective composite materials for construction purposes. *Polymer composite materials of new generation for civil industries : collection of reports of scientific conference dedicated to the 85th. All-Russian Research Institute of Aviation Materials.* Moscow, 2015; 184-195. EDN UUZBZX. (rus.). 3. Shakirov A.R., Suleymanov A.M. Research of adhesive joints between concrete and carbon fiber on epoxy adhesives of various configurations. *News KSUAE*. 2023; 4(66):8-16. DOI: 10.52409/20731523_2023_4_8. EDN AIRICV. (rus.).

4. Antakov I.A., Suleymanov A.M. Deformability of flexural concrete members reinforced with fiber-reinforced polymer bars. *News KSUAE*. 2023; 3(65):101-109. DOI: 10.52409/20731523_2023_3_101. EDN HJVCIL. (rus.).

5. Fiore V., Calabrese L., Scalici T., Valenza A. Evolution of the bearing failure map of pinned flax composite laminates aged in marine environment. *Composites Part B Engineering*. 2020; 187:107864. DOI: 10.1016/ j.compositesb.2020.107864

6. Gimranov L.R., Gainetdinov R.G., Bagautdinov R.M., Atyasheva I.S. Composite beam with corrugated wall of yhin-walled cold formed profiles. *Industrial and civil construction*. 2023; 4:29-36. DOI: 10.33622/0869-7019. 2023.04.29-36. EDN EQIPVY. (rus.).

7. Lei Cao, Dan Zeng, Yang Liu, Zhaochao Li, Hao Zuo. Deflection calculation method for UHPC composite beams considering interface slip and shear deformation. *Engineering Structures*. 2023; 281(5):115710. DOI: 10.1016/j.engstruct/2023/115710

8. Zeinali E., Nazari A., Showkati H. Experimental-numerical study on lateral-torsional buckling of PFRP under pure bending. *Composites Structures*. 2020; 237(1):111925. DOI: 10.1016/j.compositesb.2020. 1119259.

9. Correia J.R., Branco F.A., Silva N.M., Camotim D., Silvestre N. et al. First-order, buckling and postbuckling behaviour of GFRP pultruded beams. Part 1: experimental study. *Comput Struct.* 2011; 89(21-22):2052-64. DOI: 10.1016/j.compstruc.2011.07.00510

10. Estep D.D. Bending and shear behavior of pultruded glass fiber reinforced polymer composite beams with closed and open sections. West Virginia University, 2014.

11. Fernandes L.A., Gonilha J., Correia J.R., Silvestre N., Nunes F. et al. Web-crippling of GFRP pultruded profiles. Part 1: experimental study. *Compos. Struct.* 2015; 1(120):655-577.

12. Liu T., Harries K.A. Flange local buckling of pultruded GFRP box beams. *Compos. Struct.* 2018; 1(189):463-472. DOI: 10.1016/j.compstruct.2018.01.101

13. Vieira J.D., Liu T., Harries K.A. Flexural stability of pultruded glass fibre-reinforced polymer I-sections. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers* — *Structures and Buildings.* 2017; 171(11):855-866. DOI: 10.1680/jstbu.16.00238

14. Ganesan G., Kumaran G. An experimental study on the behaviour of GFRP pultruded I beam reinforced with CFRP laminates. *International Journal of Advanced Technology and Engineering Exploration.* 2018; 5(45):232-242. DOI: 10.19101/IJATEE.2018.545012

15. Vieira E.D., Vieira J.D., Cardoso D.C. Local buckling of pultruded GFRP I-section subject to bending. *Conference : Brazilian Conference on Composite Materials.* 2018. DOI: 10.21452/bccm4.2018.06.05

16. Kayumov R.A., Shakirzyanov F.R., Gimranov L.R., Gimazetdinov A.R. Determination of the characteristics of a viscoelastic fiberglass model based on the results of bending square section pipes. *News KSUAE*. 2022; 2(60):37-44. DOI: 10.52409/20731523_2022_2_37. EDN BYHQBR. (rus.).

17. Liu T. Stability behavior of pultruded glassfiber reinforced polymer I-Sections subject to flexure *Doctoral dissertation, University of Pittsburgh.* 2017. URL: https://d-scholarship.pitt.edu/31511/1/LiuT_ ETDPITT2017.pdf.

18. Cardoso D.C., Vieira J.D. Comprehensive local buckling equations for FRP I-sections in pure bending or compression. *Composite Structures*. 2017; 15(182): 301-10. DOI: 10.1016/j.compstruct.2017.09.027

19. Kasiviswanathan M., Upadhyay A. Flange buckling behaviour of FRP box-beams: a parametric study. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2018; 37(2):105-17. DOI: 10.1177/0731684417736142

20. Kasiviswanathan M., Upadhyay A. Effect of Shear Lag on Buckling of FRP Box-Beams. Rao A., Ramanjaneyulu K. (eds.). *Recent Advances in Structural Engineering. Vol. 2. Lecture Notes in Civil Engineering.* Vol. 12. Singapore, 2019. DOI: 10.1007/978-981-13-0365-4_65

21. Kayumov R.A., Lukankin S.A., Paimushin V.N., Kholmogorov S.A. Identification of mechanical properties of fiber-reinforced composites. *Scientific notes of Kazan university. Series: physical and mathematical sciences.* 2015; 157(4):112-132. EDN VBEYRR. (rus.).

22. Martins D., Proenca M., Correira J.R., Gonilha J., Arruda M., Silvestre N. Development of a novel beam to column connection system for pultruded GFRP tubular profiles. *Composite Structures*. 2017; 171:263-276. DOI: 10.1016/j.compstruct. 2017.03.049

23. Satasivam S., Feng P., Bai Y., Caprani C. Composite actions within steel-FPR composite beam systems with novel blind bolt shear connections. *Engineering structures*. 2017; 138:63-73. DOI: 10.1016/.engstruct. 2017.01.068

24. Kuznetsov I.L., Fakhrutdinov A.E., Aripov D.N. A study of bolted joints pultruded GRP profiles elements. *Polymer composite materials of new generation. Transfer of innovations from aviation to priority sectors of the Russian economy : collection of articles of All-Russian scientific and technical conference. VIAM.* Ulyanovsk, 2018; 6-15. (rus.).

25. Mutsuyoshi H., Nguyen H., Zatar W., Ishihama T. Flexural behavior of pultruded hybrid fiberreinforced polymer I-beam with bonded-and-bolted splice joints. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*. 2016; 2592(1):45-55. DOI: 10.3141/2592-06 26. Sebastian W.M., Ross J., Keller T., Luke S. Load response due to local and global indeterminacies of FRP-deck bridges. *Composites Part B: Engineering*. 2012; 43(4): 1727-1738. DOI: 10.1016/j.compositesb.2012.01.061.

27. Adilardi A., Russo S. Innovative design approach to a GFRP pedestrian bridge: Structural aspects, engineering optimization and maintenance. *Proc., 15th Int. Conf. on Bridge Maintenance, Safety and Manage-*

Received March 6, 2024. Adopted in revised form on August 27, 2024. Approved for publication on August 27, 2024. *ment. CRC Press.* Balkema, Taylor and Francis Group, Leiden, Netherlands, 2010; 2455-2459.

28. Salakhutdinov M.A., Kayumov R.A., Aripov D.N., Khanekov A.R. Numerical study of the bearing capacity of a composite I-shaped section beam of pultruded fiberglass profiles. *News KSUAE*. 2022; 2(60):15. DOI: 10.52409/20731523_2022_2_15. EDN BHRXOY. (rus.).

BIONOTES: Marat A. Salakhutdinov — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor; Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE); 1 Zelenaya st., Kazan, 420043, Russian Federation; RSCI: 6070-2960, Scopus AuthorID: 825789; lider-kazann@yandex.ru;

Daler N. Aripov — Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer; Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE); 1 Zelenaya st., Kazan, 420043, Russian Federation; RSCI: 8877-9543, Scopus AuthorID: 1004265; architector-1992@mail.ru;

Arslan R. Khanekov — postgraduate student, assistant; Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE); 1 Zelenaya st., Kazan, 420043, Russian Federation; RSCI: 5786-6122, Scopus AuthorID: 1157384, ORCID: 0000-0002-6202-2040; khanekova@kgasu.ru;

Sergey S. Kiselev — student; Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE); 1 Zelenaya st., Kazan, 420043, Russian Federation; kazanbuilder2002@gmail.com.

Contribution of the authors:

Marat A. Salahutdinov — academic advising, scientific editing of the text.

Daler N. Aripov — conducting experimental, numerical and analytical studies, scientific editing of the text.

Arslan R. Khanekov — conducting experimental, numerical studies, processing the collected material, writing the source text.

Sergey S. Kiselyov — revision of the text, writing and formatting of the article. Authors report about the absence of conflict of interests.