

Строительные конструкции, здания и сооружения

DOI: <https://doi.org/10.24866/2227-6858/2021-2-8>
УДК 624.016

Н.Л. Тишков, А.Н. Степаненко, Я.Ю. Захарова

ТИШКОВ НИКОЛАЙ ЛЕОНИДОВИЧ – к.т.н., доцент (автор, ответственный за переписку),
SPIN: 5945-4287, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2891-4926>, n.tishkov87@gmail.com
СТЕПАНЕНКО АНАТОЛИЙ НИКОЛАЕВИЧ – д.т.н., профессор, SPIN: 4225-1424,
000419@pnu.edu.ru
ЗАХАРОВА ЯРОСЛАВА ЮРЬЕВНА – магистрант, SPIN: 4467-9044, yaroyurz@gmail.com
Тихоокеанский государственный университет
Хабаровск, Россия

Обоснование оптимального профиля поперечно-гофрированной стенки металлодеревянной двутавровой балки

Аннотация: Сочетание преимуществ материалов металлодеревянных балок может обеспечить оптимальное их распределение по сечению, что повышает эффективность конструкций. В данной работе авторы обосновывают оптимальный вид профиля поперечно-гофрированной стенки, изготовленной из стальных профилированных листов заводской готовности, металлодеревянной двутавровой балки. Приведены конечно-элементные модели исследуемых конструкций, а также результаты и анализ численных экспериментов с использованием программного комплекса «ЛИРА-САПР». Для рассматриваемых моделей балок впервые получены формы потери устойчивости гофрированных стенок с коэффициентами запаса, деформированные схемы и изополя распределения нормальных и касательных напряжений.

Ключевые слова: гофрированная стенка, гофр, металлодеревянная балка, метод конечных элементов

Введение

В современном мире сохраняется тенденция роста спроса на деревянные каркасные малоэтажные дома. В качестве элементов перекрытия в каркасах используют деревянные доски или комбинированные балки. При этом второй вариант обеспечивает снижение материалоемкости строительных конструкций. К этому варианту относятся металлодеревянные балки с гофрированной стальной стенкой, конструкция которых предполагает оптимальное распределение материала в соответствии с напряженно-деформированным состоянием элементов, что обеспечивает снижение веса и повышение устойчивости стенки балки благодаря использованию гофрированного стального листа. Концепция металлодеревянной двутавровой балки предполагает сочетание преимуществ обоих материалов.

Из-за отсутствия нормативных документов, регламентирующих расчет данного вида конструкций, нахождение оптимальных геометрических параметров гофрирования стенки по сей день остается актуальной задачей: их определение позволит в полной мере реализовать потенциал металлодеревянной двутавровой балки.

В последние годы вышло не так много исследований, которые посвящены металлодеревянным балкам, если сравнивать с трудами, например по цельнометаллическим конструкциям: работа гофрированной стенки в них довольно хорошо изучена и доказана эффективность ее применения [3, 11–15]. Именно поэтому, мы полагаем, необходимо развивать

направление модификации пролетных металлодеревянных балок с целью повышения их несущей способности, а также проводить анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкций при различных условиях эксплуатации с помощью моделирования в различных программных комплексах и сравнение (по возможности) с натурными испытаниями данного вида конструкций.

Виды модификации металлодеревянных балок:

- способ крепления металлической стенки к поясам [1, 2, 4, 7–9];
- использование стальных профилированных листов по ГОСТ 24045-2016 «Профили стальные гнутые с трапециевидными гофрами для строительства» в качестве стенки, гофры которых ориентированы вертикально [2];
- использование стальных профилированных листов по ГОСТ 24045-2016 в качестве дополнительного укрепления балки, гофры которых ориентированы вдоль пролета [5, 6];
- очертание гофров (треугольное, трапециевидное, синусоидальное) поперечно-гофрированной стенки [10].

Наиболее перспективным направлением является использование в качестве стенки стальных профилированных листов заводской готовности по ГОСТ 24045-2016 (рис. 1), что позволит более полно реализовать потенциальные возможности по несущей способности, сократить расходы на изготовление, повысить надежность и поспособствовать широкому внедрению. В связи с этим возникает вопрос о выборе оптимального вида профиля заводской готовности, на который нет ответа в доступных источниках.

В настоящей статье мы предпримем попытку обосновать оптимальный вид профиля численным экспериментом с анализом полученных результатов.

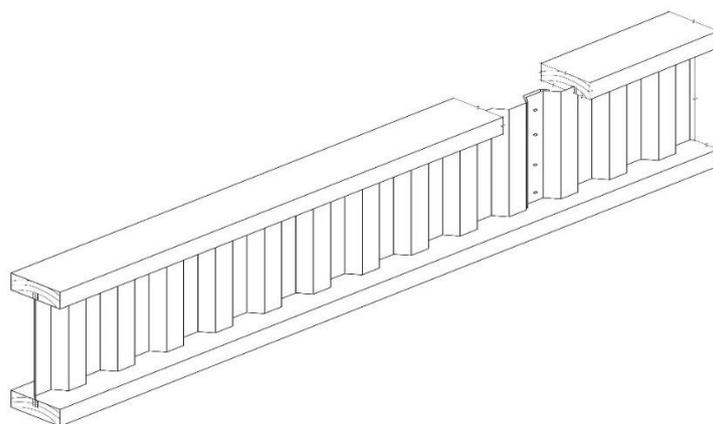


Рис. 1. Конструкция металлодеревянной двутавровой балки со стенкой из стальных профилированных листов заводской готовности

Цели и задачи

Для того чтобы достичь цели статьи – обосновать оптимальный вид профиля поперечно-гофрированной стенки, изготовленной из стальных профилированных листов заводской готовности по ГОСТ 24045-2016, металлодеревянной двутавровой балки, нам необходимо решить следующие задачи.

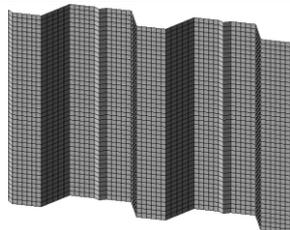
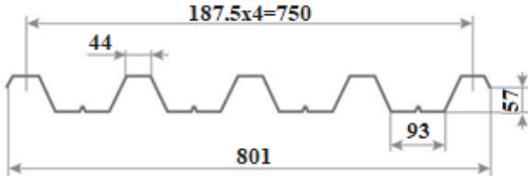
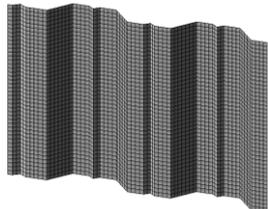
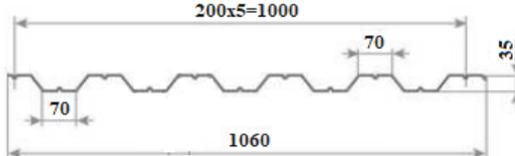
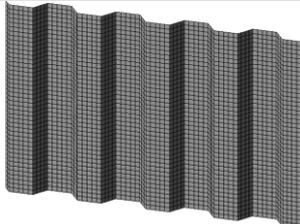
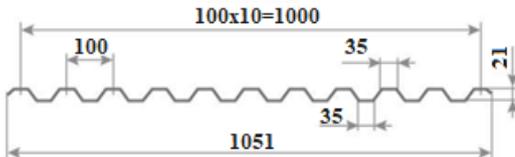
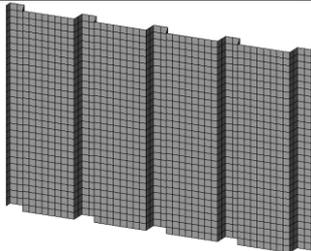
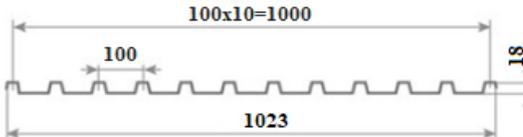
1. Создать модели металлодеревянных балок со стенками разной конфигурации в программном комплексе «ЛИРА-САПР».
2. Произвести расчет и оценить напряженно-деформированное состояние металлодеревянных балок методом конечных элементов при одинаковых граничных условиях, нагрузках и свойствах материалов.
3. Оценить устойчивость гофрированных стенок посредством программного комплекса «ЛИРА-САПР».
4. Провести сравнительный анализ полученных результатов.

Моделирование работы металлодеревянных двутавровых балок с тонкими поперечно-гофрированными стенками

В программном комплексе «ЛИРА-САПР» нами были созданы конечно-элементные модели металлодеревянных балок с различными профилями поперечных гофров для оценки их НДС и форм потери устойчивости с коэффициентами запаса. Форма и размеры поперечного сечения гофрированной стенки приняты по ГОСТ 24045-2016. Рассматриваемые варианты поперечного гофрирования стенки представлены в табл. 1.

Таблица 1

Варианты поперечного гофрирования стенки металлодеревянной балки

Маркировка	Пространственная модель стенки	Геометрия профиля стенки
H57-750-0,6		
HC35-1000-0,6		
C21-1000-0,6		
C18-1000-0,6		

Все модели балок имеют одинаковые пролеты – по 4 м, высоту стенки – 300 мм, толщину стенки – 0,6 мм, а также сечение деревянных поясов 50(h)x100 мм. Геометрические параметры гофрирования стенки приняты по ГОСТ 24045-2016. Расчетная схема – однопролетная шарнирно-опертая балка.

Создание моделей балок производилось при помощи пластинчатых четырехузловых конечных элементов типа КЭ-44 с постоянными (одинаковыми) во всех направлениях параметрами упругости. Стенка принята из стали с модулем упругости $E = 2,06 \cdot 10^4$ кН/см² и коэффициентом Пуассона $\nu = 0,3$. Верхний и нижний пояса балки приняты из древесины с модулем упругости $E = 1,0 \cdot 10^3$ кН/см² и коэффициентом Пуассона $\nu = 0,45$.

К верхнему поясу каждой модели прикладывалась равномерно распределенная нагрузка величиной в 8 кН/м (нагрузка распределена по площади участка пояса шириной, равной высоте гофров). Общие виды фрагментов конечно-элементных моделей приведены на рис. 2.

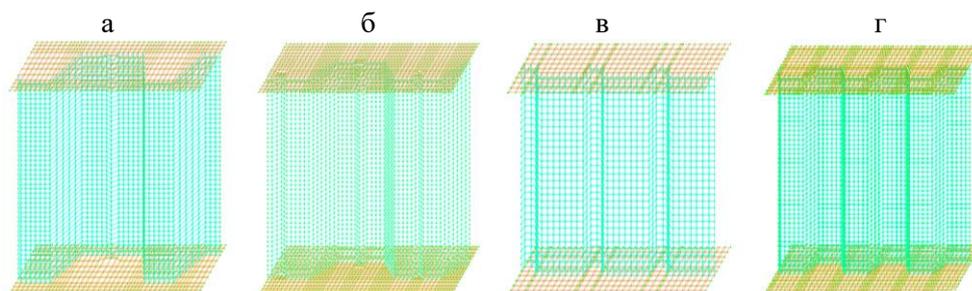


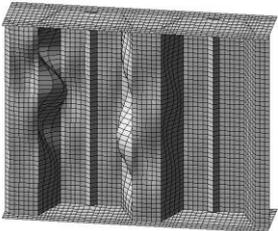
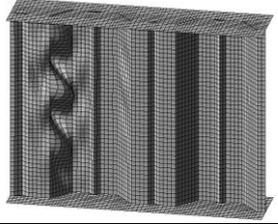
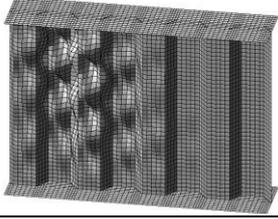
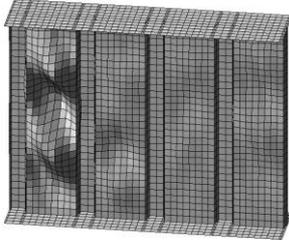
Рис. 2. Фрагменты конечно-элементных моделей балок, стенка с профилем гофров: а – Н57-750-0,6; б – HC35-1000-0,6; в – С18-1000-0,6; г – С21-1000-0,6

Результаты моделирования, их обсуждение

Основные результаты расчета моделей при равномерно распределенной нагрузке для четырех вариантов поперечного гофрирования стенок балок представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты расчета балок от равномерно распределенной нагрузки

Маркировка	Форма потери устойчивости	Коэффициент потери устойчивости	Прогиб в середине пролета, мм	Вид потери устойчивости стенки по [11]
Н57-750-0,6		1,41347	13,6	Потеря «местной» устойчивости стенки
HC35-1000-0,6		2,42271	13,1	Потеря «местной» устойчивости стенки
С21-1000-0,6		3,7258	13,1	Потеря «общей» устойчивости стенки
С18-1000-0,6		1,04144	13,3	Потеря «общей» устойчивости стенки

Примечание. Физический смысл коэффициента потери устойчивости конструкции состоит в том, что если увеличить нагрузки, действующие на конструкцию в k раз, то система потеряет устойчивость.

Полученные данные свидетельствуют о том, что:

- металлодеревянная балка с гофрированной стенкой из профилированного листа С21-1000-0,6 имеет самый высокий коэффициент потери устойчивости из рассматриваемых вариантов ($k = 3,7258$, потеря «общей» устойчивости);
- при увеличении высоты гофров (при наличии прямолинейных участков) происходит потеря «местной» устойчивости, сопровождающаяся выпучиванием отдельных участков гофров;
- при использовании профилированных листов с односторонними гофрами с незначительной высотой гофров (С18-1000-0,6) происходит потеря «общей» устойчивости стенки;
- касательные напряжения, возникающие в стенках, практически постоянны по ее высоте;
- нормальные напряжения по ширине поясов распределяются равномерно, что вызвано существенным различием в жесткостях стенки и поясов;
- несущая способность моделей металлодеревянных балок с гофрированными стенками составляет не менее 8 кН/м.

Заключение

В ходе проведенного численного эксперимента установлено, что наиболее оптимальный профиль гофрированной стенки металлодеревянной балки – профилированный лист С21-1000-0,6 по ГОСТ 24045-2016. Его использование при изготовлении названных конструкций позволит повысить устойчивость стенки и резерв несущей способности балки.

В целом же для рассматриваемых моделей балок впервые получены формы потери устойчивости гофрированных стенок с коэффициентами запаса, деформированные схемы и изополя распределения нормальных и касательных напряжений.

Дальнейшее направление исследований предполагает моделирование работы металлодеревянных балок с учетом конструктивных особенностей контактной зоны стенки и поясов.

Вклад авторов в статью: Н.Л. Тишков – проблематика, постановка задачи исследования, общее руководство, обобщение результатов, ответственность за целостность всех частей статьи; А.Н. Степаненко – анализ результатов численного моделирования, выводы; Я.Ю. Захарова – создание конечно-элементных моделей в расчетном комплексе «ЛИРА-САПР», проведение численного исследования, интерпретация результатов. Все авторы – утверждение окончательного варианта статьи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Актуганов А.Н., Актуганов А.А., Актуганов О.А., Котлов В.Г., Кузнецов И.Л. Работа тонкостенной металлодеревянной двутавровой балки с ортогональными ребрами жесткости в виде гофр различного сечения // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2013. № 11–12. С. 66–72.
2. 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.
3. Егоров П.И. Дополнительные изгибно-крутящие усилия в двутавровом стержне с поперечным непрерывным трапецеидальным профилем гофров в стенке // Промышленное и гражданское строительство. 2007. № 10. С. 34–35.
4. Иванова К.О., Грачёв В.А. Сравнительный анализ и численное моделирование гибридных балок с деревянными поясами и волнистой стальной стенкой // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Строительство. 2018. № 1. С. 23–29.
5. Калинин С.В., Жаданов В.И. Экспериментальные исследования деревометаллических балок со стенкой из стального профилированного листа при поперечном изгибе // Вестник ТГАСУ. 2012. № 3. С. 117–125.
6. Калинин С.В., Жаданов В.И., Украинченко Д.А., Лисов С.В. Особенности напряженно-деформированного состояния деревометаллических балок со стенкой из стальных профилированных листов // Вестник ОГУ. 2012. № 9. С. 184–190.

7. Кузнецов И.Л., Акутуганов А.Н., Акутуганов А.А., Котлов В.Г. Разработка и исследование металлодеревянной двутавровой балки с полуцилиндрическими ребрами жесткости, усиленными дополнительными крепежными элементами // Приволжский науч. журн. 2012. № 4. С. 47–54.
8. Кузнецов И.Л., Акутуганов А.А., Трофимов А.П. Разработка и исследование металлодеревянной двутавровой балки // Известия КГАСУ. 2010. № 1. С. 117–121.
9. Лютов Л.В. Применение составных комбинированных балок в конструкциях малоэтажных деревянных домов // MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture: Polish Academy of Science. 2013. Т. 15, № 15. С. 151–156.
10. Митрофанов С.В., Митрофанов В.А. Работа балки с гофрированной стенкой с различными профилями гофрирования // Строительство и техногенная безопасность. 2017. № 9. С. 87–92.
11. Степаненко А.Н., Егоров П.И. Стальные двутавровые балки с тонкой волнистой стенкой. Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2015. 155 с.
12. Степаненко А.Н., Тишков Н.Л. Об участии в работе тонкой гофрированной стенки стального двутавра на продольные усилия // Вестник ВСГУТУ. 2016. № 4. С. 41–45.
13. Abbas H.H., Sauce R., Driver R.G. Simplified analysis of flange transverse bending of corrugated web I-girders under in-plane moment and shear. *Engineering Structures*. 2007;29(11):2816–2824. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2007.01.006>
14. Chan C.L., Khalid Y.A., Sahari B.B., Hamouda A.M.S. Finite element analysis of corrugated web beams under bending. *J. of Constructional Steel Webs*. 2020;58(11):1391–1406. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0143-974X\(01\)00075-X](https://doi.org/10.1016/S0143-974X(01)00075-X)
15. 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;110(1):105–115. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.11.056>

FEFU: SCHOOL of ENGINEERING BULLETIN. 2021. N 2/47

Buildings and Structures

www.dvfu.ru/en/vestnikis

DOI: <https://doi.org/10.24866/2227-6858/2021-2-8>

Tishkov N., Stepanenko A., Zakharova Y.

NIKOLAY TISHKOV, Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor (Corresponding Author), SPIN: 5945-4287,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2891-4926>, n.tishkov87@gmail.com
ANATOLY STEPANENKO, Doctor of Engineering Sciences, Professor, SPIN: 4225-1424,
000419@pnu.edu.ru
YAROSLAVA ZAKHAROVA, MS-Student, SPIN: 4467-9044, yaroyurz@gmail.com
Pacific National University
Khabarovsk, Russia

Substantiation of the optimal profile of the cross-corrugated wall of metal-wood I-beam

Abstract: Combination of advantages of the materials in metal-wood beams can ensure their optimal distribution over the section, which increases the overall efficiency of structures. In this work, the authors substantiate the optimal configuration of the transverse-corrugated wall profile made of prefabricated steel profiled sheets, a metal-wood I-beam. Finite element models of the investigated structures are presented, as well as the results and analysis of numerical experiments using the LIRA-SAPR software package. For the considered models of beams, forms of buckling of corrugated walls with safety factors, deformed schemes and isofields of the distribution of normal and tangential stresses are obtained.

Keywords: corrugated wall, corrugation, metal-wood beam, finite element method

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

REFERENCES

1. Aktuganov A.N., Aktuganov A.A., Aktuganov O.A., Kotlov V.G., Kuznecov I.L. The real work of metalwood thin-walled double-T beam with orthogonal stiffening plates of various sections of the corrugation form. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2013(11–12):66–72.
2. 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(1):41–49.
3. 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(10):34–35.
4. Ivanova K.O., Grachev V.A. Comparative analysis and numerical simulation of hybrid beams with wooden belts and wavy steel wall. *Tradition and Innovation in Construction and Architecture. Construction*. 2018(1):23–29.
5. Kalinin S.V., Zhadanov V.I. Pilot studies wood and metall of beams with the wall from steel goffered of the leaf at cross-section bend. *TGASU Bulletin*. 2012(3):117–125.
6. Kalinin S.V., Zhadanov V.I., Ukrainchenko D.A., Lisov S.V. Features intense the deformed conditions woodmetall of beams with the wall from steel profilid of sheets. *Vestnik of the Orenburg State University*. 2012(9):184–190.
7. Kuznecov I.L., Aktuganov A.N., Aktuganov A.A., Kotlov V.G. Development and research of a metalwood I-beam with semi-cylindrical stiffeners, reinforced with additional fasteners. *Privolzhsky Scientific J*. 2012(4):47–54.
8. Kuznetsov I.L., Aktuganov A.A., Trofimov A.P. Designing and research of a composite steel and wood (flitched) i-beam. *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2010(1):117–121.
9. Lutov L.V. Applocation of composite combined beams in the constructions of low-rise houses. *MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture: Polish Academy of Science*. 2013;15(15):151–156.
10. Mitrofanov S.V., Mitrofanov V.A. The work of beam with corrugated web with different corrugation profiles. *Construction and Industrial Safety*. 2017(9):87–92.
11. Stepanenko A.N., Egorov P.I. Steel I-beams with a thin wavy wall. *Khabarovsk*, 2015, 155 p.
12. Stepanenko A.N., Tishkov N.L. On the work of steel two-tauri on longitudinal efforts. *ESSUTM Bulletin*. 2016(4):41–45.
13. Abbas H.H., Sauce R., Driver R.G. Simplified analysis of flange transverse bending of corrugated web I-girders under in-plane moment and shear. *Engineering Structures*. 2007;29(11):2816–2824. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2007.01.006>
14. Chan C.L., Khalid Y.A., Sahari B.B. Hamouda A.M.S. Finite element analysis of corrugated web beams under bending. *J. of Constructional Steel Webs*. 2020;58(11):1391–1406. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0143-974X\(01\)00075-X](https://doi.org/10.1016/S0143-974X(01)00075-X)
15. 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;110(1):105–115. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.11.056>