

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Строительные конструкции

УДК 691

DOI 10.23968/1999-5571-2025-22-6-5-12

© Е. В. Данилов, канд. техн. наук, доцент

© E. V. Danilov, PhD in Sci. Tech., Associate Professor

© Е. В. Котова, аспирант

© E. V. Kotova, post-graduate student

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

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

E-mail: sleepme@mail.ru, elizaveta-kotova_2000@mail.ru

E-mail: sleepme@mail.ru, elizaveta-kotova_2000@mail.ru

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ КРУЖАЛЬНЫХ LVL-КОНСТРУКЦИЙ

NUMERICAL ANALYSIS OF THE LOAD BEARING CAPACITY OF CENTERING LVL-STRUCTURES

Представлен численный анализ несущей способности криволинейных элементов кружальных LVL-конструкций. Работа направлена на разработку и верификацию эффективных численных моделей, позволяющих точно предсказывать поведение таких конструкций под воздействием различных нагрузок. Особое внимание в исследовании уделено учету анизотропных и неоднородных свойств LVL-материала, а также влиянию геометрических характеристик на несущую способность кружальных конструкций. Применение современных методов численного моделирования, таких как метод конечных элементов, позволит детально проанализировать поведение конструкций в различных эксплуатационных условиях. Полученные результаты сопоставлены с требованиями действующих нормативных документов. Исследование направлено на оптимизацию проектных решений, повышение надежности и обеспечение безопасности LVL-конструкций, а также на достижение экономической эффективности.

Ключевые слова: кружальные конструкции, LVL, метод конечных элементов, напряженно-деформированное состояние.

The article presents a numerical analysis of the load-bearing capacity of curved elements of LVL centering structures. The study aims at developing and verifying effective numerical models that can accurately predict the behavior of such structures under various loads. The study focuses on accounting for the anisotropic and heterogeneous properties of LVL material, as well as on the impact of geometric characteristics on the load-bearing capacity of centering structures. The use of modern numerical modeling methods, such as the finite element method, will allow for a detailed analysis of the behavior of structures under various operating conditions. The results obtained were compared with the requirements of the current regulatory documents. The study is aimed at optimizing design solutions, improving the reliability and ensuring safety of LVL structures, as well as achieving the cost-effectiveness.

Keywords: centering structures, LVL, finite element method, stress-strain state.

Введение

Кружальные конструкции из древесины традиционно находят широкое применение в строительстве и промышленности благодаря возможности формирования цельной конструкции сложных форм из отдельных элементов более упрощенной геометрии,

сопрягаемых, как правило, на механических связях, за счет чего оптимизируется процесс доставки и монтажа. Применение материала LVL в таких конструкциях позволяет снижать итоговый вес, а в криволинейных конструкциях малых радиусов — обеспечивать конкурентное преимущество

в сравнении с клееными деревянными конструкциями [1]. Однако оценка несущей способности кружальных LVL-конструкций представляет собой актуальную научно-практическую задачу в связи с выраженной анизотропией и неоднородностью материала, а также чувствительностью криволинейных элементов к геометрическим несовершенствам и локальным концентрациям напряжений.

В современных условиях численные методы анализа, в частности метод конечных элементов (МКЭ), являются эффективным инструментом для исследования напряженно-деформированного состояния и оценки прочности деревянных конструкций [2, 3]. Применение адекватных численных моделей, учитывающих реальные физико-механические свойства LVL, и в особенности геометрии элементов, позволяет повысить точность инженерных расчетов и обоснованность проектных решений.

Настоящая работа направлена на проведение численного анализа НДС криволинейных элементов кружальных конструкций из LVL с учетом физико-механических свойств материала и влияния геометрических факторов.

Целью работы является исследование НДС криволинейных LVL-конструкций в зависимости от радиуса кривизны и угла расположения волокон элементов.

Методика проведения исследования

Для оценки напряженно-деформированного состояния криволинейных LVL-конструкций была проведена серия численных экспериментов с использованием МКЭ. Расчеты выполнялись в программном комплексе *SCAD Office*.

Исследуемые параметры при постоянной ширине и высоте сечения ($b = 39$ мм, $h = 100$ мм):

- угол наклона волокон относительно оси элемента ($\alpha = 0^\circ, 6^\circ, 15^\circ, 45^\circ, 90^\circ$);
- радиус кривизны арки ($R = 1000, 1500, 2000$ мм);
- ориентация слоев в материале.

Геометрическая модель криволинейных элементов представляла собой дугу окружности, закрепленную шарнирно по концам. Длина изменялась в зависимости от радиуса кривизны, обеспечивая корректное моделирование геометрических условий напряженного состояния.

Материал моделировался как ортотропный с учетом анизотропных свойств LVL (тип II) по направлениям вдоль волокон, поперек волокон и в плоскости, перпендикулярной к ним¹ [4]. Для каждого направления были заданы соответствующие модули

¹ ЛВЛ — композиционный материал из древесного шпона, волокна которого в основном ориентированы в одном и том же направлении // ГОСТ 33124–2021. Брус многослойный клееный из шпона. Технические условия. М.: АО «НИЦ "Строительство"», 2021. 17 с.

Модуль упругости в направлении X_1	<input type="text" value="10000000"/>	кН/м ²	Коеф. линейного расширения α_x	<input type="text" value="1,2e-005"/>	1/°C
Модуль упругости в направлении Y_1	<input type="text" value="404999,96"/>	кН/м ²	Коеф. линейного расширения α_y	<input type="text" value="1,2e-005"/>	1/°C
Кoeffициенты Пуассона					
ν_{xy}	<input type="text" value="0,02"/>				
ν_{yx}	<input type="text" value="0,02"/>				
Модуль сдвига G_{xy}		<input type="text" value="600000"/>	кН/м ²		

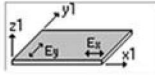


Рис. 1. Входные параметры для проведения численного исследования

упругости ($E_x = 10\,000$ МПа, $E_y = 400$ МПа), коэффициенты Пуассона ($\nu_{xy} = \nu_{yx} = 0,018$) и модуль сдвига ($G_{xy} = 600$ МПа) (рис. 1). Упругие характеристики материала принимались на основе экспериментальных данных [5, 6].

Сетка конечных элементов формировалась с использованием четырехузловых пластинчатых элементов. Размер элемента выбирался адаптивно, на основе критерия чувствительности к результирующим напряжениям.

Нагрузка моделировалась в виде сосредоточенной узловой нагрузки (суммарно 4,5 кН), направленной вертикально вниз и приложенной по середине пролета рассматриваемого элемента [7, 8]. Условия закрепления и характер приложения нагрузки представлены на рис. 2.

В рамках численного эксперимента анализировались следующие параметры:

- максимальные нормальные напряжения (σ_x, σ_y);

- прогибы в средней точке пролета;
- распределение напряжений по сечению.

Особое внимание уделялось сравнению результатов при различной ориентации волокон и слоев, так как изменение угла наклона существенно влияет на жесткостные характеристики и перераспределение напряжений в арке. Рассматривался материал с двумя типами ориентации слоев:

- слой А — с параллельным,
- слой Б — с поперечным расположением слоев материала.

Очередность расположения поперечных слоев в рассматриваемом *LVL Ultralam X* выделена красным цветом на рис. 3.

Для каждого слоя задавались ортотропные свойства LVL-материала. Также анализировалось влияние радиуса кривизны на характер деформации и уровень возникающих напряжений в каждом слое. Полученные результаты были сопоставлены с преде-

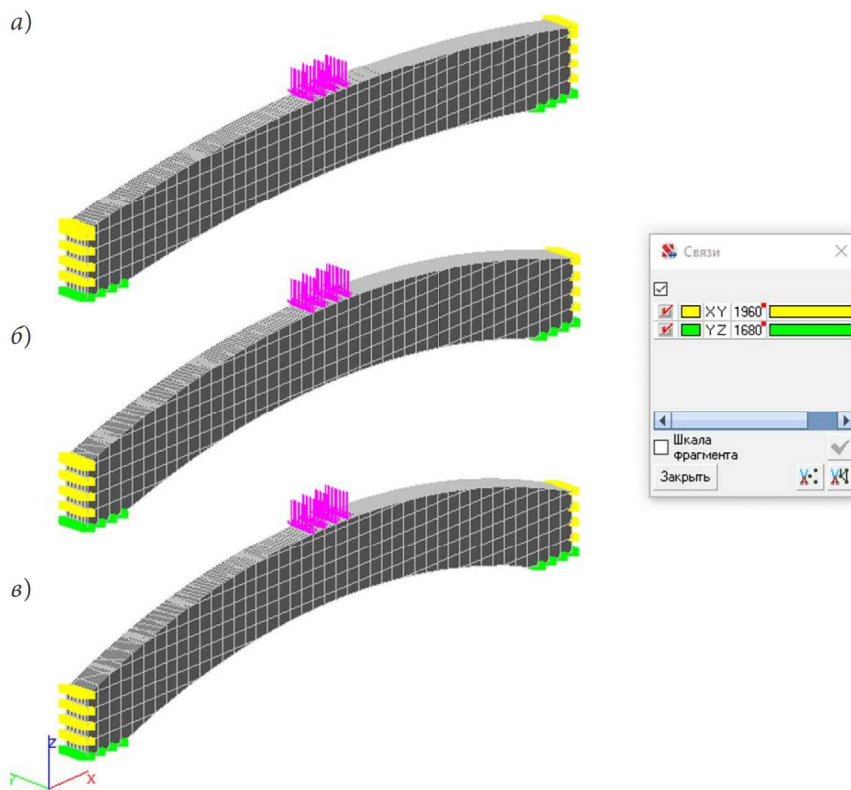


Рис. 2. Граничные условия и загрузка криволинейных элементов с различным радиусом кривизны: а — 2000 мм; б — 1500 мм; в — 1000 мм

Схема расположения слоев шпона типов X и I

Толщина материала, мм	Число слоев	Число поперечных слоев	Расположение слоев
19	7	2 или 3	— — или — — —
21	7	2	— — или — —
27	9	2	— — —
33	11	2	— — — —
39	13	2	— — — — —
45	15	4	— — — — —
51	17	3	— — — — —
57	19	4	— — — — — —
60	20	4	— — — — — —
63	21	5	— — — — — —
69	23	5	— — — — — — —
75	25	5	— — — — — — — —
90	30	4	— — — — — — — — —
100	33	5	— — — — — — — — —
106	35	5	— — — — — — — — — —

Примечания:
 «+» — параллельное расположение слоев; «-» — поперечное расположение слоев.
 Материал Ультралам I может иметь все слои шпона с параллельным расположением.
 В случае необходимости для толщин 19—45 мм может быть введен дополнительный слой шпона.

Рис. 3. Очередность расположения поперечных слоев в рассматриваемом LVL

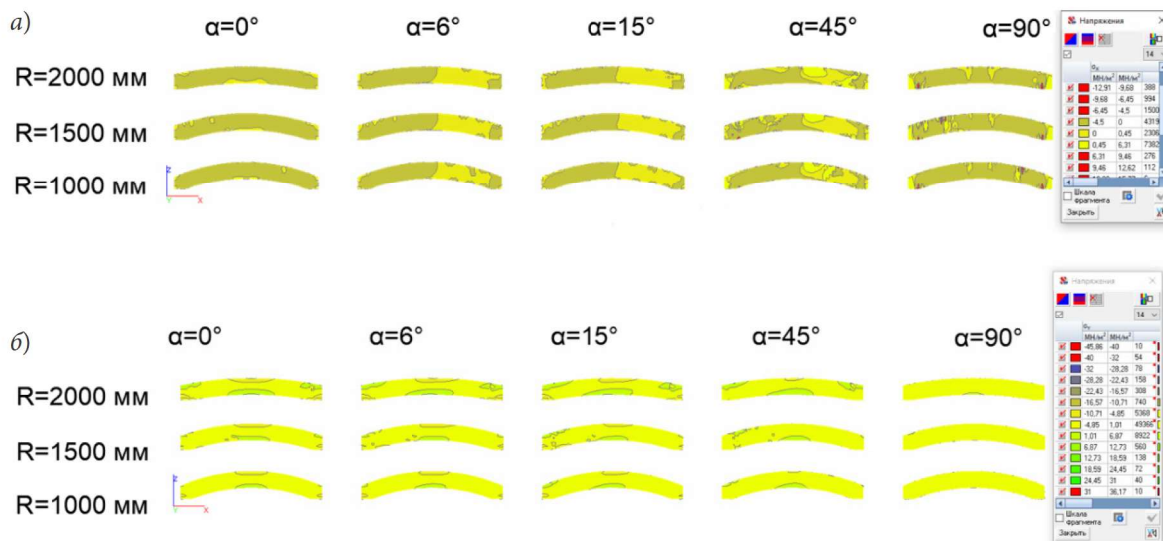


Рис. 4. Схемы распределения напряжений слоев А в криволинейной арке из LVL: а — напряжения σ_x ; б — напряжения σ_y

лами прочности материала LVL при растяжении поперек волокон, что позволило выявить наиболее уязвимые сочетания параметров.

Результаты численного исследования

В ходе численного эксперимента были получены детализированные поля распределения напряжений, отражающие особенности работы конструкции при различных комби-

нациях геометрических и материаловедческих параметров. При оценке особое внимание уделялось наиболее напряженным областям элемента с учетом влияния граничных условий на результат. Схема распределения напряжений показана на рис. 4–5, где R — радиус кривизны арки, α — угол наклона волокон.

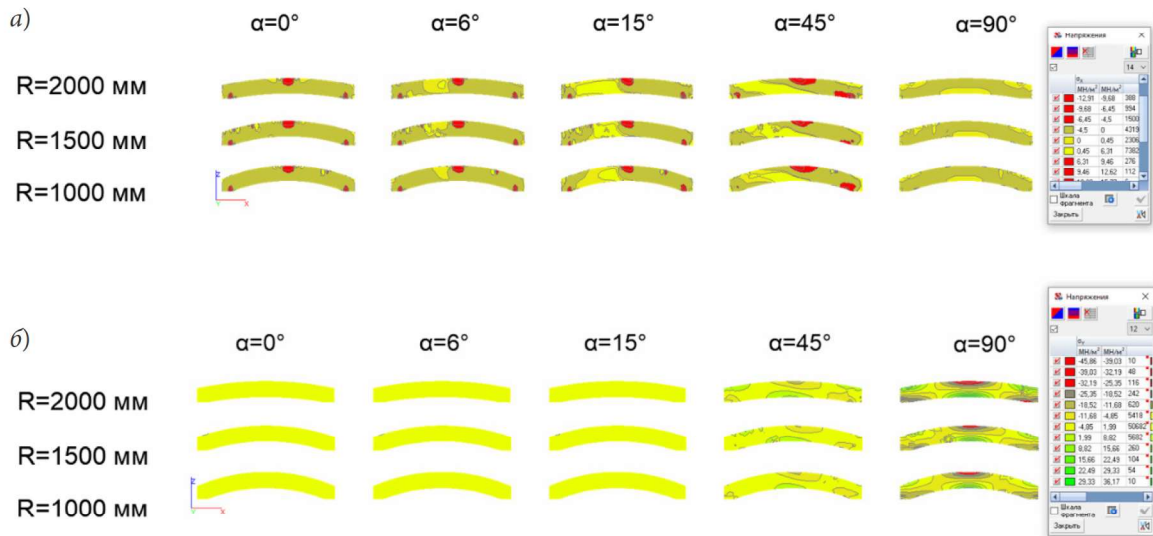


Рис. 5. Схемы распределения напряжений слоев Б в криволинейной арке из LVL: а — напряжения σ_x ; б — напряжения σ_y

Слой А

Напряжения σ_x max, МПа					
Радиусы кривизны R, мм	Угол наклона волокон, градус				
	0	6	15	45	90
1000	0,03	0,11	0,39	1,17	5,47
1500	0,04	0,12	0,34	1,20	5,38
2000	0,05	0,15	0,39	1,57	5,29

Напряжения σ_y max, МПа					
Радиусы кривизны R, мм	Угол наклона волокон, градус				
	0	6	15	45	90
1000	4,61	4,41	3,88	3,00	0,84
1500	5,95	5,63	4,82	3,38	0,99
2000	7,57	7,31	6,57	4,86	1,33

Напряжения σ_x min, МПа					
Радиусы кривизны R, мм	Угол наклона волокон, градус				
	0	6	15	45	90
1000	-0,40	-0,42	-0,55	-5,26	-7,87
1500	-0,42	-0,47	-0,55	-4,51	-6,41
2000	-0,47	-0,51	-0,56	-1,07	-2,09

Напряжения σ_y min, МПа					
Радиусы кривизны R, мм	Угол наклона волокон, градус				
	0	6	15	45	90
1000	-8,94	-8,89	-8,22	-5,29	-1,45
1500	-7,91	-7,64	-6,78	-4,34	-1,24
2000	-9,71	-9,34	-8,95	-6,30	-1,64

Рис. 6. Максимальные и минимальные напряжения относительно осей x и y для слоев А

Слой Б

Напряжения σ_x max, МПа					
Радиусы кривизны R, мм	Угол наклона волокон, градус				
	0	6	15	45	90
1000	1,17	0,34	1,02	2,82	0,18
1500	0,5	0,58	0,93	3,15	0,22
2000	0,8	0,78	1,47	5,07	0,29

Напряжения σ_y max, МПа					
Радиусы кривизны R, мм	Угол наклона волокон, градус				
	0	6	15	45	90
1000	0,18	0,26	0,69	5,88	20,91
1500	0,24	0,33	0,94	6,48	24,25
2000	0,30	0,42	1,16	10,26	40,07

Напряжения σ_x min, МПа					
Радиусы кривизны R, мм	Угол наклона волокон, градус				
	0	6	15	45	90
1000	-9,81	-9,94	-10,27	-10,03	-0,40
1500	-8,82	-9,00	-9,30	-9,02	-0,35
2000	-9,55	-9,54	-10,31	-11,02	-0,44

Напряжения σ_y min, МПа					
Радиусы кривизны R, мм	Угол наклона волокон, градус				
	0	6	15	45	90
1000	-0,45	-0,71	-2,20	-15,32	-35,53
1500	-0,39	-0,42	-1,99	-12,68	-30,34
2000	-0,47	-0,68	-2,33	-16,25	-32,99

Рис. 7. Максимальные и минимальные напряжения относительно осей x и y для слоев Б

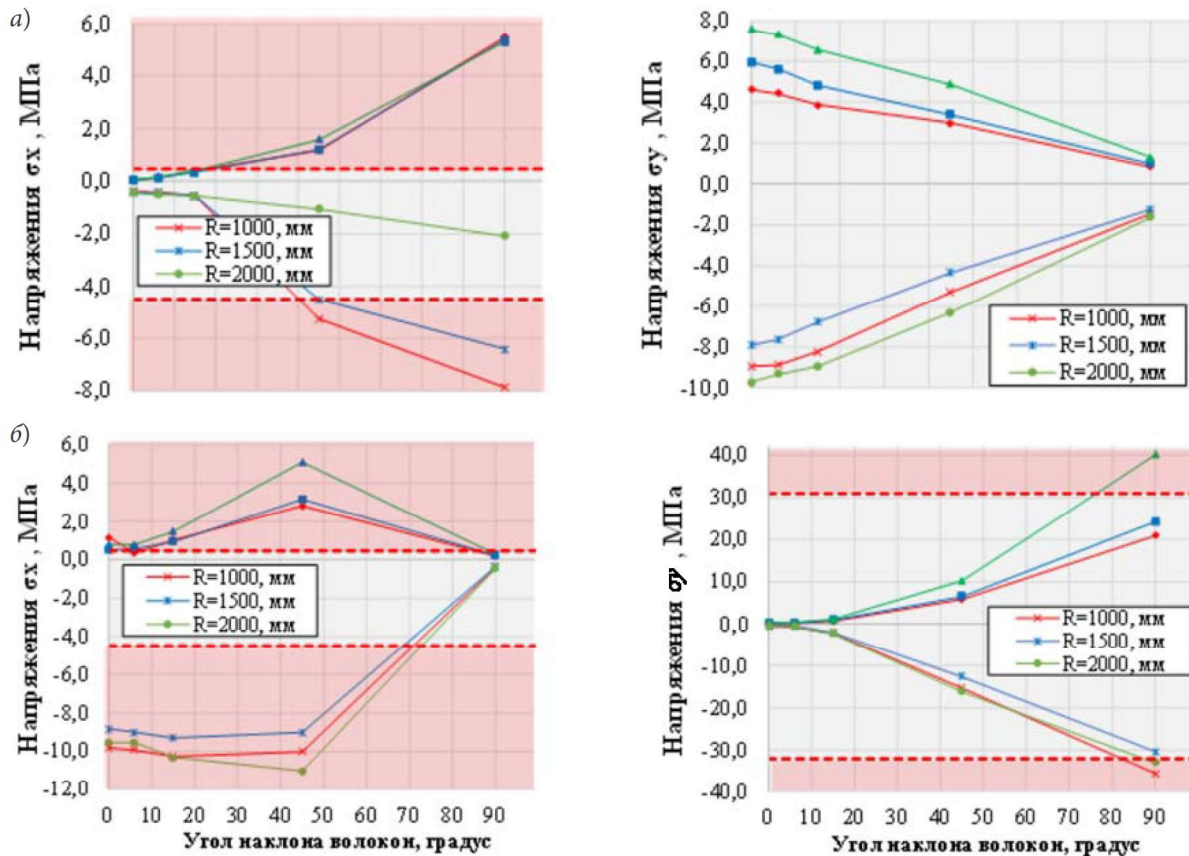


Рис. 8. Напряжения σ_x, σ_y ; а — слоя А; б — слоя Б

Полученные результаты были сопоставлены с нормативными значениями предельно допустимых напряжений для LVL-материала типа II:

- при растяжении σ_x^+ поперек волокон (0,45 МПа);
- растяжении вдоль волокон σ_y^+ (31 МПа);
- сжатии поперек волокон σ_x^- (4,8 МПа);
- сжатии вдоль волокон σ_y^- (32 МПа).

Результаты определенных максимальных напряжений представлены на рис. 6–7. Значения вблизи неравномерного градиента напряжений у опорных зон не учитывались, так как, по мнению авторов, наиболее показательными в данном исследовании являются значения в срединных зонах пролета элемента.

Значения, превышающие предел прочности, выделены красным цветом и указывают на наличие опасных участков, в особенности в зоне растягивающих напряжений, потен-

циально подверженных хрупкому разрушению при эксплуатации при заданном уровне нагрузки.

Анализ результатов численного исследования

Полученные данные свидетельствуют о сложном характере распределения напряжений. Картины изменения градиентов напряжений отражают перераспределение внутренних усилий, приводящее к наибольшему включению в работу того слоя, свойства которого обладают большей упругостью в направлении главных осей напряжений элемента.

Принятая нагрузка в 4,5 кН для рассчитываемого элемента создает спектр напряжений, при котором можно оценить некоторое влияние изменения радиуса кривизны от $R = 1$ м до 2 м на картину изменения напряжений при всех углах наклона волокон относительно длины элемента. Прослежи-

вались снижения напряжений при увеличении радиуса кривизны элемента в диапазоне 3–25 %.

Угол наклона волокон относительно длины элемента существенно влияет на уровень напряжений в элементе. Для слоев А прослеживается зависимость роста напряжений σ_x и снижение σ_y при увеличении угла наклона от 0 до 90°. Для слоев Б прослеживается зависимость роста напряжений σ_x при увеличении угла наклона от 0 до 45°. При увеличении угла от 45 до 90° прослеживается снижение напряжений σ_x . Напряжения σ_y возрастают при увеличении угла наклона от 0 до 90° (рис. 8).

Основные сценарии разрушения возникают при достижении опасных уровней напряжения при растяжении поперек волокон. Однако для случая, когда поперечные слои (Б) направлены вдоль длины элемента ($\alpha = 90^\circ$), основная доля нагрузки воспринимается волокнами данных слоев, но, учитывая их малое количество (два из 14 слоев, что составляет 14 %), напряжения приближаются к опасным значениям даже при сжатии и растяжении вдоль волокон, что на порядок больше значений поперек волокон.

Также можно предположить, что в рассматриваемом исследовании при отсутствии поперечных слоев Б при заданном уровне нагрузки в 4,5 кН уровни напряжения были бы больше найденных значений.

Вывод

Таким образом, в результате проведенного численного исследования криволинейных LVL-образцов при сосредоточенной нагрузке и при различных геометрических параметрах можно сделать вывод о важности поперечных слоев Б, которые активно включаются в работу, снижая напряжения растяжения поперек волокон. Увеличение радиуса кривизны снижает напряжения на величину в диапазоне 3–25 %, что необходимо учитывать при проектировании кружальных конструкций. Для применения материала LVL в кружальных

конструкциях обоснованно использовать элементы с наибольшим радиусом и количеством поперечных слоев выше 14 %, например, элементы толщиной 45 мм (16 слоев, четыре из которых с поперечным расположением волокон, что составляет 25 %).

Библиографический список

1. Темнов В. Г., Лебедев Ю. С. Пространственные конструктивные системы бионического типа: опыт применения в строительстве. Л.: ЛДНТП, 1980. 26 с.
2. Шмидт А. Б. Исследование работы криволинейных участков большой кривизны в клеевых деревянных конструкциях: автореф. ... дис. канд. техн. наук. Л., 1980. 23 с.
3. Юлдашев А. Х. Особенности работы клееных деревянных конструкций в условиях чистого изгиба // Вопросы науки и образования. 2018. № 8 (20). С. 164–166.
4. Папулова И. Е. Механические свойства и испытания древесины. Киров: ВятГУ, 2014. 85 с.
5. Леонтьев Н. Л. Техника испытаний древесины. М.: Лесная промышленность, 1970. 160 с.
6. Дмитриев И. К. Экспериментальное исследование арочной гирлянды // Промышленное и гражданское строительство. 2014. № 10. С. 58–61.
7. Дмитриев И. К. Исследование работы стержневантовой гирлянды // Промышленное и гражданское строительство. 2010. № 11. С. 68–70.
8. Дмитриев И. К. Исследование работы традиционной кружальной арки с вариантом ее усиления // Строительство и реконструкция. 2020. № 4 (90). С. 29–37.

References

1. Temnov V. G., Lebedev Yu. S. *Prostranstvennyye konstruktivnyye sistemy bionicheskogo tipa: opyt primeneniya v stroitel'stve* [Spatial structural systems of the bionic type: experience in construction]. Leningrad, LDNTP Publ., 1980, 26 p.
2. Shmidt A. B. *Issledovanie raboty krivolinyeynykh uchastkov bol'shoy krivizny v kleevykh derevyannykh konstruktsiyakh. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk* [Study of the work of curved sections of high curvature in glued wooden structures. Author's thesis of PhD in Sci. Tech. diss.]. Leningrad, 1980, 23 p.
3. Yuldashev A. Kh. *Osobennosti raboty kleenykh derevyannykh konstruktsiy v usloviyakh chistogo izgiba* [Features of the work of glued wooden structures in conditions of pure bending]. *Voprosy nauki i obrazovaniya – Science and Education Issues*, 2018, no. 8 (20), pp. 164–166.

4. Papulova I. E. *Mekhanicheskie svoystva i ispytaniya drevesiny* [Mechanical properties and tests of wood]. Kirov, VyatGU Publ., 2014, 85 p.

5. Leont'ev N. L. *Tekhnika ispytaniy drevesiny* [Wood testing technique]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1970, 160 p.

6. Dmitriev I. K. *Eksperimental'noe issledovanie arochnoy girlyandy* [Experimental study of the arch garland]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo – Industrial and Civil Construction*, 2014, no. 10, pp. 58–61.

7. Dmitriev I. K. *Issledovanie raboty sterzhne-vantovoy girlyandy* [Study of the work of the rod-cable garland]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo – Industrial and Civil Construction*, 2010, no. 11, pp. 68–70.

8. Dmitriev I. K. *Issledovanie raboty traditsionnoy kruzhal'noy arki s variantom ee usileniya* [Study of the operation of the traditional centering arch with the option of its strengthening]. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya – Construction and Reconstruction*, 2020, no. 4 (90), pp. 29–37.