

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАТИВНОСТИ И НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СОСТАВНЫХ ДВУТАВРОВЫХ БАЛОК СО СТЕНКОЙ ИЗ ПРОФИЛИРОВАННОГО СТАЛЬНОГО ЛИСТА И ПОЯСАМИ ИЗ LVL

EXPERIMENTAL STUDY OF DEFORMABILITY AND BEARING CAPACITY OF COMPOSITE I-BEAMS WITH PROFILED STEEL SHEET WALL AND LAMINATED VENEER LUMBER BELTS

Приводятся основные аналитические зависимости, позволяющие оценивать несущую способность и деформативность составных металлодеревянных двутавровых балок со стенкой из стального профилированного листа и поясами из однонаправленного клееного шпона (LVL). Поставлена задача экспериментального определения модуля упругости фиктивной цельной балки, соответствующей рассматриваемой конструкции. По схеме четырехточечного изгиба испытана серия балок. На основе полученных данных были определены условный модуль упругости балки в целом и модуль упругости фиктивной цельной балки. Расхождение их значений составило менее 5 %, что позволяет сделать вывод о применимости полученных выражений для определения НДС.

Ключевые слова: деревянные конструкции, составные балки, податливые связи, напряженно-деформированное состояние.

The article presents the main analytical dependencies that allow evaluating the bearing capacity and deformability of composite I-beams with profiled steel sheet wall and laminated veneer lumber belts. There is set a task of experimental determination of the elasticity modulus of a fictitious solid beam corresponding to the design under consideration. A series of beams was tested according to the four-point bending scheme. Based on the data obtained, there has been determined the system modulus of elasticity of the beam as a whole, as well as the elasticity modulus of a fictitious solid beam. Herewith, the discrepancy between their values is less than 5 %, which allows concluding that the formulas obtained are applicable for determining the stress-strain state.

Keywords: timber structures, composite beams, yielding bracing, stress-strain state.

Введение

Двутавровые металлодеревянные балки со стенкой из стального профилированного листа и поясами из однонаправленного клееного шпона (LVL) применяются в качестве балок перекрытий и покрытий с пролетами до 15–18 м, элементов стропильных систем,

несущих элементов опалубки перекрытий. В сравнении с другими типами аналогичных по области применения и габаритам конструкций их основными преимуществами являются относительная легкость, малая материалоемкость, высокая сопротивляемость потере устойчивости плоской формы изгиба

благодаря складчатой форме стенки, а также высокая степень индустриальности производства таких балок. Однако общепринятых методов их расчета, в достаточной мере полно отражающих свойства конструкции, в том числе низкую жесткость стенки в направлении оси балки, податливость связей, разнородность применяемых материалов, в настоящий момент не разработано. Известный метод расчета по приведенному сечению в очень слабой мере отражает указанные особенности.

Целью исследования является разработка и экспериментальное подтверждение метода определения прогибов составных двутавровых балок со стенкой из профилированного стального листа и поясами из LVL, а также выявление характерных особенностей их разрушения для обоснования критериев наступления предельных состояний 1-й и 2-й групп, позволяющих проводить оценку несущей способности и деформативности конструкции.

Теоретические методы исследования

Работа двутавровых металлодеревянных балок со стенкой из стального профилированного листа и поясами из однонаправленного клееного шпона может быть описана на основе классической теории составных стержней [1–8] с уточнениями применительно к данному типу конструкций. Анализ дифференциального уравнения изгиба такой балки, проведенный на основе трехслойной стержневой модели (рис. 1) с учетом геометрических и упругих параметров ее элемен-

тов, а также упругих характеристик связей сдвига и отрыва между ними [6–11], позволил дать теоретическое обоснование необходимых поправок [12]. Конструкция работает в упругой стадии, а ее прогибы малы относительно основных размеров, объемными силами пренебрегаем. При этом для отдельных ветвей справедливы допущения [7, 12, 13]:

- в вертикальном направлении продольные слои балки не оказывают давление друг на друга;
- поперечные сечения, плоские до изгиба, остаются плоскими после изгиба и поворачиваются на некоторый угол.

Приняв модуль упругости стенки балки (стального профилированного листа) в направлении ее геометрической оси (т. е. поперек гофров) равным нулю, получим уравнение изгиба:

$$2E_c I_c \frac{d^4 z}{dx^4} - \frac{\eta I_S}{F_c} \frac{d^2 z}{dx^2} = \frac{\eta M}{E_S F_c} - \frac{d^2 M}{dx^2}, \quad (1)$$

где E_c — модуль упругости материала поясов, МПа; I_c — момент инерции пояса, мм⁴; η — экспериментальный коэффициент жесткости шва [7, 14], Н/мм²; I_S — момент инерции фиктивной цельной балки, мм⁴; F_c — площадь поперечного сечения пояса, мм²; M — изгибающий момент, Н×мм; E_S — модуль упругости фиктивной цельной балки, МПа.

Момент инерции фиктивной цельной балки определяется как

$$I_S = \frac{b_c h_c [h_c^2 + 3(h_c + h_w)^2]}{6}, \quad (2)$$

где b_c — ширина пояса, мм; h_c — высота (толщина) пояса, мм; h_w — высота стенки (в свету), мм.

При изгибе балки пояса и стенка стремятся к взаимному смещению вдоль геометрической оси конструкции, металлические зубья стенки, внедренные в материал поясов, изгибаются, а LVL сминается вдоль волокон [12, 15–18]. Прогибы существенно превышают прогибы аналогичной сплошной балки

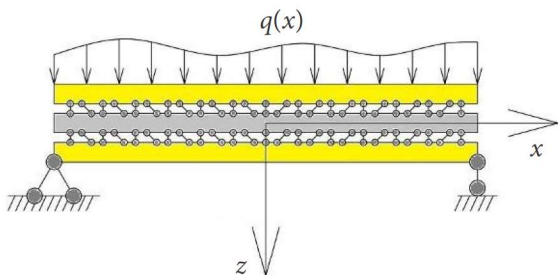


Рис. 1. Расчетная модель трехслойной составной балки

и определяются для случая равномерно распределенной нагрузки выражением

$$z(x) = \frac{5ql^4}{384E_S I_S} + \frac{qx^2(2x^2 - 3l^2)}{48E_S I_S} + \frac{qF_c}{I_S \eta} \left[1 - \frac{2E_c I_c}{E_S I_S} \right] \left[\frac{l^2}{8} - \frac{1}{\xi^2} \left[1 - \frac{ch\xi x}{ch \frac{\xi l}{2}} \right] - \frac{x^2}{2} \right], \quad (3)$$

где q — интенсивность распределенной нагрузки, Н/мм; l — пролет балки, мм; ξ — характеристика конструкции, вычисляемая по формуле

$$\xi = \sqrt{\frac{\eta I_S}{2E_c I_c F_c}}. \quad (4)$$

Для различных случаев решение уравнения (1) находится отдельно. В случае действия системы двух сил, приложенных в третях пролета

$$z(x) = \frac{P}{E_S I_S} \left(\frac{l^3}{48} + \frac{x^2}{4} \left[\frac{x}{3} - \frac{l}{2} \right] - \frac{1}{\xi^2} \left[x + \frac{l}{2} \right] + \frac{1}{\xi^3} \left[\frac{sh\xi \frac{l}{2}}{2ch\xi x} - sh\xi x \right] \right). \quad (5)$$

Модуль упругости фиктивной цельной балки E_S невозможно определить экспериментальным путем непосредственно, так как стандартные методики¹ не позволяют учесть податливость связей.

Таким образом, на основе экспериментальных данных может быть получено значение только условного модуля упругости балки в целом — E_{cb} . Данная величина не позволяет определять НДС элементов конструкции согласно разработанной теории. Тем не менее, уравнения (3) и (5) устанавливают взаимосвязь между прогибами и модулем упругости фиктивной цельной балки. Следовательно, на основании экспериментально определенных прогибов возможно определить величину модуля упругости фиктивной цельной балки.

В случае четырехточечного изгиба (рис. 2) формула его расчета будет

$$E_S = \frac{P}{z \left(\frac{l}{6} \right) I_S} \left(\frac{23l^3}{1296} - \frac{2l}{3\xi^2} + \frac{1}{\xi^3} \left[\frac{sh\xi \frac{l}{6}}{2ch\xi \frac{l}{6}} - sh\xi \frac{l}{6} \right] \right). \quad (6)$$

Экспериментальные методы исследования

Была испытана серия из трех шарнирно опертых однопролетных балок со следующими параметрами:

- длина — 3000 мм;
- пролет — 2700 мм;
- высота поперечного сечения — 320 мм;
- высота (толщина) поперечного сечения пояса — 60 мм;
- ширина поперечного сечения пояса — 120 мм;
- высота стенки — 200 мм;
- толщина стенки — 0,5 мм;
- материал поясов — однонаправленный клееный шпон (LVL);
- материал стенки — стальной профилированный лист S 550 GD+Z по DIN EN 10147 (глубина гофра — 15 мм) из стали С245;
- высота зубьев (глубина погружения в материал поясов) — 15 мм;
- шаг зубьев — 50 мм.

Испытания проводились по схеме четырехточечного (чистого) изгиба с нагружением в третях пролета (рис. 3). Прогибы конструкции определялись при помощи прогибомеров 6ПАО в середине и в третях пролета балки (П1, П2, П3). При помощи индикаторов перемещений часового типа регистрировалось обмятие поясов в опорных сечениях (ИЧ4, ИЧ5), а также взаимное смещение стенки и растянутого нижнего пояса в четырех сечениях (ИЧ1, ИЧ2, ИЧ3, ИЧ4). Эксперимент проведен на базе Центра механических испытаний строительных кон-

¹ Рекомендации по испытанию деревянных конструкций / ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко. М.: Стройиздат, 1976. 32 с.

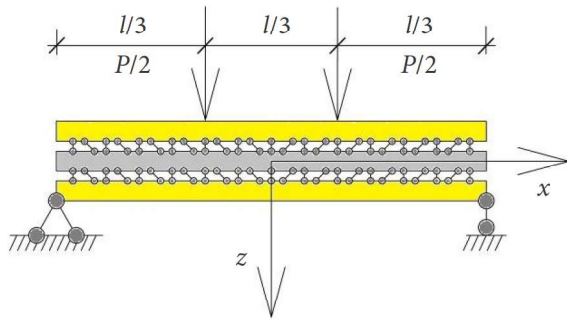


Рис. 2. Четырехточечный изгиб

струкций СПБГАСУ с применением в качестве нагружающего устройства универсальной гидравлической машины BISS 2500 кН.

Нагрузка прикладывалась ступенчато с шагом 3 кН со скоростью перемещения штока машины 2 мм/мин и с выдержкой 1 мин на каждой ступени. Испытания проводились до разрушения образца.

Результаты исследования и их анализ

Результаты испытаний трех металлодеревянных балок были подвергнуты статистической обработке на каждом уровне нагружения. Полученные средние значения по выборке представлены в таблице.

Диаграмма прогибов середины балки (по средним значениям) представлена на рис. 4. Переход в нелинейную область деформиро-

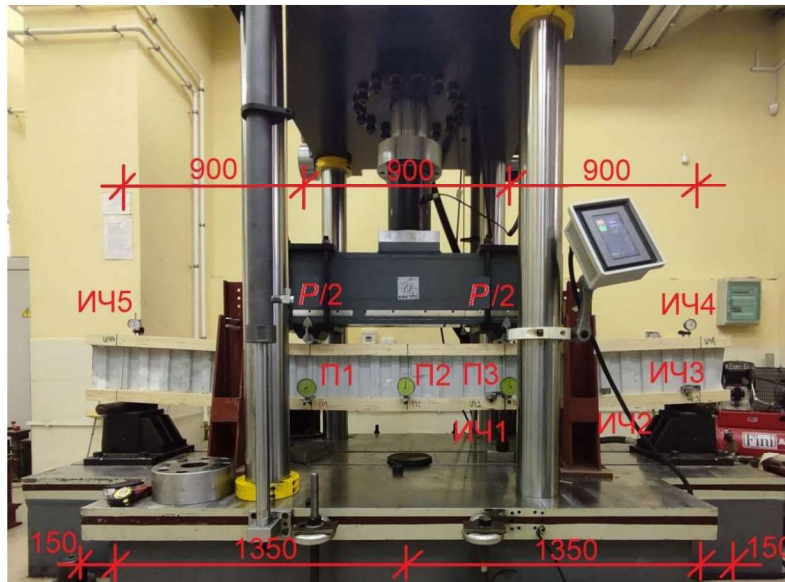


Рис. 3. Испытание металлодеревянной балки с гофрированной стенкой

Результаты испытаний (средние значения по выборке)

Нагрузка P, кН	Перемещения по индикатору, мм							
	П1	П2	П3	ИЧ1	ИЧ2	ИЧ3	ИЧ4	ИЧ5
3	0,43	0,46	0,01	0	0,01	0	0,05	0,13
6	0,56	0,94	0,91	0	0,02	0	0,12	0,28
9	1,56	1,94	1,88	0	0,05	0,01	0,22	0,52
12	2,995	3,26	3,385	0,01	0,06	0,07	0,47	0,66
15	4,745	5,01	5,055	0,02	0,07	0,33	0,81	0,88
18	8,04	8,5	7,33	0,04	0,08	0,79	1,16	1,08
21	10,79	11,41	9,93	0,05	0,11	1,25	1,55	1,29
24	15,725	17,01	14,295	0,07	0,15	1,94	1,98	1,59
27	32,71	24,4	20,51	0,11	0,18	3,49	2,41	2,23
30	51,715	46,23	47,375	0,24	0,54	5,08	2,69	3,3

вания балки сопровождается нелинейными смещениями в швах сплачивания стенки и поясов, т. е. нелинейным деформированием в зоне контакта изгибаемых металлических зубьев и сминаемого в гнезде LVL. Зависимость указанных смещений от сдвигающего усилия в шве была получена автором отдельно в соответствии с классическим подходом, описанным в [7, 14]. Коэффициент жесткости шва η для линейного участка равен 110 Н/мм^2 .

Согласно диаграмме на рис. 4 можно отметить:

- до 15,0 кН работа происходила в упругой стадии;
- при дальнейшем нарастании нагрузки стенка балки теряет местную устойчивость (рис. 5, а);
- дальнейшее деформирование сопровождается разрывом металла стенки, а также смятием LVL в гнезде зубчатого соединения (рис. 5, б);
- на финальных стадиях работы конструкции объем LVL нижнего пояса выкалывается между гофрами стенки (рис. 5, в);
- окончательное разрушение наступает с расслоением и разрывом материала нижнего пояса (рис. 5, г).

Проверка несущей способности составных двутавровых балок со стенкой из гофрированной стали и поясами из одно-

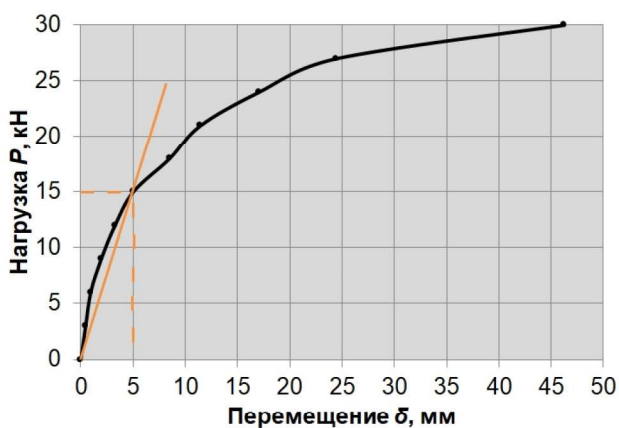


Рис. 4. Диаграмма прогибов балки

направленного клееного шпона выполняется с учетом следующих критериев наступления предельных состояний 1-й и 2-й групп:

- потеря прочности верхнего (сжатого) пояса по нормальным напряжениям;
- потеря устойчивости верхнего (сжатого) пояса;
- потеря прочности нижнего (растянутого) пояса по нормальным напряжениям;
- потеря прочности стенки на срез (по касательным напряжениям);
- потеря устойчивости плоской формы деформирования балки;
- потеря местной устойчивости стенки;
- потеря несущей способности швов сплачивания элементов на срез (по касательным напряжениям);
- потеря прочности нижнего пояса в опорных зонах от смятия поперек волокон из плоскости слоев шпона;
- превышение максимального допустимого прогиба.

На основе полученных данных был определен условный модуль упругости балки в целом — E_{cb} . Расчет выполнялся по средним данным прогибомеров (П1 и П3) в зоне упругой работы по формуле

$$E_{cb} = \frac{a l_{\Pi}^2 (P_2 - P_1)}{16 I_S (z_2 - z_1)}, \quad (7)$$

где a — расстояние от точки приложения нагрузки до ближайшей опоры, мм; l_{Π} — расстояние между прогибомерами, мм; P_1, P_2 — наименьшее и наибольшее значение нагрузки на участке, Н; z_1, z_2 — наименьшее и наибольшее значение прогибов на участке, мм.

Выводы

В результате проведенного исследования разработан и экспериментально подтвержден метод определения прогибов составных двутавровых балок со стенкой из профилированного стального листа и поясами из LVL; выявлены характерные особенности их разрушения, что позволило обосновать критерии наступления предельных состояний 1-й и 2-й групп, позволяющие производить



Рис. 5. Разрушение балки: а — потеря местной устойчивости стенки; б — разрыв стенки; в — выкалывание LVL между гофрами стенки; г — разрыв LVL нижнего пояса

оценку несущей способности и деформативности конструкции.

Определено, что разрушение двутавровых балок носило пластический характер и происходило вследствие разрыва или смятия гофрированной стенки на участках с наибольшими касательными напряжениями в сжатой или растянутой зоне. Определена средняя разрушающая нагрузка при статических испытаниях: 30,0 кН, несущая способность составила 15 кН. Расчет условного модуля упругости балки по формуле (7) дает значение $4710,0 \pm 5,0$ МПа при $P_1 = 3$ кН и $P_2 = 15$ кН. Значение модуля упругости фиктивной балки E_s по формуле (6) для выбранной конструкции ($I_s = 247\,680\,000$ мм⁴, $\xi = 0,0089$ мм⁻¹) получается равным 4945,1 МПа. Таким образом, отношение условного модуля упругости балки в целом E_{eb} к модулю упругости фиктивной балки E_s составляет в среднем 0,95, что сви-

детельствует о корректности разработанной теории изгиба составных двутавровых балок со стенкой из стального профилированного листа и поясами из LVL.

Библиографический список

1. Коченов В. М. Несущая способность элементов и соединений деревянных конструкций. М.: Гос. изд-во литер. по строит. и архит., 1953. 320 с.
2. Коваль П. С. Несущая способность и деформативность предварительно напряженных многослойных деревоплит при изгибе: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2021. 266 с.
3. Карельский А. В. Технология изготовления составных деревянных конструкций с металлическими зубчатыми пластинами: дис. ... канд. техн. наук. Архангельск, 2015. 138 с.
4. Серов Е. Н. Развитие клееных деревянных конструкций. Проблемы и воззрения. СПб.: СПбГАСУ, 2015. 151 с.
5. Серов Е. Н., Серова Т. А., Миронова С. И. Реставрация деревянных конструкций в зданиях и сооружениях. СПб.: СПбГАСУ, 2018. 409 с.

6. Пleshkov П. Ф. Теория расчета деревянных составных стержней. Л.; М.: Гос. изд-во литер. по строит. иarchit., 1952. 195 с.

7. Ржаницын А. Р. Теория составных стержней строительных конструкций. М.: Стройиздат, 1948. 192 с.

8. Ржаницын А. Р. Составные стержни и пластинки. М.: Стройиздат, 1986. 314 с.

9. Власов В. З. Тонкостенные упругие стержни. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Физматгиз, 1959. 568 с.

10. Власов В. З. Избранные труды. Т. III. Тонкостенные пространственные системы. М.: Наука, 1964. 472 с.

11. Милейковский И. Е. Расчет составных стержней методами строительной механики оболочек // Экспериментальные и теоретические исследования тонкостенных пространственных конструкций: сб. ст.; под ред. В. З. Власова. М.: Гос. изд-во литер. по строит. иarchit., 1952. 239 с. С. 131–167.

12. Коваль П. С., Черных А. Г., Данилов Е. В., Клёван В. И., Белов В. В. О работе составных двутавровых балок со стенкой из профилированного стального листа и поясами из однонаправленного клееного шпона // Вестник гражданских инженеров. 2022. № 6 (95). С. 5–9.

13. Тимошенко С. П. Устойчивость упругих систем. Изд. 2-е / пер. с англ. И. К. Снитко. М.: Гостехиздат, 1955. 568 с.

14. Коваль П. С., Данилов Е. В., Казакевич Т. Н. Исследование работы предварительно напряженных многослойных деревоплит при изгибе // Материалы 11-й Междунар. науч.-практ. конф. «Инновации в деревянном строительстве», Санкт-Петербург, 22–23 апреля 2021 г. СПб.: СПбГАСУ, 2021. С. 130–139.

15. Данилов Е. В. Развитие методов расчета соединений деревянных конструкций из однонаправленного клееного бруса с когтевыми шайбами: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2019. 186 с.

16. Черных А. Г., Григорьев К. С., Коваль П. С., Данилов Е. В., Бакрышева В. В., Кашапов И. Т. К вопросу определения несущей способности нагельных соединений в конструкциях из бруса, клееного из однонаправленного шпона (LVL) // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 4. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=6643>.

17. Данилов Е. В. Определение линейной жесткости нагельных соединений с когтевыми шайбами в брус LVL // Вестник гражданских инженеров. 2017. № 2 (61). С. 81–85.

18. Данилов Е. В. Исследование кратковременной прочности LVL при смятии треугольным штампом // Вестник гражданских инженеров. 2014. № 1 (42). С. 28–33.

References

1. Kochenov V. M. *Nesushchaya sposobnost' elementov i soedineniy derevyannykh konstruksiy* [Bearing capacity of elements and connections of wooden structures]. Moscow, Gosudarstvennoe izdatel'stvo literatury po stroitel'stvu i arkhitekture Publ., 1953, 320 p.

2. Koval' P. S. *Nesushchaya sposobnost' i deformativnost' predvaritel'no napryazhennykh mnogosloynnykh derevoplit pri izgibe*. Diss. kand. tekhn. nauk [Bearing capacity and deformability of pre-stressed multilayer wood-plates at bending. PhD in Sci. Tech. diss]. St. Petersburg, 2021, 266 p.

3. Karel'skiy A. V. *Tekhnologiya izgotovleniya sostavnykh derevyannykh konstruksiy s metallicheskimy zubchatymi plastinami*. Diss. kand. tekhn. nauk [Manufacturing technology of composite wooden structures with metal toothed plates. PhD in Sci. Tech. diss]. Arkhangel'sk, 2015, 138 p.

4. Serov E. N. *Razvitiye kleennykh derevyannykh konstruksiy* [Development of glued wooden structures]. *Problemy i vozzreniya* [In: Problems and views]. St. Petersburg, SPbGASU Publ., 2015, 151 p.

5. Serov E. N., Serova T. A., Mironova S. I. *Restavratsiya derevyannykh konstruksiy v zdaniyakh i sooruzheniyakh* [Restoration of wooden designs in buildings and structures]. St. Petersburg, SPbGASU Publ., 2018, 409 p.

6. Pleshkov P. F. *Teoriya rascheta derevyannykh sostavnykh sterzhney* [Theory of calculation of wooden composite rods]. Leningrad, Moscow, Gos. izd-vo literatury po stroitel'stvu i arkhitekture Publ., 1952, 195 p.

7. Rzhantsyn A. R. *Teoriya sostavnykh sterzhney stroitel'nykh konstruksiy* [Theory of composite rods of building structures]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1948, 192 p.

8. Rzhantsyn A. R. *Sostavnye sterzhni i plastinki* [Composite rods and plates]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1986, 314 p.

9. Vlasov V. Z. *Tonkostennyye uprugie sterzhni* [Thin-walled elastic rods]. 2-nd ed., revised. Moscow, Fizmatgiz Publ., 1959, 568 p.

10. Vlasov V. Z. *Izbrannyye trudy. T. III. Tonkostennyye prostranstvennyye sistemy* [Selected works. Vol. 3. Thin-walled spatial systems]. Moscow, Nauka Publ., 1964, 472 p.

11. Mileykovskiy I. E. *Raschet sostavnykh sterzhney metodami stroitel'noy mekhaniki obolochek* [Calculation of composite rods by methods of structural mechanics of shells]. *Sb. st. «Eksperimental'nye i teoreticheskie issledovaniya tonkostennykh prostranstvennykh konstruksiy»* [In: Coll. works "Experimental and theoretical studies of thin-walled spatial structures"]. Ed. by Vlasov V. Z. Moscow, Gos. izd-vo literatury po stroitel'stvu i arkhitekture Publ., 1952, 239 p., pp. 131–167.

12. Koval' P. S., et al. *O rabote sostavnykh dvutavrovnykh balok so stenкой iz profilirovannogo stal'nogo lista i poyasami iz odnonapravlennoogo kleenogo shpona* [Regarding the performance of composite metal and timber I-beams with a wall of corrugated steel sheet and belts of laminated veneer lumber]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2022, no. 6 (95), pp. 5–9.

13. Timoshenko S. P. *Ustoychivost' uprugikh sistem* [Stability of elastic systems]. 2-nd ed. Transl. from English by Snitko I. K. Moscow, Gostekhizdat Publ., 1955, 568 p.

14. Koval' P. S., Danilov E. V., Kazakevich T. N. *Issledovanie raboty predvaritel'no napryazhennykh mnogosloynnykh derevoplit pri izgibe* [Investigation of the performance of pre-stressed multi-layer wooden plates at bending]. *Trudy 11-y Mezhdunar. nauch.-prakt.konf. «Innovatsii v derevyannom stroitel'stve», St. Petersburg, 22–23 aprelya 2021 g.* [Proceedings of the 11-th International scientific-practical conference. "Innovations in wooden construction", St. Petersburg, April 22–23, 2021]. St. Petersburg, SPbGASU Publ., 2021, pp. 130–139.

15. Danilov E. V. *Razvitie metodov rascheta soedineniy derevyannykh konstruksiy iz odnonapravlennoogo kleenogo brusa s kogtevyimi shaybami. Diss. kand. tekhn. nauk* [Development of methods of calculation of connections

of wooden structures from unidirectional glued bar with claw washers. PhD in Sci. Tech. diss]. St. Petersburg, 2019, 186 p.

16. Chernykh A. G., et al. *K voprosu opredeleniya nesushchey sposobnosti nagel'nykh soedineniy v konstruksiyakh iz brusa, kleenogo iz odnonapravlennoogo shpona (LVL)* [On the issue of determining the bearing capacity of brazing joints in structures made of wood glued from unidirectional veneer (LVL)]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya – Modern problems of science and education*, 2012, no. 4. Available at: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=6643>.

17. Danilov E. V. *Opredelenie lineynoy zhestkosti nagel'nykh soedineniy s kogtevyimi shaybami v bruse LVL* [Determination of linear stiffness of dowel joints with claw rings in the LVL beam]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2017, no. 2 (61), pp. 81–85.

18. Danilov E. V. *Issledovanie kratkovremennoy prochnosti LVL pri smyatii treugol'nyim shtampom* [Research of the short-term strength of LVL in compression by a triangular plate]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2014, no. 1 (42), pp. 28–33.