

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА РАЗРУШАЮЩУЮ НАГРУЗКУ ЭЛЕМЕНТОВ АРОЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ LVL (X) ПРИ ИЗГИБЕ

STUDY OF THE INFLUENCE OF GEOMETRIC PARAMETERS ON THE ULTIMATE BREAKING LOAD OF ELEMENTS OF ARCHED STRUCTURES MADE OF LVL (X) AT BENDING

Представлены результаты исследований по влиянию геометрических параметров элементов арочных конструкций из LVL (X) на разрушающую нагрузку таких конструкций при изгибе. Радиус вырезаемых криволинейных элементов арочных конструкций зависит от угла наклона волокон к продольной оси листа LVL. Исследования показали, что угол наклона волокна и радиус кривизны существенно влияют на разрушающую нагрузку арочных элементов. Определены критические значения угла наклона волокон к продольной оси листа LVL, при которых сопротивление поперечного сечения элементов арочной конструкции начинает существенно снижаться. Полученные данные могут быть использованы при проектировании малых архитектурных форм в виде арочных несущих конструкций из LVL (X).

Ключевые слова: LVL, арочные конструкции, угол наклона волокон древесины, радиус кривизны, разрушающая нагрузка, нагружение.

This paper presents the results of studies on the influence of geometric parameters of the elements of arch structures from LVL (x) on the ultimate breaking load of the elements of arched structures at bending. The radius of carved curvilinear elements depends on the inclination angle of the fibers to the longitudinal axis of the LVL sheet. Studies have shown that the angle of the fibers and the radius of curvature have a significant influence on the ultimate breaking load of the arched elements. Critical values of the fibers inclination angle to the longitudinal axis of the LVL sheet are determined at which the cross-section resistance of the elements of the arched structure starts significantly decreasing. The obtained data can be used in designing small architectural forms in the form of arched bearing structures from LVL(X).

Keywords: LVL, arched structures, wood fiber angle, curvature radius, ultimate breaking load, loading.

Введение

LVL (laminated veneer lumber — клееный брус из шпона) как высокопрочная инженерная древесина широко применяется в деревянных конструкциях благодаря своей однородности, высокой прочности и отличной стабильности размеров. За счет многослойности LVL-брус способен выдерживать большие нагрузки и не уступает (а по некоторым показателям даже превосходит) металлу и бетону. В последние годы Россия достигла

значительного прогресса в разработке стандартов на материал LVL, исследованиях его свойств и применении в строительстве промышленных гражданских зданий и сооружений, в стропильных системах. Также LVL используется для создания дорожных покрытий при прокладке нефте- и газопроводов в условиях Крайнего Севера. Настоящая статья на основе современных публикаций систематизирует и обобщает характеристики материала LVL, методы проектирования

конструкций, исследования долговечности и процессы стандартизации.

В России создана комплексная система технических стандартов на LVL: ГОСТ 33124–2021 устанавливает значения механических характеристик, требования к технологии производства и контролю качества LVL, предоставляя нормативную основу для проектирования¹. Д. И. Корольков и др. [1] экспериментально подтвердили, что увеличение угла наклона волокон снижает несущую способность поперечного сечения балок из LVL, что требует учета ориентации слоев при проектировании. М. Ardalany и др. [2] провели количественную оценку энергии разрушения при растяжении для LVL из сосны, предоставив данные для проектирования с учетом трещиностойкости. А. Я. Найчук и др. [3–5] систематизировали методы проектирования арочных конструкций из древесины и древесных материалов. А. П. Малышкин и др. [6] обобщили российский опыт применения LVL в балочно-стоечных системах, подчеркнув его экономические преимущества в большепролетных конструкциях.

В СПбГАСУ [7] с помощью ускоренных испытаний на старение был проанализирован характер деградации свойств LVL при разных видах напряженно-деформированного состояния. Впервые предложена методика определения срока службы LVL-конструкций, приведены значения коэффициента длительности для разных режимов нагружения и видов НДС.

Как показывает анализ, деревянные конструкции из однонаправленного клееного шпона (LVL типа I) широко используются в строительстве. Но несмотря на наличие отдельных примеров использования LVL в арочных системах, их работа остается недостаточно изученной. Вместе с тем использование LVL типа X, характеризующегося на-

личием поперечных слоев, позволяет улучшить механические характеристики криволинейных элементов, что открывает перспективы использования данного материала в производстве арочных конструкций.

Большинство исследований основаны на изучении LVL типа I, тогда как исследования LVL (X) практически отсутствуют².

Целью данной работы является оценка влияния угла наклона и радиуса элементов арочных конструкций из LVL (X) на разрушающую нагрузку при сжато-изгибаемом нагружении криволинейных элементов арочных конструкций.

Методика исследования

В качестве объекта исследования были выбраны криволинейные элементы арочных конструкций из LVL (X) хвойных пород сортов шпона G2–G3³, где два поперечных слоя имеют взаимно перпендикулярное направление волокон к продольной оси листа шпона.

На первом этапе проводились однофакторные эксперименты по оценке влияния угла наклона волокон и радиуса кривизны арочных элементов на разрушающую нагрузку при поперечном изгибе образцов. На втором этапе решалась задача построения математической зависимости разрушающей нагрузки от факторов влияния с использованием методов планов экспериментов второго порядка B2.

Подготовка образцов осуществлялась на предприятии «Невские конструкции». Криволинейные образцы (рис. 1) по специально разработанной компьютерной программе выпиливались из трех листов LVL (X) на станке с ЧПУ. Схема раскроя большеформатных листов (39 × 1200 × 6000 мм) LVL (X) на криволинейные образцы приведена на рис. 2.

Геометрические размеры и количество образцов для испытаний приведены в табл. 1.

² Kerto-Q. URL: <https://www.metsagroup.com/globalassets/metsa-wood/attachments/kerto-lvl-manual/en/kerto-manual-lvl-q-panel.pdf>

³ ТУ 53 66-052-69150009120–2013. Брус клееный из шпона LVL (Laminated veneer lumber) ULTRALAM. Введ. 2022-10-10. Торжок: ООО «СТОД», 2022.

¹ ГОСТ 33124–2021. Брус многослойный клееный из шпона. Технические условия. М.: Российский институт стандартизации, 2022. С. 2–7.

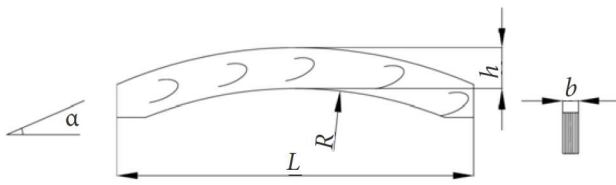


Рис. 1. Форма и размеры криволинейного элемента арочной конструкции из LVL (X). R — радиус криволинейного элемента; h, b, L — высота сечения, толщина и длина образца; α — угол наклона волокон к продольной оси листа LVL (X)

Экспериментальные исследования проводились в секторе механических испытаний строительных конструкций СПбГАСУ на универсальной испытательной машине УТ-05-1000, дающей нагрузки до 1000 кН (100 т) (рис. 3).

Порядок проведения эксперимента

Криволинейный образец 3 устанавливается на платформе с закреплением в металлические упоры 2 обоих концов опирания. Дополнительно для предотвращения выхода из плоскости проводилось раскрепление образцов в металлических упорах деревян-

ными брусками. Сосредоточенная нагрузка передается от траверсы машины через стальную матрицу площадью опирания на образец 39×150 мм.

Нагружение осуществлялось по трехточечной схеме непрерывно возрастающей нагрузкой до разрушения образца со скоростью перемещения траверсы 4 мм/мин (см. рис. 3). В процессе испытаний на мониторе компьютера отображались диаграммы «нагрузка–перемещение–время». После достижения максимального значения разрушающего усилия наблюдалось резкое падение нагрузки. Данное пиковое значение принималось за максимальную разрушающую нагрузку. В каждом опыте проводилось три повторных наблюдения, затем определялось среднее значение разрушающей нагрузки.

Результаты и обсуждение

Результаты экспериментальных исследований влияния угла наклона волокон на разрушающую нагрузку при разных радиусах кривизны образцов приведены в табл. 2.

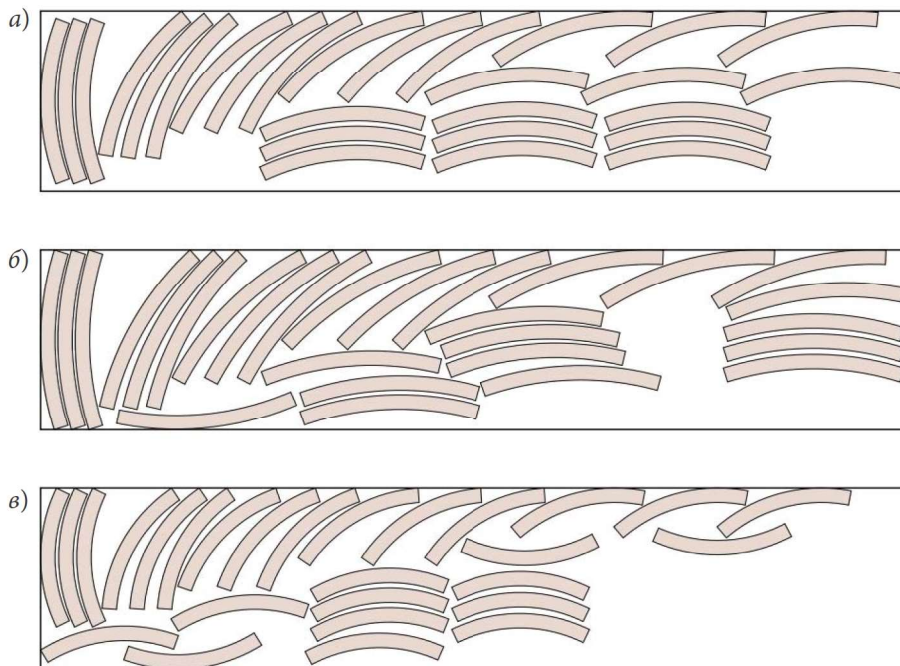


Рис. 2. Схема раскроя криволинейного элемента арочной конструкции из LVL (X). R — радиус кривизны образцов: а — 1500 мм; б — 2000 мм; в — 1000 мм

Таблица 1

Размеры и количество образцов
(толщина $b = 39$ мм, высота сечения $h = 100$ мм)

Номер группы образцов	Радиус R , мм	Длина образца L , мм	Количество образцов, шт.
1	2000	1250	27
2	1500	1148	27
3	2000	900	27
Общее количество образцов			81

На основании экспериментальных данных (см. табл. 2) были построены графические зависимости разрушающей нагрузки от радиуса элемента арочной конструкции и угла наклона волокон к продольной оси листа LVL (X) (в диапазоне от 0 до 90 °) (рис. 4).

На рис. 5 представлены фотографии образцов с характерными признаками хрупкого разрушения при варьировании угла наклона волокон и радиуса криволинейного образца из LVL (X).

Разрушения образцов происходили в зоне приложения нагрузки, сначала было

потрескивание, затем появление разрыва в нижнем поясе образцов в результате растяжения. Направление развития разрыва происходило по линии угла наклона волокон к продольной оси. В верхнем поясе образцов в зоне действия сосредоточенной нагрузки появлялись поперечные трещины в результате раскалывания и происходило расслоение слоев шпона.

Анализ графической зависимости (см. рис. 4) показывает, что при увеличении угла наклона от 2 до 6 ° наблюдалось незначительное снижение разрушающей нагрузки, затем начинается резкое падение. От значения угла наклона в 45 ° разрушающая нагрузка достигает минимального значения и остается практически на одном уровне до угла 90°. Неизменность разрушающей нагрузки, вероятно, можно объяснить включением в работу двух поперечных слоев шпона.

Для выявления зависимости разрушающей нагрузки от угла наклона волокон и радиуса элемента арочной конструкции был

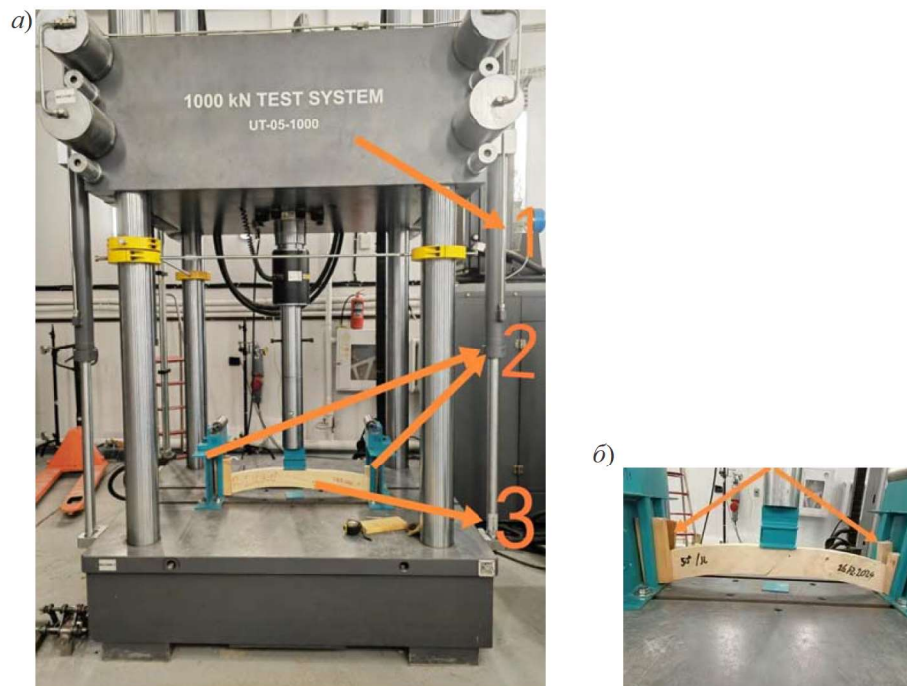


Рис. 3. Испытание криволинейных образцов на изгиб: а — образец в процессе испытания (1 — испытательная машина Magnum UT-05-1000; 2 — металлические упоры; 3 — криволинейный образец из LVL (X)); б — установка и раскрепление образцов

Таблица 2

Итоговые результаты испытаний арочных элементов на поперечный изгиб

№ п/п	Угол α , град.	Разрушающая нагрузка, кН											
		$R = 1000$ мм				$R = 1500$ мм				$R = 2000$ мм			
		N_{1j}	N_{2j}	N_{3j}	N_{cp}	N_{1j}	N_{2j}	N_{3j}	N_{cp}	N_{1j}	N_{2j}	N_{3j}	N_{cp}
1	0	20,6	16,4	19,0	18,7	16,0	17,4	11,7	15,0	14,8	14,8	11,7	13,8
2	2	15,2	16,1	17,3	6,1	16,1	15,1	17,7	16,3	13,4	12,4	15,3	13,7
3	4	16,1	16,8	14,2	5,7	13,1	13,4	13,2	13,2	11,6	13,6	11,8	12,3
4	6	13,4	16,8	14,4	4,9	10,6	9,7	13,6	11,3	11,4	13,4	10,8	11,9
5	15	7,6	10,5	11,9	10,0	9,3	7,0	7,7	8,0	8,0	8,9	7,9	8,3
6	30	10,5	8,6	8,1	9,1	4,6	4,7	4,5	4,6	5,4	4,7	4,4	4,8
7	45	8,5	7,6	7,7	7,9	5,0	5,1	3,1	4,4	3,8	5,6	4,0	4,4
8	60	10,3	7,8	6,1	8,1	3,5	4,8	4,6	4,3	3,3	4,2	4,3	3,9
9	90	5,7	7,0	7,3	6,7	3,1	3,6	3,7	3,5	4,0	4,6	3,2	3,9

Среднеквадратичное отклонение $S = 1,4$ кН.
Коэффициент вариации $V = 12,7$ %.

выбран план В2, позволяющий получить модель второго порядка в виде уравнения регрессии [8]:

$$y_i = b_0 + \sum_{j=1}^k b_{1j} x_j + \sum_{j=1}^k b_{2j} x_j^2 + \sum_{j=1}^k b_{3j} x_j x_u + \sum_{j=1}^k b_{4j} x_j^2, \quad (1)$$

где $k = 2$ — число переменных факторов.

На основании анализа априорной информации и полученных экспериментальных данных были выбраны переменные факторы и их уровни варьирования (табл. 3).

Результаты проведенного многофакторного эксперимента приведены в табл. 4.

На рис. 6 приведены диаграммы «нагрузка–перемещение до разрушения» испытания криволинейных образцов.

Статистическая обработка результатов многофакторного эксперимента на основе центрального композиционного ортогонального плана (ЦКОП) была проведена по методике [9]. Для таких планов выполняется условие ортогональности, т. е. независимости

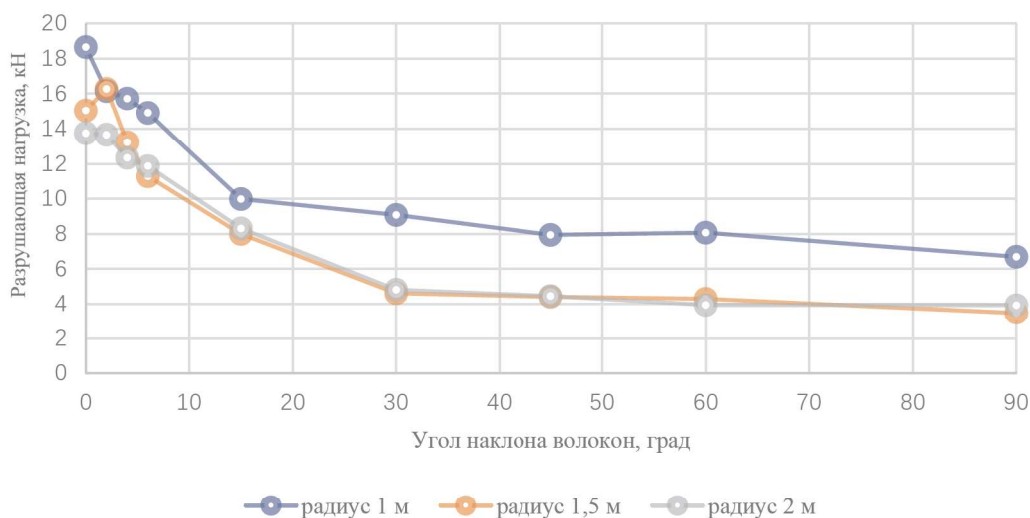


Рис. 4. Зависимость разрушающей нагрузки от угла наклона и радиуса элемента арочной конструкции



Рис. 5. Влияние угла наклона на характер разрушения образцов: а, в — вид снизу; б, г — вид разрушения на боковой поверхности образца

получения оценок управления регрессии и их дисперсий, что позволяет сократить объем вычислительной работы. Кроме того, в случае статистической незначимости коэффициента регрессии он может быть исключен без пересчета остальных коэффициентов.

Результаты расчета коэффициентов уравнения регрессии представлены в табл. 5.

Математическая модель, отражающая зависимость разрушающей нагрузки от угла наклона волокон к продольной оси LVL (X) и радиуса выпиленных арочных элементов в виде уравнения регрессии (2) и ограничений переменных факторов (3), в нормализованном виде выглядит следующим образом:

$$\hat{y} = 13,735 - 4,8231x_1 - 1,810x_2 + 2,762x_1^2 + 2,09x_2^2 + 0,159x_1x_2 \quad (2)$$

при условии, что

$$\begin{cases} 0 \leq x_1 \leq 30 \\ 1 \leq x_2 \leq 2. \end{cases} \quad (3)$$

Проверка адекватности полученной модели:

$$S_{ad} = n \sum_{j=1}^N (\bar{y}_j - \hat{y}_j)^2; S_{ad} = 1,66,$$

где $n = 3$ — число дублированных опытов в каждой серии; \bar{y}_j — среднее значение результатов эксперимента; j — число опытов; \hat{y}_j — значение выходной величины, рассчитанное по уравнению регрессии для j -го опыта.

Число степеней свободы f_{ad} дисперсии адекватности равно

$$f_{ad} = N - \rho, f_{ad} = 3.$$

Дисперсия адекватности равна

$$S_{ad}^2 = \frac{S_{ad}}{f_{ad}}, S_{ad}^2 = 0,55.$$

С помощью F — критерия Фишера — проверена однородность дисперсии адекватности и дисперсии воспроизводимости:

$$F_{\text{расч}} = \frac{S_{ad}^2}{S^2\{y\}}; F_{\text{расч}} = 0,0885;$$

$$F_{\text{расч}} = 0,0885 < F_{\text{табл}} = 3,86.$$

Поскольку расчетное значение критерия Фишера меньше табличного, полученная математическая модель адекватно описывает экспериментальные данные в области определения исследуемых переменных факторов⁴ [10–11].

На рис. 7 представлена графическая интерпретация математической зависимости разрушающей нагрузки от угла наклона и радиуса кривизны элементов арочных конструкций.

При увеличении угла волокна с 0 до 30° значение разрушающей нагрузки снижается, что можно объяснить действием сложного напряженного состояния и появления рас-

⁴ СП 64.13330.2017. Деревянные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-25-80. В ред. 2017-08-28. М.: Минстрой России, 2017. 146 с.

Таблица 3

Переменные факторы и уровни их варьирования

№ п/п	Наименование фактора	Ед. изм.	Код обозн.	Интервал варьирования	Уровни варьирования		
					X_{\min}	X_{cp}	X_{\max}
1	Угол наклона волокон к продольной оси листа LVL (X)	град.	X_1	15	0	15	30
2	Радиус криволинейного элемента арочной конструкции из LVL (X)	мм	X_2	500	1000	1500	2000

Таблица 4

Матрица планирования с результатами после обработки данных эксперимента

№ опыта	Уровни варьирования факторов		Значение разрушающей нагрузки, кН				Среднеквадр. отклонение, кН	Коэффициент вариации, %
	X_{1j}	X_{2j}	Y_{1j}	Y_{2j}	Y_{3j}	$Y_{1j\text{cp}}$		
1	-1 (0°)	-1 (1 м)	20,605	16,360	19,011	18,659	2,144	11,5
2	+1 (30°)	-1 (1 м)	10,453	8,609	8,189	9,084	1,204	13,3
3	-1 (0°)	+1 (2 м)	14,780	14,776	11,694	13,750	1,781	12,9
4	+1 (30°)	+1 (2 м)	5,359	4,711	4,363	4,811	0,505	10,5
5	-1 (0°)	0 (1,5 м)	15,963	17,371	11,777	15,037	2,910	19,4
6	+1 (30°)	0 (1,5 м)	4,563	4,738	4,538	4,613	0,109	2,4
7	0 (15°)	-1 (1 м)	7,556	10,486	11,926	9,989	2,227	22,3
8	0 (15°)	+1 (2 м)	8,093	8,933	7,910	8,312	0,546	6,6
9	0 (15°)	0 (1,5 м)	9,319	6,969	7,707	7,998	1,202	15,0

кальвающих напряжений по линии угла наклона волокон наряду с межслойными касательными напряжениями изгиба.

При изменении радиуса кривизны арочных элементов от 2,0 м до 1,0 м наблюдается рост разрушающей нагрузки, очевидно, в результате увеличения сжимающих напряжений под действием распора.

Полученная математическая модель адекватно описывает зависимость разрушающей нагрузки от угла наклона волокон и радиуса кривизны арочных элементов, может быть использована при выборе геометрических параметров арочных элементов конструкции.

По аналогии была получена математическая регрессионная модель (4), отражающая зависимость разрушающей нагрузки от угла наклона основных слоев шпона относительно продольной оси в диапазоне от 2 до 6 °. Графическая интерпретация зависимости представлена на рис. 8.

$$\hat{y} = 14,33 + 1,337x_1 - 1,479x_2 - 0,016x_1^2 - 0,24x_2^2 - 0,139x_1x_2 \quad (4)$$

при условии, что

$$\begin{cases} 2 \leq x_1 \leq 6 \\ 1 \leq x_2 \leq 2 \end{cases} \quad (5)$$

При сравнении графических зависимостей рис. 7 и 8 выявлено, что наибольшее сопротивление поперечного сечения достигается при средних углах (6–15 °). Для проектирования арок из LVL следует выбирать угол в диапазоне 6–15 ° и минимально возможный радиус кривизны, соответствующий архитектурным требованиям.

Выводы

На основании результатов проведенных исследований подтверждено существенное влияние геометрических параметров на величину разрушающей нагрузки арочных элементов из LVL (X).

Установлено, что ориентация волокон шпона относительно продольной оси эле-

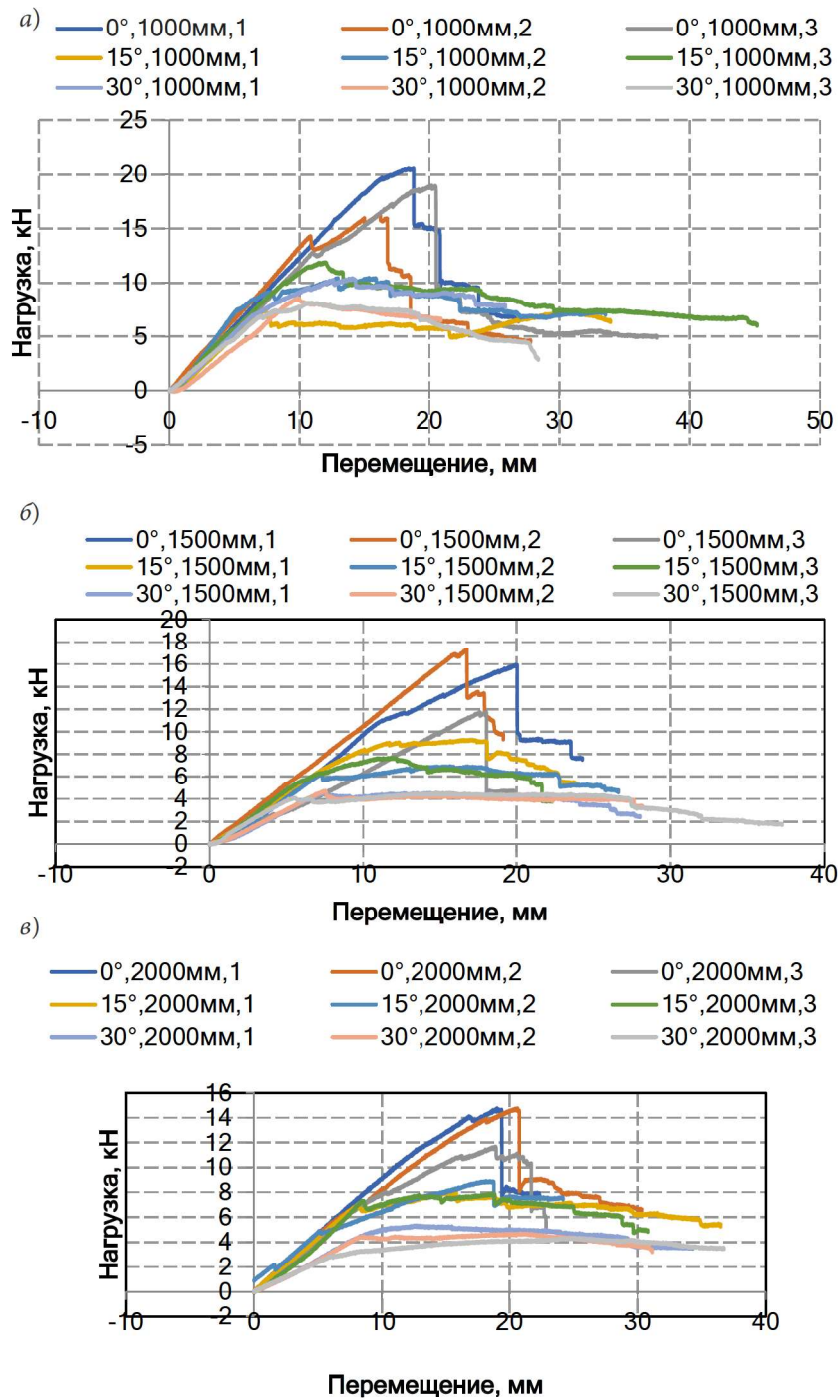


Рис. 6. Диаграммы «нагрузка – перемещение до разрушения»: а — R = 1000 мм; б — 1500 мм; в — 2000 мм

мента является критическим фактором. При увеличении угла наклона волокон к продольной оси листа до 30° наблюдается резкое снижение (до 20–44 %) от максимума разрушающей нагрузки, что можно

Таблица 5

Значения коэффициентов уравнения регрессии, рассчитанные по методике ЦКОП

b0	b1	b2	b11	b22	b12
13.735	-4.8231	-1.81	2.762	2.09	0.159

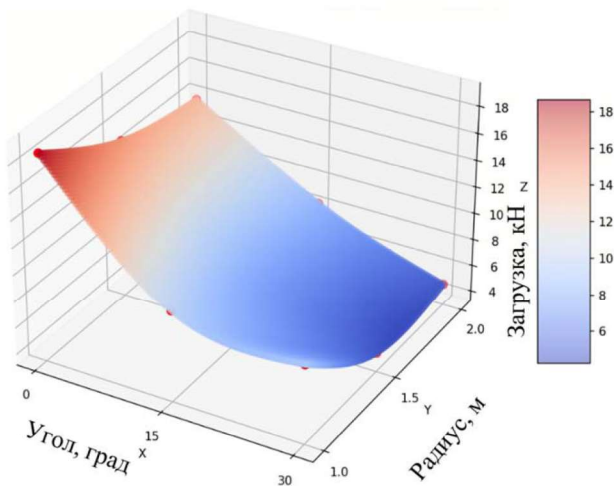


Рис. 7. Трехмерная графическая интерпретация зависимости разрушающей нагрузки от угла ($\alpha = 0 \dots 30^\circ$) наклона волокон к продольной оси листа и радиуса кривизны образцов из LVL (X)

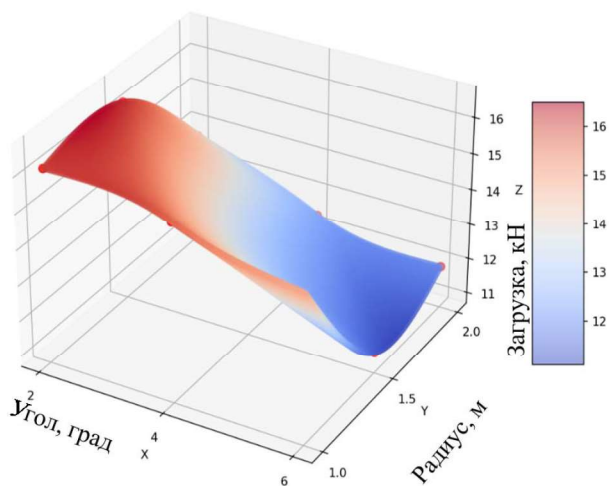


Рис. 8. Трехмерная графическая интерпретация зависимости разрушающей нагрузки от угла ($\alpha = 2 \dots 6^\circ$) наклона волокон к продольной оси листа и радиуса кривизны образцов из LVL (X)

объяснить ростом раскалывающих напряжений.

В диапазоне угла наклона от 30 до 90° падение сопротивления поперечного сечения замедляется в связи с включением в работу на изгиб двух поперечных слоев шпона.

Уменьшение радиуса элементов арочных конструкций с 2 м до 1 м приводит к росту разрушающей нагрузки на $25\text{--}35\%$ благо-

даря действию сжимающих напряжений от распора.

Результаты исследований подтверждают возможность использования LVL (X) толщиной 39 мм с двумя поперечными слоями для изготовления криволинейных элементов арочных конструкций малых архитектурных форм. Для проектирования арок из LVL следует выбирать угол наклона волокон к продольной оси листа в диапазоне $6\text{--}15^\circ$ и минимально возможный радиус кривизны, соответствующий архитектурным требованиям.

Благодарности

Работа выполнена при содействии ООО «СТОД» в части предоставления клееного многослойного материала из шпона LVL (X) и ООО «Невские конструкции» в части изготовления криволинейных образцов для проведения экспериментальных исследований в рамках подготовки кандидатской диссертации.

Библиографический список

1. Корольков Д. И., Черных А. Г., Савин С. Н., Коваль П. С., Пухаренко Ю. В., Данилов Е. В. Влияние угла наклона волокон на прочность и срок службы LVL-конструкции // Вестник евразийской науки. 2023. Т. 15, № 5. URL: <https://esj.today/PDF/74SAVN523.pdf>
2. Deam B., Ardalany M., Fragiaco M. Experimental results of fracture energy and fracture toughness of Radiata Pine laminated veneer lumber (LVL) in mode I (opening) // Materials and Structures. 2012. Vol. 45 (8). Pp. 1189–1205.
3. Найчук А. Я., Захаркевич И. Ф., Шурин А. Б. Арки из древесины и материалов на ее основе. Брест: Изд-во БрГТУ, 2022. 68 с.
4. Беляева З. В., Разводов Р. И. Эффективность применения клееных деревянных конструкций в современном строительстве // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. 2019. № 1 (40). С. 74–78.
5. Чебыкин А. А., Фрицлер Ю. А., Кудрявцев С. В. Определение расчетных характеристик сечений древесных клееных плит из перекрестных досок // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. 2017. № 2 (33). С. 83–85.
6. Малышкин А. П., Максимова О. М. Отечественный опыт применения LVL-бруса в несущих кон-

струкциях // Вестник Евразийской науки. 2023. Т. 15, № 5. URL: <https://esj.today/PDF/42SAVN523.pdf>.

7. Данилов Е. В., Коваль П. С., Тихомиров А. В., Москалев М. Б., Данилевич О. С. Исследование долговечности бруса клееного многослойного из шпона (далее LVL — laminated veneer lumber) и обоснование сроков службы для строительных LVL-конструкций: отчет о НИОКР (рег. № НИОКТР: 123051700023-2) / рук. А. Г. Черных. СПб.: СПбГАСУ, 2023. 329 с.

8. Серов Е. Н., Санников Ю. Д., Серов А. Е. Проектирование деревянных конструкций / под ред. Е. Н. Серова. М.: АСВ, 2011. 536 с.

9. Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976. 280 с.

10. Моргунов А. П., Ревина И. В. Планирование и анализ результатов эксперимента. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2014. 347 с.

11. Клеван В. И. Расчет составных изгибаемых деревянных элементов с учетом нелинейной работы // Инженерный вестник Дона. 2023. № 9 (105). С. 495–512.

References

1. Korol'kov D. I., Chernykh A. G., Savin S. N., Koval' P. S., Pukhareno Yu. V., Danilov E. V. *Vliyanie ugla naklona volokon na prochnost' i srok sluzhby LVL-konstruktsii* [Influence of the fiber tilt angle on the strength and service life of the LVL structure]. *Vestnik evraziyskoy nauki – Bulletin of Eurasian Science*, 2023, vol. 15, no. 5. Available at: <https://esj.today/PDF/74SAVN523.pdf>.

2. Deam B., Ardalan M., Fragiaco M. Experimental results of fracture energy and fracture toughness of Radiata Pine laminated veneer lumber (LVL) in mode I (opening). *Materials and Structures*, 2012, vol. 45 (8), pp. 1189–1205.

3. Naychuk A. Ya., Zakharkevich I. F., Shurin A. B. *Arki iz drevesiny i materialov na ee osnove* [Arches made of wood and materials based on it]. Brest, BrGTU Publ., 2022, 68 p.

4. Belyaeva Z. V., Razvodov R. I. *Effektivnost' primeneniya kleennykh derevyannykh konstruktsiy v sovremennom stroitel'stve* [Effectiveness of the use of glued wooden structures in modern construction].

Akademicheskii vestnik UralNIIproekt RAASN – Academic Bulletin UralNIIproekt RAASN, 2019, no. 1 (40), pp. 74–78.

5. Chebykin A. A., Fritsler Yu. A., Kudryavtsev S. V. *Opredelenie raschetnykh kharakteristik secheniy drevesnykh kleennykh plit iz perekrestnykh dosok* [Determination of design characteristics of cross sections of wood glued boards from cross boards]. *Akademicheskii vestnik UralNIIproekt RAASN – Academic Bulletin UralNIIproekt RAASN*, 2017, no. (33), pp. 83–85.

6. Malyshkin A. P., Maksimova O. M. *Otechestvenniy opyt primeneniya LVL-brusa v nesushchikh konstruktsiyakh* [Domestic experience of using LVL-beams in load-bearing structures]. *Vestnik evraziyskoy nauki – Bulletin of Eurasian Science*, 2023, vol. 15, no. 5. Available at: <https://esj.today/PDF/42SAVN523.pdf>.

7. Danilov E. V., Koval' P. S., Tikhomirov A. V., Moskaev M. B., Danilevich O. S. *Issledovanie dolgovechnosti brusa kleenogo mnogoslownogo iz shpona (dalee LVL — laminated veneer lumber) i obosnovanie srokov sluzhby dlya stroitel'nykh LVL-konstruktsiy: otchet o NIOKR (reg. № NIOKTR: 123051700023-2)* [Durability study of laminated multi-layer veneer timber (hereinafter – LVL – laminated veneer lumber) and justification of service life for construction LVL structures: R&D report]. St. Petersburg, SPbGASU Publ., 2023, 329 p.

8. Serov E. N., Sannikov Yu. D., Serov A. E. *Proektirovanie derevyannykh konstruktsiy* [Design of wooden structures]. Ed. by Serov E. N. Moscow, ASV Publ., 2011, 536 p.

9. Adler Yu. P., Markova E. V., Granovskiy Yu. V. *Planirovanie eksperimenta pri poiske optimal'nykh usloviy* [Planning of the experiment when searching for optimal conditions]. Moscow, Nauka Publ., 1976, 280 p.

10. Morgunov A. P., Revina I. V. *Planirovanie i analiz rezul'tatov eksperimenta* [Planning and analyzing the results of experiment]. Omsk, OmGTU Publ., 2014, 347 p.

11. Klevan V. I. *Raschet sostavnykh izgibaemykh derevyannykh elementov s uchetom nelineynoy raboty* [Calculation of composite bendable wooden elements taking into account nonlinear performance]. *Inzhenernyi vestnik Dona – Don Engineering Bulletin*, 2023, no. 9 (105), pp. 495–512.