УДК 332.87:643.01

© А. Г. Черных, д-р. техн. наук, профессор

© С. Г. Головина, канд. архит., доцент

© В. И. Клеван, аспирант

(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург, Россия)

E-mail: prorector.ur@spbgasu.ru, vadimklevan@mail.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2020-17-6-83-89

© A. G. Chernykh, Dr. Sci. Tech., Professor

© S. G. Golovina, PhD in Arch., Associate Professor

© V. I. Klevan, post-graduate student

(Saint Petersburg State University
of Architecture and Civil Engineering,
St. Petersburg, Russia)

E-mail: prorector.ur@spbgasu.ru, vadimklevan@mail.ru

ПРОБЛЕМЫ ОГРАНИЧЕННОГО ПРИМЕНЕНИЯ МЕТАЛЛОДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

PROBLEMS OF RESTRICTED APPLICATION OF METAL-WOOD STRUCTURES

Оценивается перспективность и трудности применения металлодеревянных элементов на строительном рынке. Проводится обзор патентов на формы и методы изготовления металлодеревянных конструкций. Обращено внимание, что при расчете неоднородных по материалам конструкций необходимо учитывать их теплофизические характеристики, которые также влияют и на физико-механические параметры в эксплуатационный период. Особое внимание необходимо уделять податливости соединений, предусматривая повышенные меры коррозионной защиты мест контакта «металл–древесина» и внося в методику расчета соответствующие поправочные коэффициенты.

Ключевые слова: металлодеревянная конструкция, податливость соединений, коррозионная стойкость, теплофизические свойства, анизотропия древесины.

The prospects and problems associated with using metal-wood elements in the construction market are evaluated. A review of patents on forms and methods of manufacturing metal-wood structures is provided. It is emphasized that at calculating structures that are heterogeneous in regard of materials used, it is necessary to take into account their thermal and physical characteristics that affect the physical and mechanical parameters during the operational period. Special attention should be paid to the flexibility of joints, providing increased measures of corrosion protection of metal – wood contact points and making appropriate correction coefficients in the calculation method.

Keywords: metal-wood structure, flexibility of joints, corrosion resistance, thermal and physical characteristics, anisotropy of wood.

В настоящее время можно выделить два основных направления развития рынка инновационных материалов: совершенствование существующего продукта посредством оптимизации его технических характеристик с одновременным расширением области применения и разработкой системы оптимизации затрат для снижения себестоимости относительно конкурентов; создание абсолютно нового материала, реализация которого происходит за счет формирования новой ниши на рынке строительных материалов.

Ограничителями применения новых технологий (помимо общей инерционности отрасли) являются технические и организационно-управленческие барьеры [1], но такая ситуация

характерна для многих развитых стран, в которых во главу угла ставится проблема обеспечения безопасности объектов строительства и принцип предупреждения ущерба (а не его компенсации).

Очевидно, что строительная отрасль крайне консервативна, но, с другой стороны, рынок нуждается в новых строительных материалах, конструкциях, технологиях, поэтому отечественные производители их разрабатывают и совершенствуют, что обеспечивает снижение сроков и стоимости строительства, а также повышение качества, комфортности проживания и удобства эксплуатации объектов строительства.

Можно перечислить некоторые достижения последних десятилетий [2]: внедрение вентилируемых фасадов, широкое применение сэндвич-панелей, повсеместное использование современных средств малой механизации, мобильной спецтехники и инструмента, обеспечение повышенного уровня агрегатирования за счет изготовления крупных сборочных единиц вне строительной площадки, реализация концепции энергоэффективности и рационального использования невозобновляемых природных ресурсов (пример чему «умные», «пассивные» дома и «зеленое» строительство), а также повышение степени вовлеченности в строительную отрасль попутных продуктов промышленности.

В таких условиях особый интерес могут представлять инновации, предлагаемые наиболее динамично развивающемуся сектору домостроительного комплекса — малоэтажному и индивидуальному строительству (ИЖС). Входу инновационного продукта на рынок в таком случае способствует меньшее количество технических барьеров.

Известно, что поступательное совершенствование конструкций из строительных моно-материалов практически исчерпало себя. Так, изменение традиционных форм позволяет сэкономить не более 10 % материала, чего в условиях современных принципов рациональной эконо-

мии ресурсов явно недостаточно. Очевидно, что перспективным направлением будет являться разработка комбинированных конструкций, позволяющих обеспечить более высокий уровень снижения материалоемкости, затрат на изготовление, транспортировку, монтаж, эксплуатацию и утилизацию [3–5]. Одним из направлений совершенствования как материаловедческих, так и конструктивных форм является разработка технологии изготовления полиматериальных систем, в которых бы сочетался рациональный расход нескольких разнородных строительных материалов и обеспечивалась повышенная несущая способность. Рассмотрим это на примере так называемых металлодеревянных конструкций: балки, в которых пояса представляют собой элементы из клееной (в том числе и LVL-брус) или цельной древесины, в то время как стенки выполнены из тонколистовой стали [5–9]. Такие конструкции целесообразно широко использовать в каркасном строительстве.

Как показывает проведенный патентный и литературный обзор, особое внимание в исследованиях металлодеревянных конструкций уделяется способам крепления металлической стенки в деревянных поясах, обеспечивающих жесткость (шпонки, нагели, гнутые профили) и совместную работу элементов: применяются как клеевые (как правило, на основе эпоксидных

Рис. 1. Общий вид металлодеревянной балки (слева) и развертка металлической стенки с врезными элементами (справа) [10]: 1 и 2 — верхняя и нижняя полка; 3 — металлическая стенка; 4 — врезной установочный элемент; 5 — упоры; 6 — зацепы; 7 — отверстия; 8 — крепежные элементы

Рис. 2. Металлодеревянная балка в сборе [14]:
1 — металлический сердечник; 2 и 3 — деревянные обкладки; 4 — трубчатые нагели; 5 — шайбы

смола), так и врезные (например, рис. 1) зубчатые соединения [10, 11].

Обособленно можно рассматривать вариант использования в поясах из древесины дополнительных металлических пластин-накладок с зубьями [12, 13] или склеивания смежных поверхностей металлического сердечника и деревянных обкладок с дополнительной установкой трубчатых нагелей [14]. Последний (рис. 2) представляется довольно трудоемким и материалоемким.

Несмотря на наличие различных технических решений, распространение металлодеревянных балок на строительном рынке Российской Федерации в настоящее время осуществляется силами предприятия HTS RUSLAND. Данная организация входит в группу компаний MEISER GmbH и работает с 2009 года.

Конструкция металлодеревянных балок HTS RUSLAND, представляющая собой в поперечном сечении двутавр, защищена патентом [15]. Верхний и нижний пояса выполняются из цельных деревянных брусков. Стенка двутавра — гофрированный металлический лист, крепление которого к поясам осуществляется за счет зубчатых выступов, снабженных специальными стопорами, которые ограничивают глубину проникновения зубцов внутрь древесины. Зубчатые

выступы чередуются с Т-образными опорными элементами (рис. 3).

Сам гофрированный элемент может монтироваться в один или два ряда, в зависимости от требуемой несущей способности готового продукта.

Рассматриваемая металлодеревянная балка имеет ряд преимуществ: быстрая сборка конструкции, высокая несущая способность, низкий удельный вес. Однако совместная работа поясов и стальной стенки во многом зависит от качества запрессовки. Зубчатые выступы, предположительно, являются концентраторами напряжений. В случае, когда определенная доля выступов в результате технологической или иной ошибки не будет заглублена в древесину, величина концентрации напряжений может существенно увеличиться. Данное предположение требует детального анализа.

Для изучения работы металлодеревянных балок HTS произведен расчет методом конечных элементов. Конечно-элементная модель выполнена при помощи программного комплекса SAP 2000. В качестве объекта расчета выбрана балка длиной 24 м, ширина деревянных поясов — 120 мм, нагрузка, действующая на балку, — определенная, равна 12,5 кПа.

Зубчатые выступы смоделированы с применением инструмента «Жесткая вставка». В рамках расчета принято допущение, что места стыковки зубчатых выступов с деревянными поясами являются абсолютно жесткими соединениями.

Рис. 3. Конструкция соединительного гофрированного элемента балки HTS

Геометрия выступов не моделировалась с целью упрощения расчетной модели.

Общий вид расчетной модели представлен на рис. 4.

Результаты расчета частично подтверждают высказанные ранее предположения. Эквивалентные напряжения в металлической стенке (рис. 5) имеют концентраторы напряжений в зонах, близких к зубчатым выступам. Напряжения в деревянных поясах распределяются более равномерно, однако и там их величина выше в местах стыковки (рис. 6, 7).

Представленная выше расчетная модель не учитывает возможного влияния коррозии. Согласно требованиям СП 64.13330.2017, в соеди-

нениях элементов конструкций, эксплуатируемых в условиях агрессивной по отношению к стали среды, следует использовать коррозионностойкие стали, алюминиевые сплавы, стеклопластики, древесно-слоистые пластики, а также древесину твердых лиственных пород, но в указанном своде правил не рассматриваются вопросы расчета и особенности эксплуатации металлодеревянных конструкций.

В этом случае необходимо оперировать точными расчетными характеристиками древесины и стали. Особое внимание необходимо сосредоточить на колебаниях влажности, температуропроводности древесины и коэффициенте линейного термического расширения обоих материалов, который в практических расчетах древесины обычно не учитывается, но при совместной работе со стальной стенкой целесообразно вводить поправочные коэффициенты при проектировании конструкций.

В справочной литературе для древесины обычно указывается интервал коэффициента линейного расширения от $3 \cdot 10^{-6}$ до $5 \cdot 10^{-6}$ $1/^\circ\text{C}$ вдоль волокон и от $7 \cdot 10^{-6}$ до $11 \cdot 10^{-6}$ $1/^\circ\text{C}$ — поперек волокон, а у стального листа данный показатель составляет $12 \cdot 10^{-6}$ $1/^\circ\text{C}$. Однако фактически данный показатель имеет для разных пород разные значения. Так, для сосны средней плотностью около 500 кг/м^3 коэффициент линейного расширения в направлении вдоль волокон составляет $4,2 \cdot 10^{-6}$ $1/^\circ\text{C}$, средний коэффициент линейного расширения в радиальном направлении равен $15 \cdot 10^{-6}$ $1/^\circ\text{C}$, а наибольший коэффициент линейного расширения в тангенциальном направлении — $29 \cdot 10^{-6}$ $1/^\circ\text{C}$. Также требуется вводить в расчеты дополнительный поправочный коэффициент на температуропроводность древесины (которая характеризуется скоростью изменения ее температуры при нестационарном теплообмене), принимаемый равным $(1,11...1,38) \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$.

Очевидно, что в силу большого различия значений теплофизических характеристик стали и древесины при изменении (колебаниях) температуры окружающей среды скорость выравнивания температуры стальных элементов выше по сравнению со стабилизацией температурного поля в деревянных элементах, которые характеризуются большей тепловой инерцией процес-

Рис. 4. Общий вид расчетной модели металлодеревянной балки

Рис. 5. Эквивалентные напряжения в стенке

Рис. 6. Нормальные напряжения в деревянных поясах

Рис. 7. Касательные напряжения в деревянных поясах

сов тепло- и массопереноса [16]. Таким образом, в металлодеревянных конструкциях до момента их термостатирования возникает градиент температуры: в силу анизотропности строения происходит запоздание нагрева (охлаждения) слоев древесины по сравнению с интенсивностью процесса повышения (понижения) температуры

стали. В этой связи при определенных условиях в зонах сопряжения «металл–древесина» будет достигнута температура точки росы, и пары влаги будут осаждаться на поверхности металла в виде жидкости. Это процесс будет протекать циклично (по времени суток и по сезонам), поэтому с течением времени будет происходить накопление влаги в зонах сопряжения металлических элементов в древесине, последняя, в свою очередь, будет склонна к развитию гниения, что приведет к росту податливости соединения [17].

Таким образом за довольно непродолжительный период эксплуатации конструкция увеличивает свой прогиб (по оценочным расчетам, при повышении влажности с 12 до 20 % прогиб металлодеревянных балок пролетом до 12 м увеличивается на 8–12 %, одновременно с этим уменьшается модуль упругости древесины и происходит перераспределение напряжений) и достигнет своего второго предельного состояния, поэтому дальнейшая эксплуатация становится небезопасной [18].

Очевидно, что в настоящее время требуется проведение дополнительных исследований совместной работы двух материалов при воздействии различных эксплуатационных сред для дальнейшего совершенствования методик расчетов.

Проведенный анализ влияния различных факторов на надежность соединения «металл–древесина» показал, что в настоящее время нет общепринятого решения по обеспечению совместной работы материалов в конструкции, что приводит к отсутствию достоверной расчетной базы и, соответственно, ограничению области применения металлодеревянных конструкций.

Недостаток сведений в данной предметной области побуждает к тому, чтобы более детально и комплексно провести исследования поведения металлодеревянных конструкций при различных тепло-влажностных режимах и в сочетании с агрессивными средами для выявления деструктивных факторов, особенно развивающихся на границе раздела «металл–древесина».

Библиографический список

1. Курцева К. Ю. Влияние экономической системы на инновационную деятельность строительной от-

расли в условиях рынка // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Инновации в строительстве. 2014. № 1. С. 52–57.

2. Дербасов Е. М. Основные барьеры и перспективы применения инновационных технологий и строительных материалов (на примере бетона) при возведении жилья // Перспективы развития строительного комплекса. 2012. № 1. С. 211–215.

3. Васылев В. Н., Каширина Н. В., Тарасенко А. И., Мошак К. Е. Металлодеревянные фермы построечного изготовления из традиционных профилей // Металлические конструкции. 2017. Т. 23. № 1. С. 39–46.

4. Кузнецов И. Л., Актуганов А. А., Трофимов А. П. Разработка и исследование металлодеревянной двутавровой балки // Известия КазГАСУ. 2010. № 1 (13). С. 117–121.

5. Лисов С. В., Дмитриев П. П., Калинин С. В. Анализ способов соединения стального профилированного листа с деревянным каркасом // Вестник Оренбургского государственного университета. 2013. № 5 (154). С. 188–193.

6. Пат. 2382855 РФ, МПК E04C 3/29. Металлодеревянная двутавровая балка / И. Л. Кузнецов, А. А. Актуганов, А. П. Трофимов; Казанский государственный архитектурно-строительный университет. № 2008149200/03; заявл. 12.12.2008, опубл. 27.02.2010.

7. Пат. 2441120 РФ, МПК E04C 3/292. Металлодеревянная двутавровая балка / И. Л. Кузнецов, А. Н. Актуганов, А. А. Актуганов, А. П. Трофимов; Казанский государственный архитектурно-строительный университет. № 2010121189/03; заявл. 25.05.2010, опубл. 27.01.2012.

8. Пат. 188912 РФ, МПК E04B 1/18, E04C 3/18, E04C 3/292. Металлодеревянная балка с гофрированной стенкой / В. А. Грачев, К. О. Иванова; Самарский государственный технический университет. № 2019100943; заявл. 10.01.2019, опубл. 29.04.2019.

9. Клеван В. И., Харламова А. С., Гриднев Н. Н. Изгибная жесткость металлодеревянных балок // Молодой ученый. 2020. № 25 (315). С. 29–34.

10. Пат. 2429330 РФ, МПК E04C 3/292. Металлодеревянная балка двутаврового сечения / С. М. Анпилов, М. С. Анпилов, А. С. Рыжков, Г. В. Мурашкин. № 2009134911/03; заявл. 17.09.2009, опубл. 20.09.2011.

11. А. с. СССР 1795037, МПК E04C 3/18. Металлодеревянная балка / А. М. Чистяков, И. В. Порядин, В. И. Сердюков, В. С. Людаев, О. Н. Дмитриев; ЦНИПИКТИ легких металлических конструкций. № 4935140; заявл. 12.05.1991, опубл. 15.02.1993.

12. Пат. 157379 РФ, МПК E04C 3/292. Металлодеревянная двутавровая балка / Ф. С. Замалиев, В. В. Филиппов, Э. Ф. Замалиев; Казанский государ-

ственный архитектурно-строительный университет. № 2015113105/03; заявл. 09.04.2015, опубл. 27.11.2015.

13. Пат. 129960 РФ, МПК E04C 3/292. Металлодеревянная двутавровая балка / Р. И. Хисамов, А. Н. Махиянов; Казанский государственный архитектурно-строительный университет. № 2013100793/03; заявл. 09.01.2013, опубл. 10.07.2013.

14. Пат. 2354790 РФ, МПК E04C 3/12, B27C 3/04. Способ изготовления металлодеревянных балок из металлического сердечника и двух деревянных обкладок и производственный модуль для его осуществления / В. М. Соболев, А. И. Головченко, Е. М. Лунин. № 2006132309/03; заявл. 11.09.2006, опубл. 10.05.2009.

15. Пат. 105327 РФ, МПК E04C 3/00. Строительная несущая балка двутаврового сечения / Г. В. Папаюанну. № 2011104573/03; заявл. 09.02.2011, опубл. 10.06.2011.

16. Федосов С. В., Котлов В. Г., Алоян Р. М., Ясинский Ф. Н., Бочков М. В. Моделирование тепломассопереноса в системе газ – твердое при нагельном соединении элементов деревянных конструкций. Ч. 2. Динамика полей температуры при произвольном законе изменения температуры воздушной среды // Строительные материалы. 2014. № 8. С. 73–79.

17. Черных А. Г., Нижегородцев Д. В., Корольков Д., Казакевич Т. Н., Мамедов Ш. М. Estimating the residual operating life of wooden structures in high humidity conditions // Architecture and engineering. 2020. Т. 5. № 1. С. 10–19.

18. Бочков В. В. Процессы тепломассопереноса в нагельных соединениях элементов деревянных стропильных конструкций при циклических режимах эксплуатации: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Иваново, 2017. 18 с.

References

1. Kurtseva K. Yu. *Vliyanie ekonomicheskoy sistemy na innovatsionnyuyu deyatel'nost' stroitel'noy otrasli v usloviyakh rynka* [The influence of the economic system on the innovative activity of construction industry in market conditions]. *Nauchniy vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Innovatsii v stroitel'stve – Scientific Bulletin of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Innovations in construction*, 2014, no. 1, pp. 52–57.

2. Dербасов Е. М. *Osnovnye bar'ery i perspektivy primeneniya innovatsionnykh tekhnologiy i stroitel'nykh materialov (na primere betona) pri vozvedenii zhil'ya* [The main problems and prospects for using of innovative technologies and building materials (on the example of concrete) in the housing construction]. *Perspektivy razvitiya stroitel'nogo kompleksa – Prospects for the*

development of the construction complex, 2012, no. 1, pp. 211–215.

3. Vasylyev V. N., Kasharina N. V., Tarasenko A. I., Moshak K. E. *Metalloderevyannye fermy postrochnogo izgotovleniya iz traditsionnykh profiley* [Metal-wood trusses of construction production from traditional profiles]. *Metallicheskie konstruksii – Metal structures*, 2017, vol. 23, no. 1, pp. 39–46.

4. Kuznetsov I. L., Aktuganov A. A., Trofimov A. P. *Razrabotka i issledovanie metalloderevyannoy dvutavrovoy balki* [Development and research of the metal-wood I-beam]. *Izvestiya KazGASU – Bulletin of the KazGASU*, 2010, no. 1 (13), pp. 117–121.

5. Lisov S. V., Dmitriev P. P., Kalinin S. V. *Analiz sposobov soedineniya stal'nogo profilirovannogo lista s derevyannym karkasom* [Analysis of ways of connecting a steel profiled plate with a wooden frame]. *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta – Bulletin of Orenburg State University*, 2013, no. 5 (154), pp. 188–193.

6. Kuznetsov I. L., Aktuganov A. A., Trofimov A. P. *Metalloderevyannaya dvutavrovaya balka* [Metal-wood I-beams]. Patent RF, no. 2382855, 2010.

7. Kuznetsov I. L., Aktuganov A. N., Aktuganov A. A., Trofimov A. P. *Metalloderevyannaya dvutavrovaya balka* [Metal-wood I-beams]. Patent RF, no. 2441120, 2012.

8. Grachev V. A., Ivanova K. O. *Metalloderevyannaya balka s gofirovannoy stenкой* [Metal-wood beam with a corrugated wall]. Patent RF, no. 188912, 2019.

9. Klevan V. I., Kharlamova A. S., Gridnev N. N. *Izgibnaya zhestkost' metalloderevyannykh balok* [Bending stiffness of metal-wood beams]. *Molodoy ucheniy – Young scientist*, 2020, no. 25 (315), pp. 29–34.

10. Anpilov S. M., Anpilov M. S., Ryzhkov A. S., Murashkin G. V. *Metalloderevyannaya balka dvutavrovogo secheniya* [Metal-wood I-shaped cross-section beam]. Patent RF, no. 2429330, 2011.

11. Chistyakov A. M., et al. *Metalloderevyannaya balka* [Metal-wood beam]. Patent USSR, no. 1795037, 1991.

12. Zamaliev F. S., Filippov V. V., Zamaliev E. F. *Metalloderevyannaya dvutavrovaya balka* [Metal-wood I-beam]. Patent RF, no. 157379, 2015.

13. Khisamov R. I., Mahiyonov A. N. *Metalloderevyannaya dvutavrovaya balka* [Metal-wood I-beam]. Patent RF, no. 129960, 2013.

14. Sobolev V. M., Golovchenko A. I., Lunin E. M. *Sposob izgotovleniya metalloderevyannykh balok iz metallichesкого serdechnika i dvukh derevyannykh obkladok i proizvodstvenniy modul' dlya ego osushchestvleniya* [Method of producing metal-wood beams with a metal core and two wooden plates and a production module for its implementation]. Patent RF, no. 2354790, 2009.

15. Papaioannu G. V. *Stroitel'naya nesushchaya balka dvutavrovogo secheniya* [Construction load-bearing beam of I-beam section]. Patent RF, no. 105327, 2011.

16. Fedosov S. V., et al. *Modelirovanie teplomassoperenosa v sisteme gaz – tverdoe pri nagel'nom soedinenii elementov derevyannykh konstruksiy. Ch. 2. Dinamika poley temperatury pri proizvol'nom zakone izmeneniya temperatury vozduшной sredy* [Modeling of heat and mass transfer in the gas – solid system when elements of wooden structures are connected separately. Part 2. Dynamics of temperature fields under the arbitrary law of air temperature media change]. *Stroitel'nye materialy – Building materials*, 2014, no. 8, pp. 73–79.

17. Chernykh A. G., et al. Estimation of the residual operating life of wooden structures in high humidity conditions. *Architecture and engineering*, 2020, vol. 5, no. 1, pp. 10–19.

18. Bochkov V. V. *Protsessy teplomassoperenosa v nagel'nykh soedineniyakh elementov derevyannykh stropil'nykh konstruksiy pri tsiklicheskich rezhimakh ekspluatatsii. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk* [Processes of heat and mass transfer in the dowel connections of elements of wooden truss structures under cyclic operating modes. Author's thesis of PhD in Sci. Tech. diss.]. Ivanovo, 2017, 18 p.