УДК 624.042.62

DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-3-118-128

*С.В. ДЕОРДИЕВ, М.Ю. БЕЛИЧЕНКО, М.А. КРАСИЕВ, М.В. БУТЕНКО,
Сибирский федеральный университет*

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ДЕРЕВОМЕТАЛЛИЧЕСКОГО СТРУКТУРНОГО ПОКРЫТИЯ И ЕГО УЗЛОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ ДЕЙСТВИИ СТАТИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ

В настоящие дни интерес к конструкциям и сооружениям из древесины начинает возрастать, главным образом потому, что древесина – экологически чистый материал. В конце XX и начале XXI в. разработано достаточно новых конструктивных решений и материалов на основе древесины. Вместе с этим совершенствовались способы соединения деревянных элементов и стыки узлов конструкций.

В статье приведены результаты экспериментальных исследований структурного покрытия, состоящего из двух блок-ферм и его узловых соединений при действии статической нагрузки, соответствующей максимальной расчетной нагрузке. По результатам испытаний выявлен характер распределения напряжений в структурном покрытии, а также на поверхности узловых соединений. Были определены прочностные и деформационные характеристики узловых соединений и элементов структурного покрытия.

Ключевые слова: блок-ферма; структурное покрытие; узловое соединение; статическая нагрузка; податливость; метод корреляции цифровых изображений; относительные деформации; напряжения; модуль упругости; экспериментальные исследования.

Для цитирования: Деордиев С.В., Беличенко М.Ю., Красиев М.А., Бутенко М.В. Экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния деревометаллического структурного покрытия и его узловых соединений при действии статической нагрузки // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2021. Т. 23. № 3. С. 118–128.
DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-3-118-128

*S.V. DEORDIEV, M.Y. BELICHENKO, M.A. KRASIEV, M.V. BUTENKO,
Siberian Federal University*

STRESS-STRAIN STATE OF SANDWICHED COATING AND ITS NODE CONNECTIONS UNDER STATIC LOAD

Today, the interest in wooden structures is being increased mainly because wood is an environmentally friendly material. In this regard, quite new wooden materials are developed between the 20th and 21st centuries. Improved are the methods for joining wooden elements and joints of structures. The paper presents the experimental studies of the sandwiched coating consisting of two frame work blocks, and nodal connections under the static load. It is shown that the stress distributes in the coating and on the surface of the nodal connections. The stress-strain curves are suggested for the nodal connections and structural elements of the coating.

Keywords: frame work blocks; sandwiched coating; nodal connection; static load; deformation capacity; digital image correlation; strain; stress; elastic modulus; experimental studies.

For citation: Deordiev S.V., Belichenko M.Y., Krasiev M.A., Butenko M.V. Eksperimental'noe issledovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya derevometallichesкого структурного покрытия i ego uzlovykh soedinenii pri deistvii staticheskoi nagruzki [Stress-strain state of sandwiched coating and its node connections under static load]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2021. V. 23. No. 3. Pp. 118–128.
DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-3-118-128

Введение

Как известно, при расчетах конструкций оперируют идеализированными расчетными схемами, которые часто не отражают действительных условий опирания, соединения узлов и схемы приложения нагрузок.

Соединения конструкций элементов принимаются либо абсолютно жесткими, либо шарнирными, что в действительности не совсем верно, т. к. соединения в конструкциях из дерева (кроме клеевых) являются податливыми и не всегда могут быть аппроксимированы идеальными. Для древесины, обладающей пониженным сопротивлением смятию и относительно низким модулем упругости, деформативностью, т. е. податливостью узлов, пренебрегать нельзя [1–7, 9].

Изучение поведения конструкций из древесины и их узловых соединений при действии нагрузки позволит оценить их работу и спрогнозировать поведение элементов конструкции при последующих нагружениях [10]. В настоящей статье приводятся результаты экспериментального исследования натурного образца деревометаллического структурного покрытия и его узловых соединений при действии расчетной нагрузки.

Методы

Структура состоит из двух деревометаллических блок-ферм и характеризуется следующими показателями: пролет составляет 18 м, ширина – 6 м, строительная высота в середине пролета – 2,293 м, перекрываемая за один подъем площадь – 108 м². Исследуемые узлы находятся в коньке и четверти пролета верхнего пояса структурного покрытия, выполненного из клееных сосновых балок с поперечным сечением 250×140 мм [8, 11]. Влажность древесины (сосна первого сорта) на момент испытания составляла 12 %, испытания проходили в нормальных условиях. Общий вид структурного покрытия представлен на рис. 1.

Целью проведения испытаний было выявление несущей способности и особенностей напряженно-деформированного состояния структурного покрытия марки ТБФД-18.6 при действии статической нагрузки. Также целью исследования является экспериментальное определение прочностных и деформационных характеристик узловых соединений [12].

Испытания деревометаллического структурного покрытия на действие статической нагрузки проводились в лаборатории испытания строительных материалов и конструкций кафедры «Строительные конструкции и управляемые системы» Инженерно-строительного института Сибирского федерального университета.

Рис. 1. Общий вид исследуемого структурного покрытия

Перед испытаниями конструкции были проведены визуальные и инструментальные обследования испытуемого образца. Фактические пороки древесины в элементах были сопоставлены с допустимыми. Кроме этого, проверяли качество исполнения конструкций (точность приторцовки, качество сварки стальных деталей и т. п.).

Конструкция подвергалась испытаниям статической кратковременной равномерно распределенной нагрузкой интенсивностью $q = 2,44 \text{ кН/м}^2$, которая равна расчетной и включает в себя сумму нагрузок от покрытия и снеговой нагрузки в г. Красноярске. Структурный блок покрытия нагружали в 4 этапа с помощью бетонных блоков весом 0,60 кН и балок со средним весом 0,54 кН. Для распределения давления грузов равномерно по длине поперечных ребер верхнего пояса использовали прокладки из досок (рис. 2).

Рис. 2. Структурное покрытие под действием статической нагрузки

Измерения напряжений в элементах структурного покрытия регистрировали на каждом этапе нагружения тензорезисторами с базой 50 мм при помощи тензометрической системы ММТС-64.01. Для регистрации перемеще-

ний характерных точек покрытия использовались прогибомеры Аистова с целой деления 0,01 мм.

Параллельно определению напряженно-деформированного состояния и прогибов элементов структурного покрытия проводилось определение абсолютных и относительных деформаций, возникающих в элементах узловых соединений при действии статической нагрузки. Общий вид узловых соединений представлен на рис. 3.

Рис. 3. Общий вид узлов в коньке (а) и в четверти пролета (б)

Узлы стыка балок в коньке и четверти пролета представляют собой лобовые упоры. Для предотвращения выхода из плоскости балок верхнего пояса предусматривается устройство металлических накладок из стали. Для проведения эксперимента и возможности отслеживания деформаций в зоне контакта балок (лобового упора) наружные металлические накладки были демонтированы.

В процессе эксперимента проводилась фиксация поверхностных перемещений (податливость) и относительных деформаций на каждом этапе нагружения при помощи цифровой оптической системы Vic-3D, в которой реализован метод корреляции цифровых изображений. Для проведения эксперимента поверхности узловых соединений были подготовлены следующим образом: на поверхности узлов наносилась контрастная мелкодисперсная окраска с помощью белой и черной матовой аэрозольной краски. Для этого на поверхность узлов сначала наносится белая матовая основа, затем – совокупность черных точек.

Кроме того, были установлены два комплекта цифровых черно-белых камер на жесткую раму так, чтобы исключить движения одной камеры отно-

сительно другой. В качестве источника освещения использовались лампы дневного света, производилась настройка резкости камер. Схема проведения испытания представлена на рис. 4.

Рис. 4. Схема регистрации изображений исследуемых областей поверхности узлов:
1 – исследуемый узел; 2 – цифровые камеры К1 и К2; 3 – ПК, с которого производится управление видеосистемой; 4 – система освещения

Результаты

При испытании структурного покрытия при статическом нагружении, соответствующем максимальной расчетной нагрузке, определены:

– максимальное напряжение в сжатой зоне верхнего пояса структуры, которое составило 3,328 МПа, в растянутой зоне верхнего пояса – соответственно 2,06 МПа. Максимальное напряжение в деревянных раскосах – 0,48 МПа. Максимальное напряжение в нижнем поясе – 157,49 МПа. Максимальное напряжение в диафрагмах жесткости – 6,57 МПа;

– максимальные прогибы структурного блока, которые составили: в крайнем поясе в $\frac{1}{4}$ пролета – 43,1 мм; в среднем сдвоенном поясе в $\frac{1}{4}$ пролета – 41,88 мм; в коньке крайнего пояса – 36,17 мм; в коньке среднего сдвоенного пояса – 34,76 мм;

– с помощью оптического комплекса Vic-3D были получены значения абсолютных деформаций (табл. 1) и значения относительных деформаций по оси X (ε_x) (вдоль волокон) на торцах в коньковом узле и в узле в четверти пролета (рис. 5–7, табл. 2 и 3).

Согласно ГОСТ 16483.24–73 было проведено испытание по определению модуля упругости древесины, из которой собрано структурное покрытие. Модуль упругости $E = 15820$ МПа, далее определялись напряжения, которые возникали на торцах узловых соединений в коньке и четверти пролета по формуле

$$\sigma = E \cdot \varepsilon, \quad (1)$$

где E – модуль упругости; ε – относительные деформации.

Таблица 1

**Абсолютная деформация древесины (величина податливости)
в торцах конькового узла и узла в четверти пролета
при максимальной расчетной нагрузке**

№ экстензометра	Деформации (величина податливости) вдоль оси X, мм
Коньковый узел	
T1	0,08744
T2	0,09794
T3	0,1107
T4	0,12023
T5	0,13965
¼ пролета	
T6	0,0514
T7	0,04463
T8	0,04178
T9	0
T10	0

Рис. 5. Поля относительных деформаций в коньковом узле и в узле в четверти пролета вдоль оси X (ϵ_x)

Таблица 2

**Этапы нагружения и относительные деформации в коньковом узле
по оси X**

№ ступени	Нагрузка N, Па	Относительные деформации $\epsilon_x \cdot 10^{-3}$				
		T1	T2	T3	T4	T5
1	1000	-0,801	-0,824	-0,94	-1,07	-1,63
2	1500	-0,827	-1,07	-1,36	-1,63	-1,81
3	2000	-1,06	-1,59	-1,79	-2,03	-2,13
4	2440	-1,68	-1,88	-2,13	-2,31	-2,68

Рис. 6. Относительные деформации в коньковом узле по оси X $\varepsilon_x \cdot 10^{-3}$ при изменении N от 1000 до 2440 Па

Таблица 3

**Этапы загрузки и относительные деформации в узле
в четверти пролета по оси X**

№ ступени	Нагрузка N , Па	Относительные деформации $\varepsilon_x \cdot 10^{-3}$				
		T6	T7	T8	T9	T10
1	1000	-0,532	-0,30	0,116	0,116	0,874
2	1500	-0,877	-0,699	-0,376	0,15	0,854
3	2000	-0,965	-0,765	-0,715	0,179	0,947
4	2440	-0,988	-0,858	-0,804	0,225	0,952

Рис. 7. Относительные деформации в узле в четверти пролета по оси X $\varepsilon_x \cdot 10^{-3}$ при изменении N от 1000 до 2440 Па

Полученное максимальное экспериментальное среднее напряжение вдоль волокон (по оси X) в коньковом узле составляет 33,78 МПа, а в узле в четверти пролета – 8,38 МПа.

Дополнительно был произведен расчёт с помощью аналитического расчётного комплекса ANSYS (рис. 8). При этом геометрические и физические характеристики принимались следующими:

$$E_0 = 15\,820 \text{ МПа}, \quad E_{90} = 400 \text{ МПа}, \quad G = 500 \text{ МПа}, \quad \mu_{xy} = 0,45, \quad \mu_{yx} = 0,018.$$

Рис. 8. Поля напряжений структурного покрытия (а), конькового узла (б) и узла в четверти пролета (в) при расчетной нагрузке в ПК ANSYS

По результатам исследований было проведено сравнение численных и экспериментальных исследований (табл. 4).

Таблица 4

Сравнение численных и экспериментальных исследований

Вид исследования	тах прогиб конструкции, мм	тах напряжение в конструкции, МПа	Напряжения и деформации при действии расчетной нагрузки			
			Коньковый узел		Узел в четверти пролета	
			$\sigma_{\text{ср}}$, МПа	f , мм	$\sigma_{\text{ср}}$, МПа	f , мм
Экспериментальное	43,1	157,49	33,78	0,139	8,38	0,052
Численное	45,81	161,79	32,77	0,1354	8,93	0,055

Данные расчета, проведенные в расчетном комплексе ANSYS, имеют хорошую сходимость с результатами экспериментального исследования (разница находится в диапазоне 2,73–6,54 %).

Заключение

По итогам проведения экспериментального исследования можно сделать следующие выводы:

1. При проведении испытаний натурного образца структурного покрытия при загрузке статической нагрузкой, соответствующей максимальной расчетной нагрузке, были обнаружены следующие изменения: максимальные напряжения появляются в нижнем металлическом поясе и составляют 157,49 МПа. Максимальный прогиб в элементах структурного покрытия составляет 43,1 мм. По результатам испытаний был сделан вывод о достаточной несущей способности при восприятии максимальной расчетной нагрузки.

2. Экспериментально подтверждено, что деформации в древесине лобовых упоров элементов верхних поясов распределяются неравномерно. Напряжения в нижней части сечений балок лобового упора в коньке значительно выше, чем в верхней части, и составляют 42,39 МПа. Напряжения лобового упора узла в четверти пролета возникают в верхней части сечения и составляют 15,62 МПа, в то время как в нижней части они малы. Все это характеризует правильную работу узловых сопряжений конструкции, кроме того, стоит отметить соответствие и высокую сходимость результатов расчетов, полученных в расчетном комплексе ANSYS.

3. При предельной нагрузке в 2,44 кПа:

– согласно ГОСТ 16483.24–73 максимальное среднее напряжение вдоль волокон возникло в коньковом узле и составляет 33,78 МПа;

– максимальная величина податливости в коньковом узле составила 0,139 мм. Это свидетельствует о том, что в узловых соединениях произошел процесс «обмятия» древесины, т. е. сечение элементов конструкции узла деформировалось, и при следующих этапах разгрузки-загрузки (например, таяние-выпадение снега) конструкции её напряженно-деформированное состояние будет изменяться. Данный факт приводит к обязательному учету податливости узловых соединений при проектировании деревянных конструкций.

В результате проведения статических испытаний можно сделать вывод, что структурное покрытие марки ТБФД-18.6 характеризуется малой деформативностью. В дальнейших исследованиях покрытия планируется установление влияния деформации и податливости в узловых соединениях на перераспределение усилий между элементами конструкции.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Турков А.В. Взаимосвязь задач динамики и статики сплошных и составных деревянных конструкций : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Орел, 2008. 382 с.
2. Коробко В.И., Турков А.В. Динамические и статические исследования двухпролетных балок с упругоподатливым укрупнительным стыком над средней опорой // Строительная механика и расчет сооружений. 2007. № 4. С. 47–48.

3. Лоскутова Д.В. Частотно-временной анализ деревянной фермы с соединениями на МЗП // Актуальные проблемы современного строительства : сб. материалов 60-й Международной научно-технической конференции. Санкт-Петербург : СПбГАСУ, 2007. С. 114–118.
4. Вареник К.А. Расчет центрально-сжатых деревянных элементов с учетом ползучести : автореферат на соискание ученой степени кандидата технических наук. Великий Новгород, 2015. 20 с.
5. Пятикрестовский К.П. К вопросу о выборе модулей упругости при расчете деревянных конструкций на прочность, устойчивость и по деформациям // Строительная механика и расчет сооружений. 2002. № 6. С. 73–79.
6. Жаданов В.И. Экспериментально-теоретические исследования напряженно-деформированного состояния крупноразмерных клефанерных плит при поперечном изгибе // Известия вузов. Строительство. 2003. № 4. С. 108–112.
7. Турков А.В., Зульфикарова Т.В. Учет податливости соединений при расчете ребристо-кольцевого купола из древесины // Сборник научных трудов Таджикского ПИ. Душанбе : Ирфон, 1991. С. 35–37.
8. Deordiev S., Frolovskaia A., Krasiev M. Development and static testing of the 18x6 m SSU-TTMBF spatial structural unit // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 2018. С. 012018.
9. Деордиев С.В., Копаница Д.Г., Тутатчиков Р.С., Красиев М.А. Влияние скорости одноосного сжатия на сопротивление «чистых» образцов древесины сосны // Строительство и реконструкция. 2017. № 1 (69). С. 11–18.
10. Деордиев С.В., Копаница Д.Г., Копаница Г.Д., Тутатчиков Р.С. Экспериментальные исследования клеодошчатых балок на поперечный изгиб при действии статической и кратковременной динамической нагрузки // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2014. № 3 (44). С. 96–111.
11. Инжутов И.С., Дмитриев П.А., Деордиев С.В., Захарюта В.В. Анализ существующих узлов сопряжения пространственных конструкций и разработка сборно-разборного узлового элемента // Вестник МГСУ. 2013. № 3. С. 61–71.
12. Инжутов И.С., Жаданов В.И., Никитин В.М. Исследование напряженно-деформированного состояния крупноразмерной ребристой плиты с обшивкой, приклеенной на части длины конструкции // Известия вузов. Строительство. 2008. № 7. С. 4–10.

REFERENCES

1. Turkov A.V. Vzaimosvyaz' zadach dinamiki i statiki sploshnykh i sostavnykh derevyannykh konstruktсий [Correlation between dynamic and static problems for solid-web and composite wood structures. PhD Thesis]. Orel, 2008. 43 p. (rus)
2. Korobko V.I., Turkov A.V. Dinamicheskie i staticheskie issledovaniya dvukhproletnykh balok s uprugopodatlivym ukрупnitel'ny'm stykom nad srednei oporoi [Dynamic and static analysis of double-span beams with joint on site over centre support]. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenii*. 2007. No 4. Pp. 47–48. (rus)
3. Loskutova D.V. Chastotno-vremennoi analiz derevyannoi fermy s soedineniyami na MZP [Time-frequency analysis analysis of wooden girder]. In: Aktual'nye problemy sovremenogo stroitel'stva: sb. materialov 60-i Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnikeskoi konferentsii (*Proc. 60th Int. Sci. Conf. 'Relevant Problems of Modern Construction*). Saint-Petersburg, 2007. Pp. 114–118. (rus)
4. Varenik A.S. Ustoychivost' szhatykh elementov derevyannykh konstruktсий. Avtoreferat [Stability of compressed elements of timber structures. PhD Abstract]. Saint-Petersburg, 1994. 22 p. (rus)
5. Pyatikrestovskii K.P. K voprosu o vybore modulei uprugosti pri raschete derevyannykh konstruktсий na prochnost', ustoychivost' i po deformatsiyam [Selection of Young modulus in strength, stability and deformation analysis of wood structures]. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenii*. 2002. No. 6. Pp. 73–79. (rus)
6. Zhadanov V.I. Eksperimentalno-teoreticheskie issledovaniya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya крупnorazmernykh kleefanernykh плит pri poperechnom izgibe [Stress-strain state of

- large laminated panel under transverse bending]. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo*. 2003. No. 4. Pp. 108–112. (rus)
7. *Turkov A.V., Zulfikarova T.V.* Uchet podatlivosti soyedineniy pri raschete rebristo-kol'tseвого kupola iz drevesiny [Deformation capacity of joints in calculating wooden ribbed-circular dome]. In: *Sbornik nauchnykh trudov Tadjikskogo PI.* (Coll. Papers). Dushanbe, Irfon 1991. Pp. 35–37. (rus)
 8. *Deordiev S., Frolovskaya A., Krasiev M.* Development and static testing of the 18x6 m SSU-TTMBF spatial structural unit. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2018. 012018.
 9. *Deordiev S.V., Kopanitsa D.G., Tutachikov R.S., Krasiev M.A.* Vliyaniye skorosti odnoosnogo szhatiya na soprotivleniye "chistykh" obraztsov drevesiny sosny [Uniaxial compression effect on of "pure" pine wood resistance]. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2017. No. 1 (69). Pp. 11–18. (rus)
 10. *Deordiev S.V., Kopanitsa D.G., Kopanitsa G.D., Tutachikov R.S.* Eksperimental'nyye issledovaniya kleyedoshchatykh balok na poperechnyy izgib pri deystvii staticheskoy i kratkovremennoy dinamicheskoy nagruzki [Transverse bending tests of laminated beams under static and dynamic loads]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2014. V. 44. No. 3. Pp. 96–111. (rus)
 11. *Inzhutov I.S., Dmitriev P.A., Deordiev S.V., Zakharyuta V.V.* Analiz su-shchestvuyushchikh uzlov sopryazheniya prostranstvennykh konstruktsey i razrabotka sborno-razbornogo uzlovogo elementa [Analysis of existing interfacing nodes of spatial structures and development of dismountable nodal element]. *Vestnik MGSU*. 2013. No. 3. Pp. 61–71. (rus)
 12. *Inzhutov I.S., Zhadanov V.I., Nikitin V.M.* Issledovaniye napryazhenodeformirovannogo sostoyaniya krupnorazmernoy rebristoy plity s obshivkoy, prikleyennoy na chasti dliny konstruktsey [Stress-strain state of large dimensioned ribbed plate with sheathing glued on structure surface]. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo*. 2008. No. 7. Pp. 4–10 (rus)

Сведения об авторах

Деордиев Сергей Владимирович, канд. техн. наук, доцент, Сибирский федеральный университет, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79, deordievsv@yandex.ru

Беличенко Максим Юрьевич, аспирант, Сибирский федеральный университет, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79, maksbelichenko@mail.ru

Красиев Михаил Александрович, ассистент, Сибирский федеральный университет, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79, krasievma@gmail.com

Бутенко Максим Викторович, магистрант, Сибирский федеральный университет, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79, maksimbutenko@mail.ru

Authors Details

Sergey V. Deordiev, PhD, A/Professor, Siberian Federal University, 79, Svobodnyi Ave., 660041, Krasnoyarsk, Russia, deordievsv@yandex.ru

Maxim Y. Belichenko, Research Assistant, Siberian Federal University, 79, Svobodnyi Ave., 660041, Krasnoyarsk, Russia, maksbelichenko@mail.ru

Mikhail A. Krasiev, Assistant, Siberian Federal University, 79, Svobodnyi Ave., 660041, Krasnoyarsk, Russia, krasievma@gmail.com

Maksim V. Butenko, Graduate Student, Siberian Federal University, 79, Svobodnyi Ave., 660041, Krasnoyarsk, Russia, maksimbutenko@mail.ru