

Научная статья
УДК 624.046.2
<https://doi.org/10.24866/2227-6858/2024-3/67-73>

Экспериментальный стенд и методика испытания металлодеревянной двутавровой балки

Ярослава Юрьевна Захарова[✉], Николай Леонидович Тишков

Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск, Российская Федерация
[✉] 012239@pnu.edu.ru

Аннотация. Рациональное распределение материалов в комбинированных конструкциях делает их более выгодными по сравнению с классическими вариантами балок из проката или клееной древесины. В данной работе авторами рассматривается обоснование экспериментального стенда, который возможно применять для изучения напряженно-деформированного состояния металлодеревянных двутавровых балок со стенкой из профилированного листа заводской готовности. Приведены общая конструкция стенда, материалы и приспособления, необходимые для проведения экспериментального исследования.

Ключевые слова: поперечно гофрированная стенка, гофр, металлодеревянная балка, двутавровая балка, экспериментальный стенд

Для цитирования: Захарова Я.Ю., Тишков Н.Л. Экспериментальный стенд и методика испытания металлодеревянной двутавровой балки // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2024. № 3(60). С. 67–73.

Original article

Experimental stand and testing method for a metal-wood I-beam

Iaroslava Y. Zakharova[✉], Nikolay L. Tishkov

Pacific National University, Khabarovsk, Russian Federation
[✉] 012239@pnu.edu.ru

Abstract. The rational distribution of materials in combined structures makes them more profitable in comparison with the classic versions of beams made of rolled or laminated wood. In this work, the authors consider the rationale for an experimental stand that can be used to study the stress-strain state of metal-wood I-beams with a wall made of prefabricated profiled sheet. The general design of the stand, materials and devices necessary for carrying out the experimental study are presented.

Keywords: transversely corrugated web, corrugation, metal-wood beam, I-beam, experimental stand

For citation: Zakharova I., Tishkov N. Experimental stand and testing method for a metal-wood I-beam. *FEFU: School of Engineering Bulletin*, 2024, no. 3(60), pp. 67–73. (In Russ.).

Введение

Комбинированные конструкции вызывают интерес для исследователей по причине того, что отдельные материалы, применяемые в таких конструкциях, уже зарекомендовали свою эффективность. Дальнейшее изучение должно быть направлено на сочетание различных преимуществ материалов с целью получения новых качественных показателей. Одним из ва-

риантов комбинированных конструкций являются двутавровые металлодеревянные балки с поперечно-гофрированной стенкой. Благодаря рациональному распределению материалов в сечении в соответствии с изученным напряженно-деформированным состоянием, данная комбинация позволяет добиться снижения материалоемкости, а поперечно-гофрированная стенка из тонкого стального листа обладает достаточной несущей способностью и запасом устойчивости за счет своей пространственной формы. Эффективность применения гофрированной стенки в стальных балках достаточно хорошо изучена и описана во многих научных работах [1–5], в них разбиралась несущая способность не только по критериям прочности, но также и по общей устойчивости, местной устойчивости полок и стенок в отдельности.

Число исследований металлодеревянных балок за последние годы незначительно, но по опубликованным данным можно сделать вывод о перспективности этого направления [6–8]. Деревянные конструкции легкие, прочные и надежные, а в комбинации с металлом положительные свойства должны усиливаться. Существующие и применяемые в Европе HTS-балки обладают схожей конструкцией и зарекомендовали себя с хорошей стороны. Но для расчета таких балок отсутствуют какие-либо нормативные документы и рекомендации, которые могли бы помочь определиться с оптимальными геометрическими параметрами и произвести расчет несущей способности, исходя из чего необходимо развивать данное направление исследований.

Одна из основных проблем и сложностей в создании металлодеревянных двутавровых балок заключается в обеспечении прочности соединения материалов между собой. Различными авторами были рассмотрены следующие способы закрепления: соединение при помощи стальных нагелей, впрессовка в древесину за счет зубчатой формы стальной стенки, клеевое соединение, при помощи гвоздей и т.д. [6–8].

В данной работе в качестве способа крепления гофрированной стенки с деревянными поясами выбрано клеевое соединение для дальнейшего изучения. Данное соединение обеспечивается за счет размещения стального листа в предварительно подготовленный паз в теле пояса с последующим заполнением эпоксидной смолой.

Ранее как наиболее рациональное было выделено конструктивное решение металлодеревянной двутавровой балки с применением листов заводской готовности по ГОСТ 24045-2016 в качестве поперечно-гофрированной стенки. Несущая способность и характер разрушения были изучены на конечно-элементной модели в программном комплексе «ЛИРА-САПР», были сделаны выводы о наиболее эффективных формах гофр [9–10].

Опытный образец металлодеревянной балки выполнен длиной 4 м, в местах действия нагрузки дополнительно установлены деревянные бруски, высота стенки 260 мм, пояса сечением 100x50(h) мм, стенка из стального профилированного листа С21-1000-0.6 (рис. 1), ожидаемая несущая способность не менее 8 кН/м.



Рис. 1. Опытный образец металлодеревянной двутавровой балки

Fig. 1. Prototype of a metal-wood I-beam

Авторами поставлена задача экспериментально подтвердить полученные результаты расчетов, определив действительную работу конструкции под нагрузкой, а также значения критической нагрузки на опытный образец, приводящей к разрушению или местной потере устойчивости стенки, при загрузке двумя сосредоточенными силами шарнирно-опертой балки.

Экспериментальный стенд

Авторами был собран экспериментальный стенд на базе лаборатории высшей школы «Промышленное и гражданское строительство» Тихоокеанского государственного университета для испытания и исследования напряженно-деформированного состояния металлодеревянных двутавровых балок [11] с поперечно-гофрированной стенкой, выполненной из профилированного листа заводской готовности по ГОСТ 24045-2016.

Общая схема экспериментального стенда представлена на рисунках 2–3.

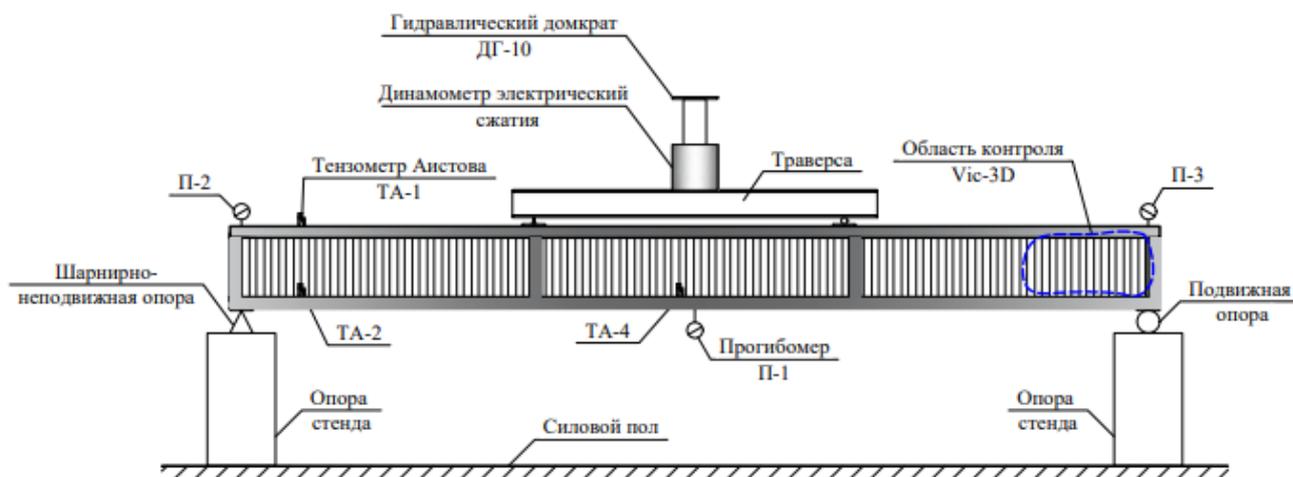


Рис. 2. Схема испытательного стенда

Fig. 2. Scheme of the test stand

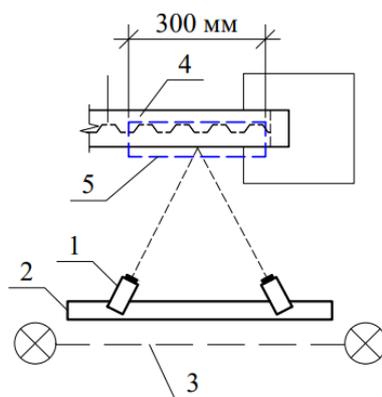


Рис. 3. Схема установки Vic-3D:

- 1 – камеры прибора Vic-3D; 2 – штатив; 3 – дополнительное освещение;
4 – испытываемый образец; 5 – область исследований

Fig. 3. Scheme of the installation Vic-3D: 1 – lens of the Vic-3D device; 2 – tripod; 3 – lighting; 4 – test sample; 5 – area of research

Исследуемая конструкция прототипа металлодеревянной балки размещена на шарнирно-подвижной и шарнирно-неподвижной опорах с ограничением поворота опор относительно оси балки по однопролетной схеме. Для избежания смятия от сосредоточенных нагрузок в местах их приложения дополнительно установлены пластины, распределяющие давление, также пластины установлены под опоры. Нагружение конструкции осуществляется че-

рез верхний пояс с помощью гидравлического домкрата, который в свою очередь через траверсу передает две сосредоточенные силы, симметрично расположенные в третях пролета, на балку. Для контроля величины давления, создаваемого домкратом, установлен электрический динамометр сжатия, позволяющий фиксировать значения с точностью $2 \cdot 10^5$ кН.

На приопорной зоне, где ожидается потеря местной устойчивости гофрированной стенки, нанесено облако точек (рис. 4) для исследования при помощи цифровой оптической системы Vic-3D. Данный прибор позволяет бесконтактно производить измерения деформаций на основе метода корреляции цифровых изображений в режиме реального времени (отслеживается изменение состояния небольшого участка в процессе нагружения при помощи камер). На основании данной фиксации производится оценка изменения деформаций и картины распределения их на каждом этапе загрузки: приложение нагрузки, выдерживание под ней и переход к следующей стадии. Посредством этого способа будут получены данные о характере потери местной устойчивости гофрированной стенки вблизи опор и соотнесение результатов с теми, что были получены на основании проведенных численных экспериментов в программном комплексе «ЛИРА-САПР».



Рис. 4. Облако точек для Vic-3D

Fig. 4. Point cloud for Vic-3D

Для определения напряжений в деревянных поясах, на них устанавливаются тензометры Аистова попарно относительно поперечного сечения балки (с края балки и в середине пролета) с базой 100 мм и точностью измерений до $1 \cdot 10^4$ мм.

Для фиксации прогиба и перемещений опор в исследуемой двутавровой балке установлены индикаторы часового типа (цена деления 0,01 мм) на нижний пояс в середине пролета и на верхний пояс на двух опорах.

Расчетная схема для испытания представлена на рисунке 5.

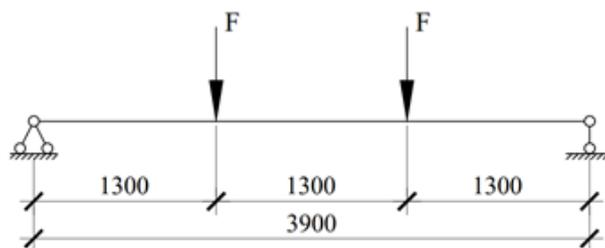
**Рис. 5. Расчетная схема балки**

Fig. 5. Calculation diagram of the beam

Методика проведения натуральных испытаний

Для осуществления натуральных испытаний предлагается использовать рассмотренный ранее стенд. Экспериментальное исследование на различные стадии загрузки с целью определения критической нагрузки, которую могут воспринять металлодеревянные балки предложенной конструкции, следует проводить в следующей последовательности.

1. Перед установкой конструкции в испытательный стенд выполнить нанесение облака точек в приопорных зонах с целью контроля деформаций в гофрах. Плотность нанесенных точек должна быть достаточно высокой, чтобы при обработке результатов 3D-картина деформаций была полной без просветов.

2. Установив опытный образ в стенд, выполнить настройку света для Vic-3D, исключив засветы и блики поверхностях. Установить тензометры и прогибомеры.

3. Выполнить приложение нагрузки поэтапно. Предполагается, что величина критической сосредоточенной силы F составляет 12,5 кН. Величина давления, создаваемого гидравлическим домкратом, на одном этапе – $2F=3$ кН.

4. После приложения каждого этапа нагрузки конструкция выдерживается под ней не менее 10 минут, по истечении которых происходит фиксация промежуточных значений с установленных приборов, осмотр конструкции и фотофиксация балки. Показания с приборов на каждом этапе снимают дважды – непосредственно после приложения и после выдержки под нагрузкой. Измерения цифровой оптической системой Vic-3D просматриваются на каждом этапе.

Предполагается, что разрушение конструкции металлодеревянной двутавровой балки с поперечно-гофрированной стенкой произойдет вследствие разрушения деревянных поясов. Сначала начнут появляться трещины в поясах, а после потеряет местную устойчивость стенка в приопорных зонах. Разрушение по клеевому соединению не ожидается.

Заключение

В лаборатории высшей школы «Промышленное и гражданское строительство» Тихоокеанского государственного университета разработан и реализован экспериментальный стенд по оценке несущей способности однопролетных металлодеревянных двутавровых балок с поперечно-гофрированной стенкой при приложении сосредоточенных сил к верхнему поясу в плоскости стенки по схеме чистого изгиба.

Проведение запланированных экспериментальных работ позволит оценить адекватность полученных данных о работе металлодеревянных балок с профилированным листом в качестве стенки посредством численного моделирования и сравнить с результатами других исследователей.

ВКЛАД АВТОРОВ | CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Я.Ю. Захарова – создание прототипов исследуемой конструкции, формирование испытательного стенда, анализ существующей информации по исследованию металлодеревянных балок, Н.Л. Тишков – создание прототипов исследуемой конструкции, формирование испытательного стенда, анализ существующей информации по исследованию металлодеревянных балок. Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The authors confirm contribution to the paper as follows: I.Y. Zakharova – creation of prototypes of the structure under study, formation of a test stand, analysis of existing information on the study of metal-wood beams; N.L. Tishkov – creation of prototypes of the structure under study, formation of a test stand, analysis of existing information on the study of metal-wood beams. All authors reviewed the results and approved the final version of the manuscript.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ | CONFLICT OF INTERESTS

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflict of interest.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Егоров П.И. Дополнительные изгибно-крутящие усилия в двутавровом стержне с поперечным непрерывным трапецидальным профилем гофров в стенке // Промышленное и гражданское строительство. 2007. № 10. С. 34–35. EDN: ICAPXV
2. Степаненко А.Н., Егоров П.И. Стальные двутавровые балки с тонкой волнистой стенкой. Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2015. 155 с. URL: <https://lib.pnu.edu.ru/downloads/TextExt/uchposob/Stepanenko1.pdf?id=1423935> (дата обращения: 29.04.2024).
3. Chan C.L., Khalid Y.A., Sahari B.B. Hamouda, A.M.S. Finite element analysis of corrugated web beams under bending // Journal of Constructional Steel Research. 2002. Vol. 58, № 11. P. 1391–1406. [https://doi.org/10.1016/S0143-974X\(01\)00075-X](https://doi.org/10.1016/S0143-974X(01)00075-X)
4. Yan-Lin G., Hang C., Yong-Lin P., Mark A. B. In-plane strength of steel arches with a sinusoidal corrugated web under a full-span uniform vertical load: Experimental and numerical Investigations // Engineering Structures. 2016. Vol. 110. P. 105–115. <https://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.11.056>
5. Брянцев, А.А., Абсиметов В.Э., Лалин В.В. Эффективность применения двутавров с гофрированными стенками в производственных зданиях // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2017. № 3(54). С. 93–104. <https://doi.org/10.18720/CUBS.54.8>
6. Черных А.Г., Игнатович А.В., Клёван В.И., Мухаммедов М.М. Экспериментальные исследования металлодеревянных балок двутаврового сечения со стальной гофрированной стенкой // Инновации в деревянном строительстве: материалы 11-й международной научно-практической конференции, 22–23 апреля 2021, Санкт-Петербург / Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. Санкт-Петербург: СПбГАСУ, 2021. С. 26–37. URL: <https://doc.spbgasu.ru/ipo/Инновации%20в%20деревянном%20строительстве.pdf> (дата обращения: 05.05.2024).
7. Грачёв В.А. Экспериментальное исследование металлодеревянной балки двутаврового сечения с поперечно гофрированной стенкой // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Строительство. 2019. № 1. С. 41–49. EDN: GBUGDL
8. Кузнецов И.Л., Актуганов А.Н., Актуганов А.А., Котлов В.Г. Разработка и исследование металлодеревянной двутавровой балки с полуцилиндрическими ребрами жесткости, усиленными дополнительными крепежными элементами // Приволжский научный журнал. 2012. № 4. С. 47–54. EDN: PXBNQL
9. Тишков Н.Л., Степаненко А.Н., Захарова Я.Ю. Обоснование оптимального профиля поперечно-гофрированной стенки металлодеревянной двутавровой балки // Вестник Инженерной школы ДВФУ. 2021. № 2(47). С. 75–81. <https://doi.org/10.24866/2227-6858/2021-2-8>
10. Тишков Н.Л., Егоров П.И., Захарова Я.Ю., Попова В.С. Совершенствование конструкции металлодеревянной балки двутаврового сечения // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. 2022. № 1(39). С. 5–9. <https://doi.org/10.52684/2312-3702-2022-39-1-5-9>
11. Захарова Я.Ю., Тишков Н.Л. Металлодеревянная двутавровая балка – технология изготовления // Дальний Восток: проблемы развития архитектурно-строительного комплекса. 2023. № 1. С. 26–30. EDN: HQHVSВ.

REFERENCES

1. Yegorov P.I. Additional bending and twisting stresses in a double-t bar with a cross continuous trapezoidal section of crimps in a web. *Industrial and Civil Engineering*, 2007, no. 10, pp. 34–35. (In Russ.).
2. Stepanenko A.N., Egorov P.I. Steel I-beams with a thin wavy wall. Khabarovsk, 2015, 155 p. (In Russ.).
3. Chan C.L., Khalid Y.A., Sahari B.B. Hamouda, A.M.S. Finite element analysis of corrugated web beams under bending. *Journal of Constructional Steel Webs*, 2002, vol. 58, no. 11, pp. 1391–1406. [https://doi.org/10.1016/S0143-974X\(01\)00075-X](https://doi.org/10.1016/S0143-974X(01)00075-X)

4. Yan-Lin G., Hang C., Yong-Lin P., Mark A. B. In-plane strength of steel arches with a sinusoidal corrugated web under a full-span uniform vertical load: Experimental and numerical Investigations. *Engineering Structures*, 2016, vol. 110, no. 1, pp. 105–115. <https://dx.doi.org/10.1016/j.eng-struct.2015.11.056>
5. Bryantsev, A.A., Absimetov V.E., Lalin V.V. Efficiency of using I-beams with corrugated walls in industrial buildings. *Construction of Unique buildings and structures*, 2017, no. 3(54), pp. 93–104. (In Russ.). <https://doi.org/10.18720/CUBS.54.8>
6. Chernykh A.G., Ignatovich A.V., Klevan V.I., Mukhamedov M.M. Experimental studies of metal-wood beams of I-section with a steel corrugated wall. Innovations in wooden construction: materials of the 11th international scientific and practical conference, April 22–23, 2021, St. Petersburg / St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering. St. Petersburg, SPSUACE, 2021. P. 26–37. (In Russ.). URL: <https://doc.spbgasu.ru/ipo/Инновации%20в%20деревянном%20строительстве.pdf> (accessed: May 5, 2024).
7. Grachev V.A. Experimental study of the hybrid steel-wooden i beam with a transversely corrugated web. Tradition and innovation in construction and architecture. *Construction*, 2019, no. 1, pp. 41–49. (In Russ.).
8. Kuznecov I.L., Aktuganov A.N., Aktuganov A.A., Kotlov V.G. Development and research of a metal-wood I-beam with semi-cylindrical stiffeners, reinforced with additional fasteners. *Privolzhsky Scientific Journal*, 2012 no. 4 pp. 47–54. (In Russ.).
9. Tishkov N.L., Stepanenko A.N., Zakharova I.Y. Substantiation of the optimal profile of the cross-corrugated wall of metal-wood I-beam. *FEFU: School of Engineering Bulletin*, 2021, no. 2(47), pp. 75–81. (In Russ.). <https://doi.org/10.24866/2227-6858/2021-2-8>
10. Tishkov N.L., Egorov P.I., Zakharova I.Y., Popova V.S. Improvement of the design of a metal-wooden beam on a I-section. *Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Region*, 2022, no. 1(39), pp. 5–9. (In Russ.) <https://doi.org/10.52684/2312-3702-2022-39-1-5-9>
11. Zakharova I.Y., Tishkov N.L. Metal-wood I-beam – production technology. *Far East: Problems of development of architectural, construction and road transport complexes*, 2023, no. 1, pp. 26–30 (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ | INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Захарова Ярослава Юрьевна – аспирант, Высшая школа промышленного и гражданского строительства, Тихоокеанский государственный университет (Хабаровск, Российская Федерация)

✉ 012239@pnu.edu.ru, <https://orcid.org/0009-0000-8683-3131>

Iaroslava Y. Zakharova, Postgraduate Student of the High School of Industrial and Civil Construction, Pacific National University (Khabarovsk, Russian Federation)

Тишков Николай Леонидович – кандидат технических наук, доцент, Высшая школа промышленного и гражданского строительства, Тихоокеанский государственный университет (Хабаровск, Российская Федерация)

✉ n.tishkov87@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2891-4926>

Nikolay L. Tishkov, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the High School of Industrial and Civil Construction, Pacific National University (Khabarovsk, Russian Federation)

Статья поступила в редакцию / Received: 11.05.2024.

Доработана после рецензирования / Revised: 03.06.2024.

Принята к публикации / Accepted: 20.09.2024.