

РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ
ANALYSIS AND DESIGN OF BUILDING STRUCTURESDOI 10.22363/1815-5235-2020-16-6-439-451
УДК 624.011.1

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH ARTICLE

Публикуется в порядке обсуждения / Published in order of discussion

Влияние разрывов (стыков) в обшивке на напряженно-деформированное состояние плитно-ребристых деревокомпозитных панелей

Б.В. Лабудин¹, Е.В. Попов^{1*}, Е.С. Ощепкова¹, В.В. Сопилов¹, А.В. Русланова¹, А.А. Фукалов²¹Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, Российская Федерация, 163002, Архангельск, наб. Северной Двины, д. 17²Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Российская Федерация, 190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4

*egpv1989@mail.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 3 сентября 2020 г.

Доработана: 13 ноября 2020 г.

Принята к публикации: 20 ноября 2020 г.

Аннотация

Исследованы численно-аналитически деревокомпозитные плитно-ребристые изгибаемые панели с обшивками из фанеры и ориентированно-стружечных плит, укладываемых со стыками (разрывами) в обшивке, соединенной с ребрами посредством механических связей. Представлен обзор исследований, посвященных изучению и повышению эффективности таких панелей. На основе теории расчета составных стержней А.Р. Ржаницына составлена математическая модель, позволяющая выполнить расчет напряженно-деформированного состояния этих конструкций, учитывающая наличие разрывов в обшивке и податливость механических соединений обшивки и ребра. Получено уравнение для определения координаты наиболее опасного сечения в деревянных ребрах при наличии разрывов в обшивке, которые могут не совпадать с серединой пролета. Рассмотрены панели с обшивкой в сжатой зоне с различным расположением стыков, в том числе симметрично относительно середины пролета панели. Для сопоставления результатов напряженно-деформированного состояния рассмотрены панели без стыков в обшивке. Построены графики зависимости максимальных растягивающих напряжений в ребрах в наиболее опасном сечении и максимальных вертикальных перемещений от коэффициента жесткости связей сдвига и расположения стыков в обшивке. Получены значения коэффициентов для инженерного расчета панелей, учитывающих снижение прочностных и деформационных характеристик композитного сечения панелей с разрывами в обшивке по сравнению с панелями без стыков. Сформулированы выводы и рекомендации по результатам проведенных численных исследований, которые могут быть использованы при проектировании деревокомпозитных плитно-ребристых конструкций, а также при подготовке нормативных документов.

Ключевые слова: деревокомпозитные ребристые панели, разрывы и стыки в обшивке, механические соединения, жесткость, податливость, сдвиг

Для цитирования

Лабудин Б.В., Попов Е.В., Ощепкова Е.С., Сопилов В.В., Русланова А.В., Фукалов А.А. Влияние разрывов (стыков) в обшивке на напряженно-деформированное состояние плитно-ребристых деревокомпозитных панелей // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2020. Т. 16. № 6. С. 439–451. <http://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2020-16-6-439-451>

Лабудин Борис Васильевич, профессор кафедры инженерных конструкций, архитектуры и графики, доктор технических наук; eLIBRARY SPIN-код: 6705-1677, Scopus Author ID: 57191523557, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-2547-3096>

Попов Егор Вячеславович, доцент кафедры инженерных конструкций, архитектуры и графики, кандидат технических наук, доцент; eLIBRARY SPIN-код: 5395-2753, Scopus Author ID: 57208305419, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-8950-7558>

Ощепкова Екатерина Сергеевна, магистрант кафедры инженерных конструкций, архитектуры и графики; eLIBRARY SPIN-код: 7161-0280, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-9707-9741>

Сопилов Валерий Вячеславович, аспирант кафедры инженерных конструкций, архитектуры и графики; eLIBRARY SPIN-код: 5227-6839, Scopus Author ID: 57208300208, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-1236-5950>

Русланова Анастасия Владимировна, аспирант кафедры инженерных конструкций, архитектуры и графики; eLIBRARY SPIN-код: 7398-8035, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-0298-9129>

Фукалов Александр Андреевич, магистрант кафедры экономики строительства и ЖКХ Института безотрывных форм обучения; eLIBRARY SPIN-код: 2848-3709.

© Лабудин Б.В., Попов Е.В., Ощепкова Е.С., Сопилов В.В., Русланова А.В., Фукалов А.А., 2020

 This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Influence of cover splices on the stress-strain state of plate-ribbed wood-composite panels

Boris V. Labudin¹, Egor V. Popov^{1*}, Ekaterina S. Oshchepkova¹, Valery V. Sopilov¹, Anastasia V. Ruslanova¹, Alexandr A. Fukalov²

¹Northern (Arctic) Federal University, 17 Severnoi Dviny Embkt, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation

²Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, 4 2-ya Krasnoarmeyskaya St, Saint Petersburg, 190005, Russian Federation

*egpv1989@mail.ru

Article history

Received: September 3, 2020

Revised: November 13, 2020

Accepted: November 20, 2020

Abstract

Wooden-composite plate-ribbed bent panels with structural plywood and oriented strand board sheathing with breaks are considered. An overview of studies researching and improving the effectiveness of different types of panels is presented. On the basis of the theory of calculation of composite rods by A.R. Rzhanitsyn, a mathematical model has been compiled, which makes it possible to calculate the stress-strain state of these structures, taking into account the presence of breaks in the sheathing and the flexibility of the mechanical fasteners of the sheathing and ribs. An equation for finding the coordinates of the most dangerous section of wooden ribs in the presence of breaks in the sheathing, which may not match with the middle of the span, is obtained. Panels with sheathing in a compressed zone with different locations of joints, symmetrically relative to the middle of the panel span are considered. Panels without joints in the skin are considered to compare the results. The graphs of the dependence of the maximum tensile stresses in the ribs in the most dangerous section and the maximum vertical displacements from the stiffness coefficient of the shear ties and the location of the breaks in the sheathing are presented. The values of the coefficients for the engineering design of panels, taking into account the decrease in the strength and deformation characteristics of the composite section of panels with breaks in the sheathing, as compared to panels with a solid sheathing, are obtained. The conclusions and recommendations, based on the results of the investigations, which can be used in the design of wooden-composite plate-ribbed structures, are formulated.

Keywords: wooden-composite ribbed panels, mechanical joints, cover splices, stiffness, compliance, shear

For citation

Labudin B.V., Popov E.V., Oshchepkova E.S., Sopilov V.V., Ruslanova A.V., Fukalov A.A. Influence of cover splices on the stress-strain state of plate-ribbed wood-composite panels. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2020;16(6):439–451. (In Russ.) <http://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2020-16-6-439-451>

1. Введение

Композитные панели на деревянном каркасе с обшивками из плитных материалов – универсальные ограждающие и несущие конструкции. Они могут быть использованы в качестве покрытий, перекрытий, стеновых ограждений, а также в качестве основных несущих элементов в малоэтажном строительстве. Они выполняют функции прогонов, настила, подшивки, обеспечивают защиту здания от тепловых потерь при использовании в конструкции панели утеплителя, одновременно выступая в качестве жестких горизонтальных дисков. В качестве обшивок широкое применение нашли такие материалы, как конструкционная фанера (ФК) и ориентированно-стружечные плиты (ОСП). В качестве ребер – пиломатериалы хвойных пород согласно стандарту Российской Федерации [1].

Повышению эксплуатационных показателей композитных панелей из различных материалов посвящены многочисленные исследования. В работе [2] предложен способ соединения наружных и внут-

Boris V. Labudin, Professor of the Department of Engineering Constructions, Doctor of Technical Sciences; eLIBRARY SPIN-code: 6705-1677, Scopus Author ID: 57191523557, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-2547-3096>

Egor V. Popov, Associate Professor of the Department of Engineering Constructions, Candidate of Technical Sciences; eLIBRARY SPIN-code: 5395-2753, Scopus Author ID: 57208305419, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-8950-7558>

Ekaterina S. Oshchepkova, master student of the Department of Engineering Constructions; eLIBRARY SPIN-code: 7161-0280, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-9707-9741>

Valery V. Sopilov, postgraduate student of the Department of Engineering Constructions; eLIBRARY SPIN-code: 5227-6839, Scopus Author ID: 57208300208, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-1236-5950>

Anastasia V. Ruslanova, postgraduate student of the Department of Engineering Constructions; eLIBRARY SPIN-code: 7398-8035, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-0298-9129>

Alexandr A. Fukalov, master student of the Department of Construction Economics, Housing and Communal Services of the Institute of Continuous Forms of Education; eLIBRARY SPIN-code: 2848-3709.

ренного слоя трехслойных панелей, позволяющий значительно повысить сопротивление швов продольному и поперечному сдвигам. В статье [3] исследуется прочность на изгиб сборных железобетонных стеновых панелей с утеплителем при использовании различных связей между наружными несущими железобетонными слоями. Работа [4] посвящена определению предельной сжимающей нагрузки и анализу устойчивости панелей из углеродного волокна и стекловолокна с ребрами жесткости Z- и L-профиля. В [5] приведены результаты исследований сдвиговой прочности между слоями модульных сэндвич-панелей с оболочкой из полиэтилена высокой плотности в зависимости от способа штамповки.

Для максимально эффективного включения обшивок в общую работу панели на деревянном каркасе традиционно применяются жесткие клеевые соединения на границе «ребро – обшивка» [6]. Однако ряд проведенных экспериментальных и теоретических исследований [7–9] показал, что учет обшивки возможен и при креплении ее к ребрам с использованием современных податливых механических связей, а применение связей с повышенным сопротивлением продольному сдвигу [10] позволяет использовать их как альтернативу клеевым соединениям [11; 12]. В работе [13] приводятся результаты исследований увеличения прочности панелей на деревянном каркасе, работающем совместно с обшивками из листовых материалов, крепление которых выполняется при помощи шурупов в процессе работы панели на сдвиг в качестве диафрагмы. В ряде теоретических работ широко рассматриваются обобщенные функции, позволяющие учитывать разрывные параметры обшивок [14–16].

2. Цель

Приведенная в действующих на территории Российской Федерации нормах [17] и рекомендациях [18] методика расчета панелей на деревянном каркасе (рис. 1) подразумевает их расчет как для элементов с цельным сечением, без учета податливости швов на границе ребер и обшивок. Такой подход может вносить значительную погрешность при оценке напряженно-деформированного состояния (НДС) панелей, в которых обшивка крепится к ребрам с применением механических связей в виде гвоздей, винтов или скоб [19], а также коннекторов различных видов [20]. При наличии стыков в обшивке расчетное сопротивление материала обшивки принимается с понижающим коэффициентом m_{ϕ} , учитывающим снижение расчетного сопротивления в стыке и способ стыковки (склеивание на ус либо приклеивание фанерных накладок). При таком подходе, однако, не учитывается положение стыков по длине панели, а также случай стыка без применения клеевого соединения, который наиболее удобен при изготовлении панелей с механическими связями между обшивкой и ребрами, что делает эту работу актуальной. Вышесказанное позволяет повысить не только конструкционную эффективность панелей, но и энергетическую эффективность производства пилопродукции [21].

Вышеперечисленные факторы позволили для достижения цели сформулировать следующие задачи:

- разработать адекватную работе плитно-ребристой конструкции математическую модель, учитывающую податливость механических связей на границе ребра и обшивки, а также наличие стыков (разрывов), произвольно расположенных по длине пролета панели;
- получить корректирующие коэффициенты, которые позволили бы получать более точное решение в инженерных расчетах по первому и второму предельным состояниям.

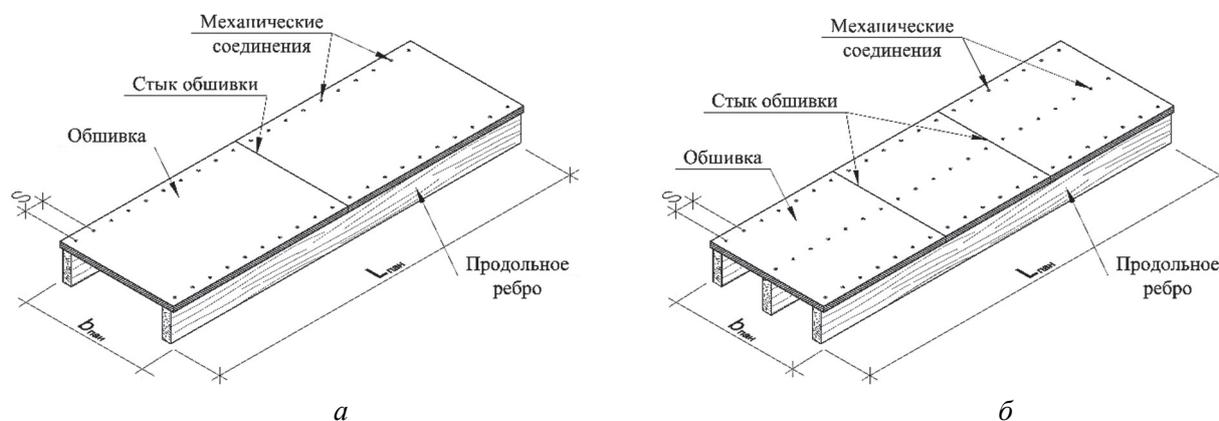


Рис. 1. Конструкция деревокомпозитной ребристой панели на механических связях со стыками в обшивке:
а – стык в середине пролета; б – стыки в 1/3 пролета

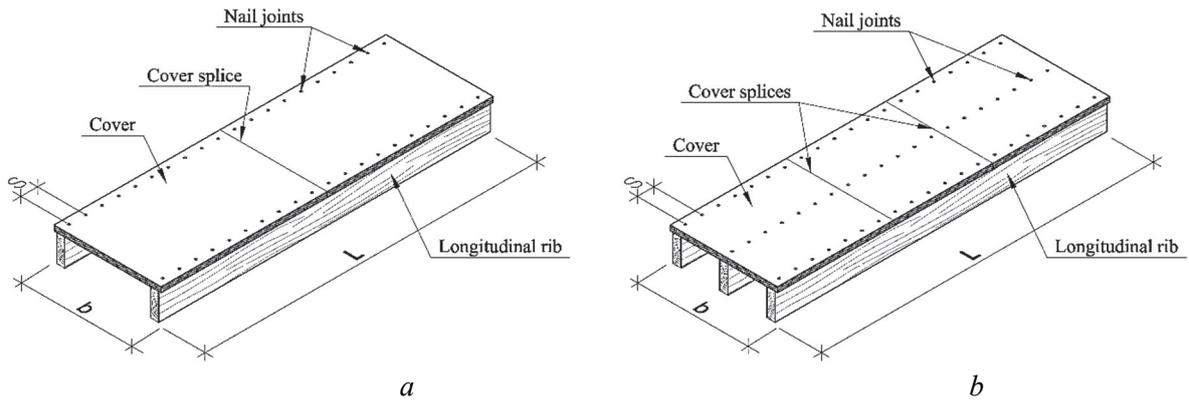


Figure 1. Construction of wood-composite ribbed panel on mechanical ties with cover splices: *a* – splice in the middle of the span; *b* – splices in 1/3 span

3. Материалы и методы

При расчете ребристых с клеевым соединением и на механических связях панелей согласно действующим на территории Российской Федерации нормам [17] производится замена фактического поперечного сечения приведенным (рис. 2). Расчетная (приведенная) ширина сечения обшивки панели определяется путем умножения фактической ширины $b_{\text{факт}}$ на коэффициент $k_{\text{ред}}$:

$$b_{\text{ред}} = k_{\text{ред}} b_{\text{факт}}, \quad (1)$$

где $k_{\text{ред}}$ – коэффициент приведения (редукции), учитывающий неравномерность распределения нормальных напряжений в поперечном сечении обшивки; $b_{\text{факт}}$ – фактическая (габаритная) ширина обшивки.

Длину панели (рис. 3) разбиваем на три участка: L_1 – участок от левой опоры до первого стыка, L_2 – расстояние между стыками. За размер $\sum L$ принимается полная величина расчетного пролета панели. Возможны два частных случая: $L_2 = 0$ – соответствует наличию только одного стыка, в середине пролета; $L_1 = 0 \rightarrow L_2 = \sum L$ – обшивка не имеет стыков по длине. При построении расчетной модели предполагается, что идеальная подгонка листов обшивки по торцам отсутствует и через стыки не передаются как изгибающие моменты, так и продольные сжимающие усилия.

Панель рассматривается как двухслойный составной элемент, состоящий из обшивки и ребер. Наличие стыков (разрывов) в обшивке учитывается введением соответствующих граничных условий. Дифференциальное уравнение, описывающее распределение сдвигающих сил на границе «ребро–обшивка», согласно [22] имеет вид

$$T'' / \xi = \gamma T + \Delta, \quad (2)$$

где T – функция распределения сдвигающих усилий; ξ – коэффициент жесткости связей сдвига, приведенный к погонному; γ, Δ – коэффициент и свободный член дифференциального уравнения (2), определяемые по формулам (4) и (5), соответственно.

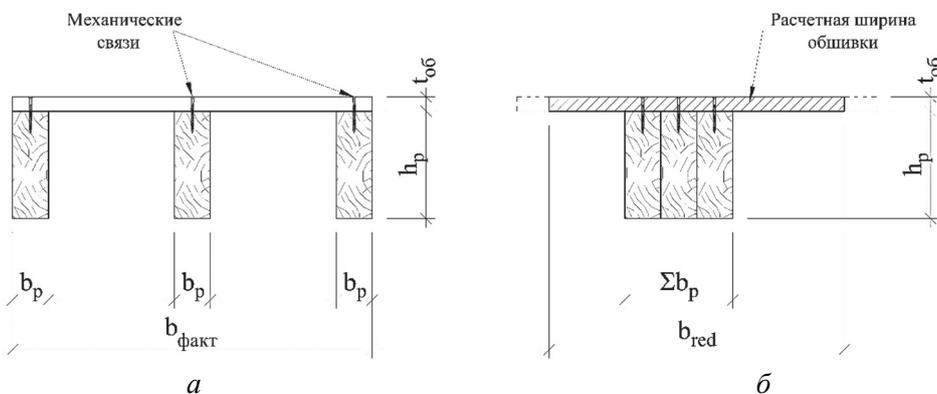


Рис. 2. Схема поперечного сечения двухслойной панели: *a* – фактическое сечение; *б* – приведенное тавровое сечение

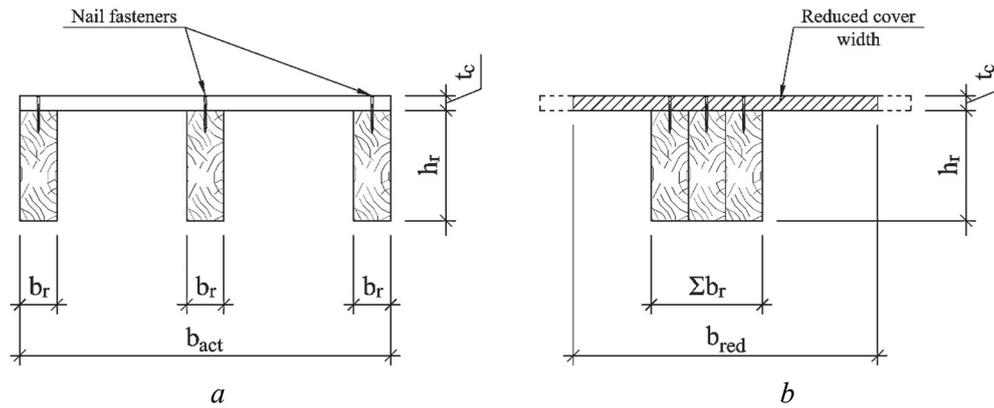


Figure 2. Cross-section of a two-layer plate element:
a – the actual cross-section; *b* – the reduced T-section

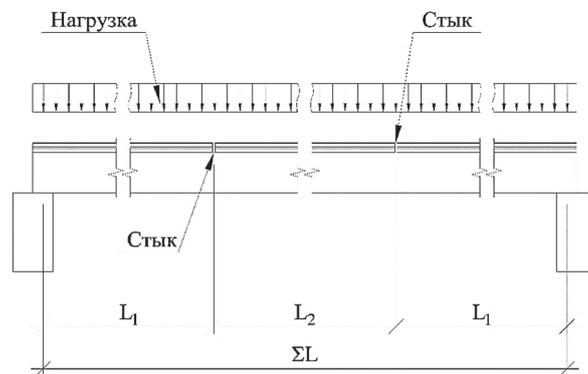


Рис. 3. Схема панели со стыками в обшивке

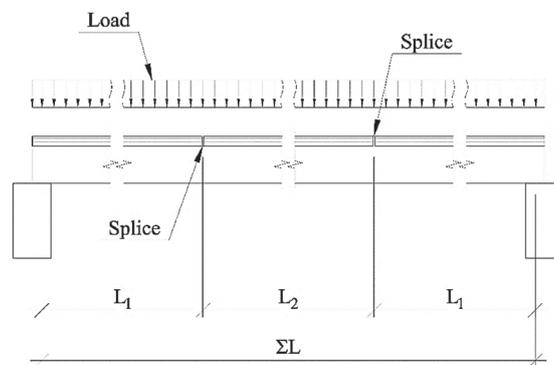


Figure 3. The scheme of the a panel with breaks of a cover

Решение дифференциального уравнения (2) имеет вид

$$T(x) = C_1 \operatorname{sh} \lambda x + C_2 \operatorname{ch} \lambda x + \frac{\xi}{\lambda} \cdot \int_0^x \Delta(t) \sin(\lambda(x-t)) dt, \quad (3)$$

где C_1, C_2 – постоянные интегрирования, определяемые из граничных условий.

$$\gamma = 1/E_{o6}A_{o6} + 1/E_pA_p + c^2/\Sigma EI, \quad (4)$$

где E_{o6}, E_p, A_{o6}, A_p – модули упругости материалов и площади поперечного сечения обшивки и ребра соответственно; c – расстояние между центрами тяжести сечений обшивки и ребра; ΣEI – сумма изгибных жесткостей обшивки и ребра.

$$\Delta(t) = -M_0(t) \cdot c / \Sigma EI, \quad (5)$$

где $M_0(t)$ – функция распределения изгибающих моментов только от внешней нагрузки $q = \text{const}$ в пределах длин участков панели.

Значения изгибающих моментов на участках L_1 и L_2 можно определить по формулам:

– для участка L_1 :

$$M_0(t) = \frac{q \Sigma L \cdot t - q \cdot t^2}{2}; \quad (6)$$

– для участка L_2 :

$$M_0(t) = \frac{q \Sigma L}{2} \cdot (L_1 + t) - q L_1 \left(\frac{L_1}{2} + t \right) - \frac{q t^2}{2}, \quad (7)$$

где t – координата, отсчитываемая от начала рассматриваемого участка; q – равномерно распределенная нагрузка на панель, приведенная к погонной: $q = g \cdot b_{\text{пан}}$, здесь g – распределенная нагрузка на 1 м^2 панели.

Схема распределения усилий и напряжений на выделенном фрагменте панели с механическими податливыми связями представлена на рис. 4.

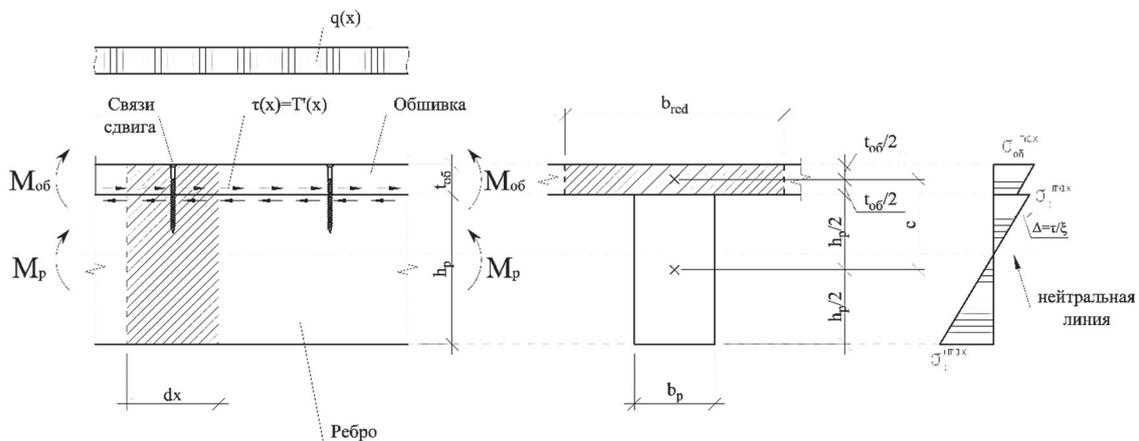


Рис. 4. Схема распределения усилий и напряжений на выделенном участке панели

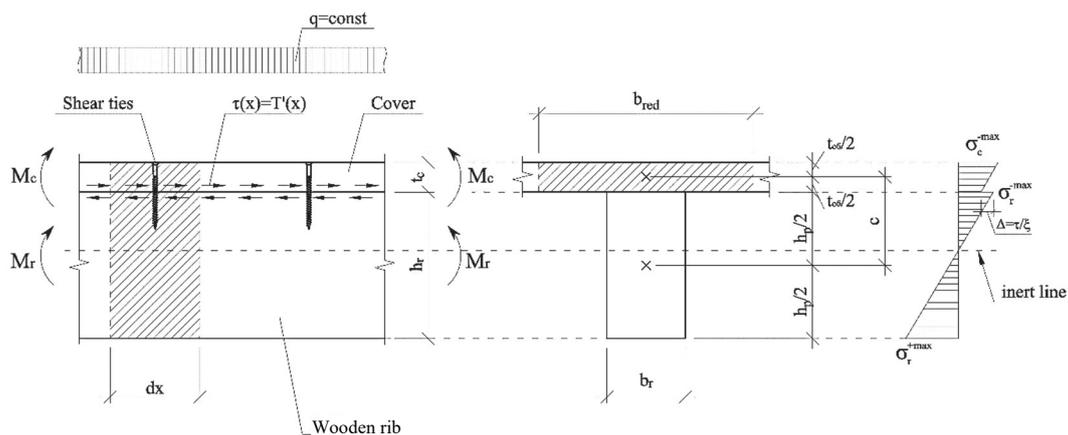


Figure 4. Distribution of forces and stresses scheme on the selected section of the panel

Решения дифференциального уравнения (2) при подстановке в него (5), (6) и (7) будет иметь вид:
– для участка L_1 :

$$T(x_1) = A_1 \text{sh} \lambda x_1 + B_1 \text{ch} \lambda x_1 + \frac{\xi}{\lambda} \int_0^{x_1} \left(-\frac{(0,5q \Sigma L \cdot t - 0,5qt^2) \cdot c}{\Sigma EI} \right) \sin(\lambda(x_1 - t)) dt; \quad (8)$$

– для участка L_2 :

$$T(x_2) = A_2 sh\lambda x_2 + B_2 ch\lambda x_2 + \frac{\xi}{\lambda} \cdot \int_0^{x_2} \left(\frac{\left(\frac{q\Sigma L(L_1+t)}{2} - qL\left(\frac{L_1+t}{2}\right) - \frac{qt^2}{2} \right) \cdot c}{\Sigma EI} \right) \sin(\lambda(x_2-t)) dt, \quad (9)$$

где x_1, x_2 – координаты, отсчитываемые от начала участков L_1 и L_2 слева направо соответственно; A_i, B_i – постоянные интегрирования, определяемые из граничных условий.

Интегрируя правую часть решений (8), (9) получаем выражения

$$T(x_1) = A_1 sh\lambda x_1 + B_1 ch\lambda x_1 - \frac{\xi}{\lambda} \cdot \left(\frac{cq \left[\lambda^2 x_1^2 + \Sigma L \lambda sh\lambda x_1 - 2ch\lambda x_1 - \Sigma L \lambda^2 x_1 + 2 \right]}{2 \Sigma EI \lambda^3} \right), \quad (10)$$

$$T(x_2) = A_2 sh\lambda x_2 + B_2 ch\lambda x_2 - \frac{\xi}{2 \Sigma EI \lambda^4} \times$$

$$\times \left(cq \left[2 - 2ch\lambda x_2 + L_1^2 \lambda^2 + \lambda^2 x_2^2 - L_1^2 \lambda^2 ch\lambda x_2 + \Sigma L \lambda sh\lambda x_2 - 2L_1 \lambda sh\lambda x_2 - \Sigma L L_1 \lambda^2 - L \lambda^2 x_2 + 2L_1 \lambda^2 x_2 + \Sigma L L_1 \lambda^2 ch\lambda x_2 \right] \right). \quad (11)$$

Поскольку на границах участков (в стыках) препятствия сдвигу обшивки относительно ребра отсутствуют, граничные условия будут иметь вид $T(0) = T(L_1) = T(L_2) = 0 \rightarrow B_1 = B_2 = 0$. Соответственно:

$$A_1 = \frac{\xi cq (\lambda^2 L_1^2 - 2ch\lambda L_1 + \Sigma L \lambda sh\lambda L_1 - \Sigma L \lambda^2 L_1 + 2)}{2 \Sigma EI \lambda^4 sh(\lambda L_1)}, \quad (12)$$

$$A_2 = \frac{\xi cq}{2 \Sigma EI \lambda^4 sh\lambda L_2} \times$$

$$\times \left(L_1^2 \lambda^2 - 2ch(L_2 \lambda) + L_2^2 \lambda^2 - L_1^2 \lambda^2 chL_2 \lambda + \Sigma L \lambda shL_2 \lambda - 2L_1 \lambda shL_2 \lambda - \Sigma L L_1 \lambda^2 - \Sigma L L_2 \lambda^2 + 2L_1 L_2 \lambda^2 + \Sigma L L_1 \lambda^2 chL_2 \lambda + 2 \right), \quad (13)$$

где λ – характеристическое число, определяемое по формуле

$$\lambda = \sqrt{\xi \cdot \gamma}, \quad (14)$$

где ξ – погонный коэффициент жесткости соединений на границе «ребро – обшивка»; γ – коэффициент дифференциального уравнения (2), определяемый по формуле (4).

Изгибающие моменты в плите и ребре с учетом работы связей сдвига (рис. 4) определяются по формулам

$$M_{об} = (M_0 - T \cdot c) \frac{E_{об} I_{об}}{\Sigma EI}; \quad M_p = (M_0 - T \cdot c) \frac{E_p I_p}{\Sigma EI}. \quad (15)$$

Нормальные напряжения:

$$\sigma_{об} = \frac{-T}{A_{об}} \pm \frac{M_{об} \cdot 0,5 \cdot t_{об}}{2 I_{об}}; \quad \sigma_p = \frac{T}{A_p} \pm \frac{M_p \cdot h_p}{2 I_p}. \quad (16)$$

Для панели с двумя стыками в ряде случаев положение наиболее опасного сечения может не совпадать с серединой пролета. Для поиска сечения с наибольшими растягивающими напряжениями в нижней зоне ребра следует решить уравнение (17) относительно x_2 :

$$d \left(\frac{T_2(x_2)}{A_p} \pm \frac{(M_0(x_2) - T(x_2) \cdot c) \cdot h_p}{2 I_p} \right) / dx_2 = 0. \quad (17)$$

Для определения прогиба панели запишем уравнение изогнутой оси изгибаемого элемента:

$$y(x) = \int \int \frac{M(x)}{\Sigma EI} dx dx = \frac{1}{\Sigma EI} \int \int M(x) dx dx. \quad (18)$$

Функция $y(x)$ будет иметь переломы в местах стыков в обшивке, поэтому выражение (18) следует составить для участков L_1 и L_2 , а равенство прогибов на границе участков связать граничными условиями. Получим выражения

$$y_1(x_1) = \frac{1}{\Sigma EI} \int \int M_1(x_1) dx dx = \frac{1}{\Sigma EI} \int \int \left(\frac{q \Sigma L x_1 - q x_1^2}{2} - T_1(x_1) \cdot c \right) dx dx; \quad (19)$$

$$y_2(x_2) = \frac{1}{\Sigma EI} \int \int M_2(x_2) dx dx = \frac{1}{\Sigma EI} \int \int \left(\frac{q \Sigma L (L_1 + x_2) - q x_2^2}{2} - q \Sigma L \left(\frac{L_1 + x_2}{2} \right) - T_2(x_2) \cdot c \right) dx dx, \quad (20)$$

где y_1, y_2 – функции прогибов панели на участках L_1 и L_2 соответственно.

Очевидно, что интегрирование выражений (19), (20) с входящими в них зависимостями распределения сдвигающих усилий (10) и (11) представляет довольно сложную задачу, поэтому для упрощения решения заменим подынтегральные функции квадратичными полиномами вида

$$M_1(x_1) = a_1 x_1^2 + b_1 x_1 + d_1; \quad M_2(x_2) = a_2 x_2^2 + b_2 x_2 + d_2, \quad (21)$$

где a_i, b_i и d_i – коэффициенты и свободные члены аппроксимирующих полиномов, определяемые методом наименьших квадратов, учитывая, что $M_1(0) = 0$, свободный член $d_1 = 0$.

Подставляя выражения (21) в (18) и интегрируя их, получаем

$$y_1(x_1) = \frac{1}{\Sigma EI} \left(\frac{a_1 x_1^4 + 2b_1 x_1^3}{12} + C_1 x_1 + D_1 \right); \quad (22)$$

$$y_2(x_2) = \frac{1}{\Sigma EI} \left(\frac{a_2 x_2^4 + 2b_2 x_2^3 + 6d_2 x_2^2}{12} + C_2 x_2 + D_2 \right), \quad (23)$$

где C_i и D_i – постоянные интегрирования, определяемые из граничных условий.

Из условия равенства прогиба нулю на опоре, а также равенства прогибов и углов поворота сечений на границах участков L_1 и L_2 получаем $y_1(0) = 0$; $y_1(L_1) = y_2(0) = y_2(L_2)$; $y_1'(L_1) = y_2'(0) = y_2'(L_2)$, что приводит к системе уравнений

$$\begin{cases} \frac{a_1 x_1^4 + 2b_1 x_1^3}{12} + C_1 x + D_1 = 0; \\ \frac{a_1 L_1^4 + b_1 L_1^3}{12} + C_1 \cdot L_1 + D_1 = D_2; \\ \frac{a_1 L_1^3}{3} + \frac{b_1 L_1^2}{2} + C_1 = C_2; \\ \frac{a_1 L_1^4 + 2b_1 L_1^3}{12} + C_1 L_1 + D_1 = \frac{a_2 L_2^4 + 2b_2 L_2^3 + d_2 L_2^2}{12} + C_2 L_2 + D_2, \end{cases} \quad (24)$$

решая которую получаем выражения для определения произвольных постоянных:

$$C_1 = -\frac{a_1 L_1^3}{3} - \frac{b_1 L_1^2}{2} - \frac{a_2 L_2^3 + 2b_2 L_2^2 + 6d_2 L_2}{12}; \quad C_2 = -\frac{a_2 L_2^3 - 2b_2 L_2^2 - 6d_2 L_2}{12}; \quad (25)$$

$$D_1 = 0; \quad D_2 = -\frac{a_1 L_1^4}{4} - \frac{b_1 L_1^3}{3} - \frac{a_2 L_1 L_2^3 + 2b_2 L_1 L_2^2 + 6d_2 L_1 L_2}{12}. \quad (26)$$

4. Результаты

Рассмотрим НДС плитно-ребристой конструкции на примере одной деревокомпозитной панели пролетом $\sum L = 6$ м с тремя продольными ребрами и обшивкой из фанеры конструкционной марки ФК/ориентированно-стружечной плиты ОСП толщиной 18 мм. Ребра выполняются из древесины класса прочности С22 согласно стандарту Российской Федерации [1] сечением 50×200 мм. Распределенная нагрузка, приведенная к погонной, составляет $q = 1$ кН/п.м. Расчетная ширина обшивки принимается согласно работе [17] и составляет $b_{red} = 1,125$ м.

Обшивки укладываются со стыками на расстоянии 1, 2 и 3 м от опор, результаты сравниваются с панелью, где отсутствуют стыки в обшивке. Жесткость податливых связей сдвига принята согласно исследованиям [23] и рассматривается в интервале $\xi = 2000 \dots 10000$ кН/м² на каждый шов. За критерий прочности принимаются нормальные напряжения σ_r в растянутой зоне ребра, поскольку при выбранной схеме они являются критерием прочности всей конструкции. Графики зависимости напряжений σ_r от коэффициента жесткости связей ξ представлены на рис. 5, а. Значение $\xi = \infty$ соответствует жесткому кле-евому соединению обшивки и ребер.

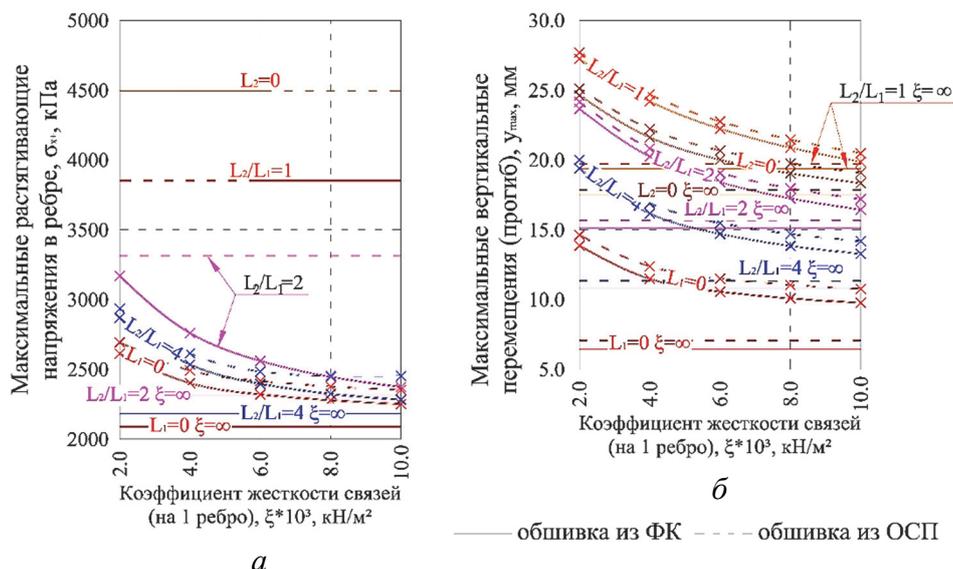


Рис. 5. Графики зависимости максимальных растягивающих напряжений σ_{x+} в растянутой зоне ребер (а); максимальных вертикальных перемещений (б) от коэффициента жесткости связей сдвига ξ и расположения стыков в обшивке L_1/L_2

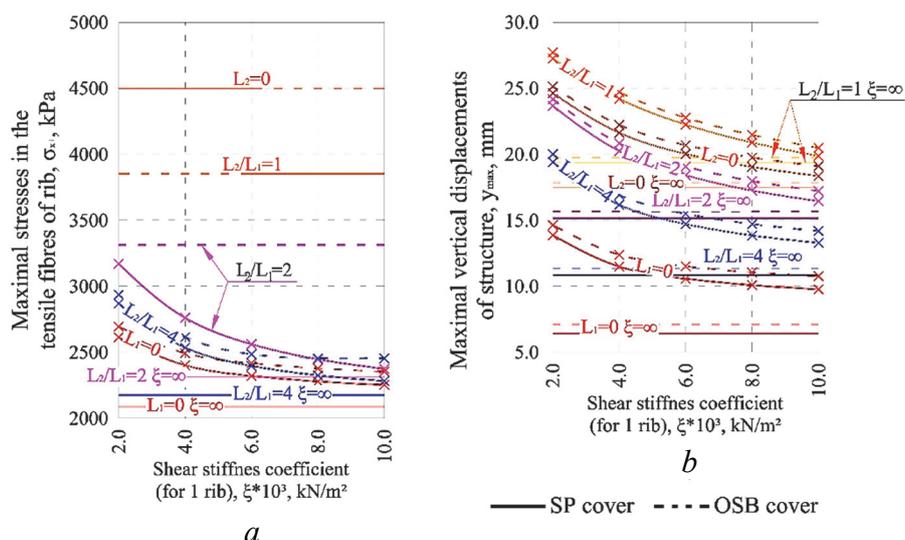


Figure 5. Graphs of the dependence of the maximum tensile stresses σ_{x+} in the tensile fibres of the rib (a) and maximum vertical displacements (b) on the shear stiffness coefficient of ties ξ

5. Обсуждение

Наличие стыков в обшивке существенно влияет на работу деревокомпозитной панели. С уменьшением соотношения L_2/L_1 эффективность работы обшивки в составе конструкции снижается. Расчеты показали, что доля снижения прочности панели при изгибе может составлять 9,8...47,5 % (8,9...43,1 %) для панели с обшивкой из ФК (ОСП). При расположении стыков на расстоянии $1/3$ от опор панели (при $L_2/L_1 \leq 1$) наиболее опасное сечение будет находиться на стыке обшивок. При расположении стыка в середине пролета ($L_2 = 0$) прочность панели при изгибе будет обусловлена только прочностью ребер.

Расчет вертикальных перемещений дает аналогичные результаты: при удалении стыков обшивок от опорных сечений прогибы конструкции увеличиваются на 40...100 % для панелей с обшивкой из ФК и на 37...90 % с обшивкой из ОСП. Однако соотношение $L_2/L_1 = 1$ является в данном случае наиболее неблагоприятным, чем при $L_2 = 0$. Таким образом, при необходимости устройства стыков обшивки на расстоянии более чем $1/3 \sum L$ от опор нужно учитывать, какой фактор будет являться решающим при выборе сечения в каждом конкретном случае – прочность или вертикальные перемещения.

При инженерном расчете деревокомпозитных изгибаемых панелей предложено вводить в расчет коэффициенты $k_{ст,в}$ и $k_{ст,ж}$, учитывающие негативное влияние стыков в обшивке на прочность и жесткость всей конструкции панели. На данные коэффициенты умножаются полученные значения нормальных напряжений и прогибов, рассчитанные для панели без стыков в обшивке. Методика расчета таких панелей представлена в работе [24].

Значения коэффициентов $k_{ст,в}$ и $k_{ст,ж}$ определяются по формуле

$$k_{ст,в} = \frac{(\sigma_p^+)' }{\sigma_p^+}; \quad k_{ст,ж} = \frac{f'}{f}, \quad (27)$$

где σ_p^+ , $(\sigma_p^+)'$ – значения максимальных растягивающих напряжений в ребре панели без стыков в обшивке и со стыками соответственно; f' , f – значения максимальных вертикальных перемещений в ребре панели без стыков в обшивке и со стыками соответственно.

Таблица

Значения коэффициентов $k_{ст,в}$ и $k_{ст,ж}$
[Table. Values of coefficients $k_{sp,v}$ and $k_{sp,j}$]

Коэффициент [Coefficient]	Расположение стыков (L_2/L_1) [L_2/L_1 ratio]			
	4	2	1	$L_2 = 0$
$k_{ст,в}$ [$k_{sp,v}$]	1,1*	1,21	1,47	–
	1,1	1,23	1,47	–
$k_{ст,ж}$ [$k_{sp,j}$]	1,4	1,7	2,0	1,78
	1,37	1,65	1,9	1,72

Примечание. * В числителе приведены значения для панелей с обшивками из ФК, в знаменателе – из ОСП.

[Note. * The numerator shows the values for panels with SP covers, and the values with OSB covers – in the denominator.]

Значения предложенных коэффициентов в зависимости от соотношения L_2/L_1 приведены в таблице. Для промежуточных значений L_2/L_1 , не представленных в таблице, значения коэффициентов определяются по линейной интерполяции.

6. Заключение

Разработана математическая модель, позволяющая численно-аналитически определить напряженно-деформированное состояние деревокомпозитных плитно-ребристых изгибаемых панелей с учетом податливости связей на границе обшивки и ребер, а также наличия стыков (разрывов) в обшивке.

Стыки в обшивке отрицательно сказываются на НДС деревокомпозитной плитно-ребристой конструкции, увеличивая нормальные растягивающие напряжения в ребре на 10...50 %, а максимальные вертикальные перемещения на 40...100 % по сравнению с панелью без стыков в обшивке.

При необходимости устройства стыков в обшивке и для более эффективной работы конструкции рекомендуется размещать их за пределами средней трети расчетного пролета панели. При невозможности выполнения данного условия следует учитывать какой из критериев – прочность или прогиб – является определяющим при назначении размеров поперечного сечения основных ребер.

Предложены значения коэффициентов $k_{ст,в}$ и $k_{ст,ж}$ для инженерного расчета панелей, учитывающих снижение прочностных и деформационных характеристик композитного сечения панели с разрывами в обшивке. Значения этих коэффициентов рекомендуется определять по вышеприведенной таблице с учетом их местоположения в пролете панели.

Информация о вкладе каждого автора. *Е.В. Попов, Б.В. Лабудин* – составление математической модели; *Е.С. Ощепкова, В.В. Сопилов* – написание вводной части, проведение численных исследований на основе созданной математической модели; *А.А. Русланова* – оформление работы, перевод на английский язык и транслитерация; *А.А. Фукалов* – построение рисунков и графиков, формулировка выводов и заключения.

Credit author statement. *Egor V. Popov, Boris V. Labudin* – a mathematical model design; *Ekaterina S. Oshchepkova, Valery V. Sopilov* – an introductory part, conducting numerical researches, based on the created mathematical model; *Anastasia V. Ruslanova* – design of document, translation into English and transliteration; *Alexandr A. Fukalov* – design of figures and graphs, formulation of conclusions.

Список литературы

- ГОСТ 33080-2014. Конструкции деревянные. Классы прочности конструкционных пиломатериалов и методы их определения. М.: Стандартинформ, 2019.
- Naika R.K., Panda S.K., Racherla V.* A new method for joining metal and polymer sheets in sandwich panels for highly improved interface strength // *Composite Structures*. 2020, November. Vol. 251. Article 112661. DOI: 10.1016/j.compstruct.2020.112661.
- Gombada M.J., Naito C.J., Quiel S.E.* Flexural performance of precast concrete insulated wall panels with various configurations of ductile shear ties // *Journal of Building Engineering*. 2021, January. Vol. 33. Article 101574. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101574>
- Elumalai E.S., Krishnaveni G., Sarath Kumar R., Dominic Xavier D., Kavitha G., Seralathan S., Hariram V., Micha Premkumar T.* Buckling analysis of stiffened composite curved panels // *Materials Today: Proceedings*. 2020, 20 June. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.05.662.
- Tahmoorian F., Nemati S., Sharafi P., Samali B., Khakpour S.* Punching behaviour of foam filled modular sandwich panels with high-density polyethylene skins // *Journal of Building Engineering*. 2021, January. Vol. 33. Article 101634. DOI: 10.1016/j.jobe.2020.101634.
- Гребенюк Г.И., Дмитриев П.А., Жаданов В.И., Астащенко Г.Г.* Конструирование, расчет и оптимизация совмещенных ребристых конструкций на основе древесины // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2013. № 11–12 (659–660). С. 48–57.
- Кавелин А.С.* Исследование работы на сдвиг гвоздевого соединения обшивки и ребра деревянной стеновой панели // *Строительство-2014: современные проблемы промышленного и гражданского строительства: материалы международной научно-практической конференции*. Ростов н/Д, 2014. С. 98–100.
- Labudin B., Popov E., Stolypin D., Sopilov V.* The wood composite ribbed panels on mechanical joints // *E3S Web Conf*. 2019. Vol. 91. Topical Problems of Architecture, Civil Engineering and Environmental Economics (TPACEE 2018). DOI: 10.1051/e3sconf/20199102021.
- Labudin B.V., Popov E. V., Sopilov V.V.* Stability of compressed sheathings of wood composite plate-ribbed structures // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 687. Issue 3. Article 033041. DOI: 10.1088/1757-899X/687/3/033041.
- Попов Е.В., Тюрикова Т.В., Лабудин Б.В., Мелехов В.И.* О повышении сдвигоустойчивости податливых связей составных деревянных конструкций на когтевых шайбах Bulldog // *Строительная механика и расчет сооружений*. 2016. № 4. С. 23–28.
- Попов Е.В., Филиппов В.В., Мелехов В.И., Лабудин Б.В., Тюрикова Т.В.* Влияние жесткости связей сдвига при расчете ребристых панелей на деревянном каркасе // *Лесной журнал*. 2016. № 4. С. 123–134.
- Попов Е.В., Филиппов В.В., Журавлева Т.П., Мелехов В.И., Лабудин Б.В.* Экспериментальные исследования жесткости связей в напряженно-деформированном состоянии панелей на открытых каркасе // *Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения*. 2016. № 1. С. 111–117.
- Baszen M.* Semi-rigid behavior of joints in wood light-frame structures // *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 172. Pp. 88–95. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.022>
- Михайлов Б.К.* Пластины и оболочки с разрывными параметрами / под ред. В.А. Лебедева Л.: Изд-во ЛГУ, 1980. 196 с.
- Кобелев Е.А.* Расчет нелинейно-упругих оболочек, дискретно соединенных ребрами // *Перспективы науки*. 2018. № 11(110). С. 54–62.

16. Кондратьева Л.Н., Окладникова Е.В. Исследование частот и форм колебаний трехслойных пологих облочков с изломами поверхности // Промышленное и гражданское строительство. 2008. № 7. С. 38–39.
17. СП 64.13330.2017. Свод правил. Деревянные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-25-80 (с Изменением № 1). М.: Стандартинформ, 2017.
18. Рекомендации по проектированию панельных конструкций с применением древесины и древесных материалов для производственных зданий / ЦНИИСК имени В.А. Кучеренко. М., 1982. 120 с.
19. Лабудин Б.В. Расчет плитно-ребристых конструкций с упругоподатливыми связями // Лесной журнал. 1992. № 1. С. 67–72.
20. Римшин В.И., Лабудин Б.В., Мелехов В.И., Попов Е.В., Рощина С.И. Соединения элементов деревянных конструкций на шпонках и шайбах // Вестник МГСУ. 2016. № 9. С. 35–50.
21. Агеев С.П. Повышение энергетической эффективности производства пилопродукции: автореф. дис. ... д. т. н. Архангельск, 2011. 37 с.
22. Ржаницын А.Р. Составные стержни и пластинки: научное издание. М.: Стройиздат, 1986. 314 с.
23. Labudin B.V., Popov E.V., Tyurikova T.V., Nikitina T.A., Ruslanova A.V. Experimental studies of the strength and rigidity of screw connections of covers with wooden ribs // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 753. Chapter 3. Article 042063. DOI:10.1088/1757-899X/753/4/042063.
24. Попов Е.В., Тюрикова Т.В., Поликарпов Д.А., Тропина П.М., Лабудин Б.В., Мелехов В.И. Инженерный расчет ребристых деревокомпозитных панелей с упруго-деформируемыми связями // Наука сегодня. Теоретические и практические аспекты: материалы Международной научно-практической конференции. Вологда, 2016. С. 53–57.

References

1. GOST 33080-2014. *Konstrukcii derevyannye. Klassy prochnosti konstrukcionnyh pilomaterialov i metody ih opredeleniya* [Wooden constructions. Strength classes of structural sawn timber and methods for their determination]. Moscow: Standartinform Publ.; 2019. (In Russ.)
2. Naika R.K., Panda S.K., Racherla V. A new method for joining metal and polymer sheets in sandwich panels for highly improved interface strength. *Composite Structures*. 2020(November);251:112661. DOI: 10.1016/j.compstruct.2020.112661.
3. Gombada M.J., Naito C.J., Quiel S.E. Flexural performance of precast concrete insulated wall panels with various configurations of ductile shear ties. *Journal of Building Engineering*. 2021(January);33:101574. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101574>
4. Elumalai E.S., Krishnaveni G., Sarath Kumar R., Dominic Xavier D., Kavitha G., Seralathan S., Hariram V., Micha Premkumar T. Buckling analysis of stiffened composite curved panels. *Materials Today: Proceedings*. 2020, 20 June. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.05.662.
5. Tahmoorian F., Nemati S., Sharafi P., Samali B., Khakpour S. Punching behaviour of foam filled modular sandwich panels with high-density polyethylene skins. *Journal of Building Engineering*. 2021(January);33:101634. DOI/10.1016/j.jobe.2020.101634.
6. Grebenyuk G.I., Dmitriev P.A., Zhadanov V.I., Astashenkov G.G. Designing, calculation and optimization of the combined ridge designs on the basis of wood. *News of higher educational institutions. Construction*. 2013;11–12(659–660): 48–57. (In Russ.)
7. Kavelin A.S. Issledovanie raboty na sdvig gvozdevogo soedineniya obshivki i rebra derevyannoj stenovoj paneli [Investigation of the work on the shift of the nail joint of the sheathing and the ribs of the wooden wall panel]. *Construction-2014: modern problems of industrial and civil building: materials of the international scientific and practical conference*. Rostov-on-Don; 2014. p. 98–100. (In Russ.)
8. Labudin B., Popov E., Stolypin D., Sopilov V. The wood composite ribbed panels on mechanical joints. *E3S Web Conf. Topical Problems of Architecture, Civil Engineering and Environmental Economics (TPACEE 2018)*. 2019:91. DOI: 10.1051/e3sconf/20199102021.
9. Labudin B.V., Popov E.V., Sopilov V.V. Stability of compressed sheathings of wood composite plate-ribbed structures. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019;687(3):033041. DOI: 10.1088/1757-899X/687/3/033041.
10. Попов Е.В., Тюрикова Т.В., Лабудин Б.В., Мелехов В.И. О повышении сдвигоустойчивости податливых связей составных деревянных конструкций на когтевых шайбах “Bulldog” [On increasing the shear stability of the flexible links of composite wooden structures on the bulldog claw washers]. *Structural Mechanics and Analysis of Constructions*. 2016;(4): 23–28. (In Russ.)
11. Попов Е.В., Филиппов В.В., Мелехов В.И., Лабудин Б.В., Тюрикова Т.В. Effect of shear connections rigidity in calculating the ribbed panels on a wooden frame. *Lesnoy zhurnal [Russian Forestry Journal]*. 2016;(4):123–134. (In Russ.) DOI: 10.17238/issn0536-1036.2016.4.136.
12. Попов Е.В., Филиппов В.В., Zhuravleva T.P., Мелехов В.И., Лабудин Б.В. Eksperimental'nye issledovaniya zhestkosti svyazey v napryazhenno-deformirovannom sostoyanii panelej na otkrytyh karkase [Experimental studies of the stiffness of ties in the stress-strain state of panels on open frames]. *Bezopasnost' stroitel'nogo fonla Rossii. Problemy i resheniya* [Security of the building fund in Russia: problems and solutions]. 2016;(1):111–117. (In Russ.)
13. Baszen M. Semi-rigid behavior of joints in wood light-frame structures. *Procedia Engineering*. 2017;172:88–95. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.022>
14. Mihajlov B.K. Plastiny i obolochki s razryvnymi parametrami [Plates and shells with discontinuous parameters]. Leningrad: LGU Publ.; 1980. (In Russ.)

15. Kobelev E.A. Calculation of nonlinear elastic shells discretely connected by edges. *Science Prospects*. 2018;(11): 54–62. (In Russ.)
16. Kondrateva L.N., Okladnikova E.V. Study of frequencies and forms of fluctuations of three-layer flat shells with surface fractures. *Industrial and civil engineering*. 2008;(7):38–39. (In Russ.)
17. SP 64.13330.2017. *Svod pravil. Derevyannye konstrukcii. Aktualizirovannaya redakciya SNIIP II-25-80 (s Izmeneniem № 1)* [Set of rules. Wooden structures. Updated edition of SNIIP II-25-80 (with Amendment No. 1)]. Moscow: Standartinform Publ.; 2017. (In Russ.)
18. CNIISK imeni V.A. Kucherenko. *Rekomendacii po proektirovaniyu panel'nyh konstrukcij s primeneniem drevesiny i drevesnyh materialov dlya proizvodstvennyh zdaniy* [Recommendations for the design of panel structures using wood and wood materials for industrial buildings]. Moscow; 1982. (In Russ.)
19. Labudin B.V. Raschet plitno-rebristyh konstrukcij s uprugo-podatlivymi svyazyami [Calculation of plate-ribbed structures with elastic-yielding bonds]. *Lesnoj zhurnal [Russian Forestry Journal]*. 1992;(1):67–72. (In Russ.)
20. Rimshin V.I., Labudin B.V., Melekhov V.I., Popov E.V., Roshchina S.I. Dowel and washer connections for elements of wooden structures. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2016;(9):35–50. (In Russ.)
21. Ageev S.P. Povyslenie energeticheskoy effektivnosti proizvodstva piloproductii [Increasing the energy efficiency of sawn timber production] (Abstract Dissertation of Doctor of Technical Sciences). Arkhangelsk; 2011. (In Russ.)
22. Rzhanicyn A.R. *Sostavnye sterzhni i plastinki [Composite rods and plates]*. Moscow: Stroyizdat Publ.; 1986. (In Russ.)
23. Labudin B.V., Popov E.V., Tyurikova T.V., Nikitina T.A., Ruslanova A.V. Experimental studies of the strength and rigidity of screw connections of covers with wooden ribs. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019;753(Chapter 3):042063. DOI:10.1088/1757-899X/753/4/042063.
24. Popov E.V., Tyurikova T.V., Polikarpov D.A., Tropina P.M., Labudin B.V., Melekhov V.I. Inzhenernyj raschet rebristyh derevokompozitnyh panelej s uprugodeformiruemyimi svyazyami [Engineering calculation of ribbed wood-composite panels with elastic-deformable bonds]. *Nauka segodnya. Teoreticheskie i prakticheskie aspekty [Science today. Theoretical and practical aspects]*: materials of the International scientific and practical conference. Vologda; 2016. p. 53–57. (In Russ.)