

УДК 624.011.14

© П. С. Коваль, канд. техн. наук, доцент
© А. Г. Черных, д-р техн. наук, профессор
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург, Россия)

E-mail: pkoval@lan.spbgasu.ru

© А. Я. Найчук, д-р техн. наук, профессор
(Брестский государственный технический
университет, Брест, Республика Беларусь)

E-mail: atnya@yandex.by

© А. Э. Кушнир, ассистент

© Ю. В. Трунина, аспирант
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург, Россия)

DOI 10.23968/1999-5571-2026-23-3-39-49

© P. S. Koval, PhD in Sci. Tech., Associate Professor

© A. G. Chernykh, Dr. Sci. Tech., Professor
(Saint Petersburg State University
of Architecture and Civil Engineering,
St. Petersburg, Russia)

E-mail: pkoval@lan.spbgasu.ru

© A. Ya. Naichuk, Dr. Sci. Tech., Professor
(Brest State Technical University,
Brest, Republic of Belarus)

E-mail: atnya@yandex.by

© A. E. Kushnir, assistant

© Yu. V. Trunina, post-graduate student
(Saint Petersburg State University
of Architecture and Civil Engineering,
St. Petersburg, Russia)

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ НАГРУЖЕНИЯ НА ДЕФОРМАТИВНЫЕ СВОЙСТВА LVL ПРИ СЖАТИИ ВДОЛЬ ВОЛОКОН

INFLUENCE OF LOADING REGIMES ON THE DEFORMATION PROPERTIES OF LVL UNDER COMPRESSION ALONG THE FIBERS

Исследованы деформативные свойства материала клееного из однонаправленного шпона (LVL) путем испытания образцов на осевое сжатие, обусловленное силовым или кинематическим режимом их нагружения. В результате выполненных исследований установлено, что данный композиционный материал проявляет существенную нелинейность деформативных свойств, сложное реологическое поведение, зависящие как от принятого режима нагружения образцов, так и скорости их деформирования. Скорость нагружения образцов для силового режима принималась из интервала от 12,6 до 4000 Н/с, а для кинематического режима — от 0,02 до 20 мм/мин. Приведены значения модулей упругости и пределы вынужденных высокоэластических деформаций LVL.

Ключевые слова: LVL, модуль деформаций, физическая нелинейность, вязкоупругость, вынужденная высокоэластичность, силовое нагружение, кинематическое нагружение.

The article is devoted to investigating the deformational properties of laminated veneer lumber (LVL) by testing specimens under axial compression, which is induced by either a force-controlled or a displacement-controlled loading regime. The studies have revealed that this composite material exhibits significant non-linear deformational behavior and complex rheological characteristics, which depend both on the adopted loading regime of the specimens and on the rate of their deformation. For the force-controlled regime, specimen loading rates were taken from a range of 12,6 to 4000 N/s, while for the displacement-controlled regime the rates ranged from 0,02 to 20 mm/min. The values of the elastic moduli and the limits of induced high-elastic deformations of LVL are presented.

Keywords: LVL, deformation modulus, physical nonlinear behavior, viscoelasticity, induced high-elasticity, force-controlled loading, displacement-controlled loading.

Введение

Строительные композиционные материалы на основе древесины, такие как LVL, ОСП, ДПК и другие, состоящие из отно-

сительно крупных по размерам древесных частей (например, толстых листов шпона), демонстрируют существенно нелинейные свойства и сложное реологическое поведение.

ние при деформировании, подобное поведению исходного сырья. Их состав включает ряд полимеров — целлюлозный «каркас» и инкрустирующие тела [1, 2]. При нормальных температурно-влажностных условиях целлюлоза находится в застеклованном состоянии, а прочие тела — в застеклованном или высокоэластическом. При напряжениях выше предела высокоэластичности ($\sigma > \sigma_b$) упругие деформации в структурных элементах древесины переходят в эластические и необратимые деформации ползучести. Вследствие этого одновременно в стекловидных телах развивается ползучесть, а в высокоэластических — релаксация напряжений [1, 2]. На диаграмме деформирования выделяют два характерных участка (стадии) — участок I, на котором напряжения не превышают предела высокоэластичности ($\sigma < \sigma_b$), и участок II — после превышения ($\sigma > \sigma_b$). На первой стадии деформирования развиваются только упругие и обратимые деформации ползучести [1–5].

Структурная модель LVL может быть принята аналогичной модели древесины с поправкой на наличие еще одного полимерного тела, дискретно распределенного между слоями шпона и находящегося в застеклованном состоянии — прослойки фенолформальдегидного клея в швах. Кроме того, на участках, непосредственно прилегающих к шву, древесина модифицирована за счет пластификации клеем при изготовлении пакета [6, 7]. Тем не менее, характер процессов, протекающих при деформировании LVL, можно принять как для древесины. Важно отметить, что поведение материала существенно зависит от способа испытания [1–4, 8–12]. Силовое нагружение, как правило, с линейно растущей нагрузкой (напряжением) реализуется в так называемом **мягком** режиме испытания; кинематическое нагружение с постоянной скоростью перемещения активного захвата испытательной установки или пуансона — в **жестком**

режиме испытания [7, 13–14]. Реологическое поведение материала (ползучесть и релаксация) связано со временем деформирования, т. е. со скоростью процесса.

Целью данного исследования являлось экспериментальное определение прочности и деформаций LVL при сжатии вдоль волокон в зависимости от режима и скорости нагружения, а также определение соответствующих модулей деформации и пределов вынужденных высокоэластических деформаций.

Методы

Испытания LVL на сжатие вдоль волокон проводились на универсальной испытательной машине POWERTEST U-600, позволяющей осуществлять испытания образцов со скоростью нагружающей головки от 0,001 до 600 мм/мин в диапазоне нагрузок от 0,01 до 600 кН. Погрешность измерения усилия составляла $\pm 0,5$ %. Для измерения перемещений был использован двойной экстензометр EPSILON 3542RA2, устанавливающийся на образец клеммами по двум граням образца в предварительно отмеченные точки на расстоянии 50 мм вверх и вниз от центра тяжести вдоль длинной стороны (база измерения $l^* = 100$ мм).

Образцы для испытаний были разделены на партии по 20 штук и представляли собой прямоугольные параллелепипеды номинальными размерами¹ 135×51×51 мм, изготовленные из материала многослойного клееного из шпона (LVL) хвойных пород (сосна, ель) с параллельным расположением волокон в смежных слоях. Перед испытаниями для каждого образца выполнялись измерения геометрических размеров электронным штангенциркулем с погрешностью измерений не более 0,1 мм. Влажность образцов определялась электрическим влагомером Testo 606 и составляла 8 ± 2 %.

¹ ГОСТ 33124–2021. Брус многослойный клееный из шпона. Технические условия. М.: ФГБУ «РСТ», 2021. 16 с.

Нагружение каждого образца производилось непрерывно до разрушения, частота снятия показаний экстензометра — 1 с^{-1} (автоматически). Для испытаний в мягком режиме принимались следующие значения скоростей изменения нагрузки w_p , Н/с: 4000; 400; 125,9; 40; 12,6; в жестком режиме — скорости перемещения штока испытательной машины v_p , мм/мин: 20; 2; 0,63; 0,2; 0,06; 0,02.

Предварительно перед испытанием верхняя и нижняя поверхность (торцы) образцов были обработаны парафином для исключения силы трения, препятствующей поперечным деформациям расширения, сопровождающим сжатие вдоль волокон.

Для каждого испытанного образца определялись значения секущего модуля деформаций E_u (предельное или минимальное значение модуля деформаций) как отношение прочности f_u к относительным деформациям ϵ_u в момент разрушения, т. е.

$$E_u = f_u / \epsilon_u, \quad (1)$$

причем начальный (касательный) модуль деформаций E_0 в соответствии с законом Герстнера [7–11] равен

$$E_0 = 2E_u. \quad (2)$$

Кроме того, определялось значение модуля деформаций каждого образца в I области деформирования E_I по отношению к разности напряжений при уровнях нагрузки $0,4P_u$ и $0,1P_u$ к соответствующей разности относительных деформаций:

$$E_I = (\sigma_{0,4} - \sigma_{0,1}) / (\epsilon_{0,4} - \epsilon_{0,1}), \quad (3)$$

где $\sigma_{0,4}$, $\sigma_{0,1}$ — напряжения при уровнях нагрузки 40 и 10 % от разрушающей P_u соответственно, МПа; $\epsilon_{0,4}$, $\epsilon_{0,1}$ — относительные деформации при уровнях нагрузки 40 и 10 % от разрушающей P_u соответственно.

Для каждого из испытанных образцов определялись значения предела вынужденных высокоэластических деформаций σ_v в соответствии со следующим алгоритмом:

1) по линейному участку диаграммы деформирования « σ — ϵ » вычислялись среднее значение секущего модуля деформаций $E_{ср,л}$ и доверительный интервал;

2) по графику зависимости секущего модуля деформаций E_i от времени t_i определялась точка, выходящая за границы доверительного интервала для $E_{ср,л}$;

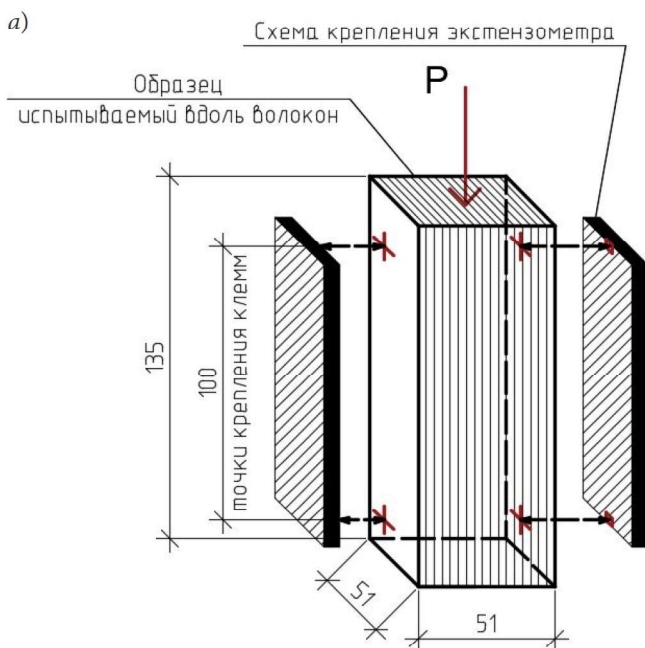


Рис. 1. Схема (а) и общий вид (б) испытания образцов

3) полученное значение времени t_b соответствует моменту наступления предела вынужденных высокоэластических деформаций σ_b .

Результаты испытаний и их анализ

Было испытано 220 образцов (11 серий по 20 шт.) с различными скоростями и режимами нагружения. Часть результатов была отбракована, вследствие чего итоговое количество образцов для разных серий различно. На рис. 1 представлен образец в испытательной машине с установленным экстензометром.

Характер разрушения образцов показан на рис. 2.

Разрушение всех образцов LVL при сжатии вдоль волокон сопровождалось смятием торцов и расслоением в направлении поперек волокон перпендикулярно слоям шпона (см. рис. 2). Отдельные слои по мере роста нагрузки и деформаций теряли устойчивость. Начальная локализация трещин в основном

наблюдалась в местах концентрации напряжений — в стыках листов шпона по длине в пределах одного слоя и вблизи выпавших сучков (допускаются в LVL). Трещины распространяются по слоям и между слоев и ориентированы вдоль волокон. Для LVL при сжатии вдоль волокон характер разрушения практически не зависит от условий проведения опыта [15]. Как показали проведенные испытания, это касается и режима нагружения. Однако следует отметить, что визуально раскрытие трещин в разрушенных образцах существенно больше при мягком режиме испытания, чем при жестком.

Характерные диаграммы зависимостей напряжений и относительных деформаций (σ (МПа) – ϵ) для отдельных образцов с указанием скорости нагружения приведены на рис. 3.

Результаты определения модулей деформаций $E_{I,ср}$, $E_{II,ср}$, $E_{0,ср}$, прочности $f_{II,ср}$ и пределов вынужденных высокоэластических

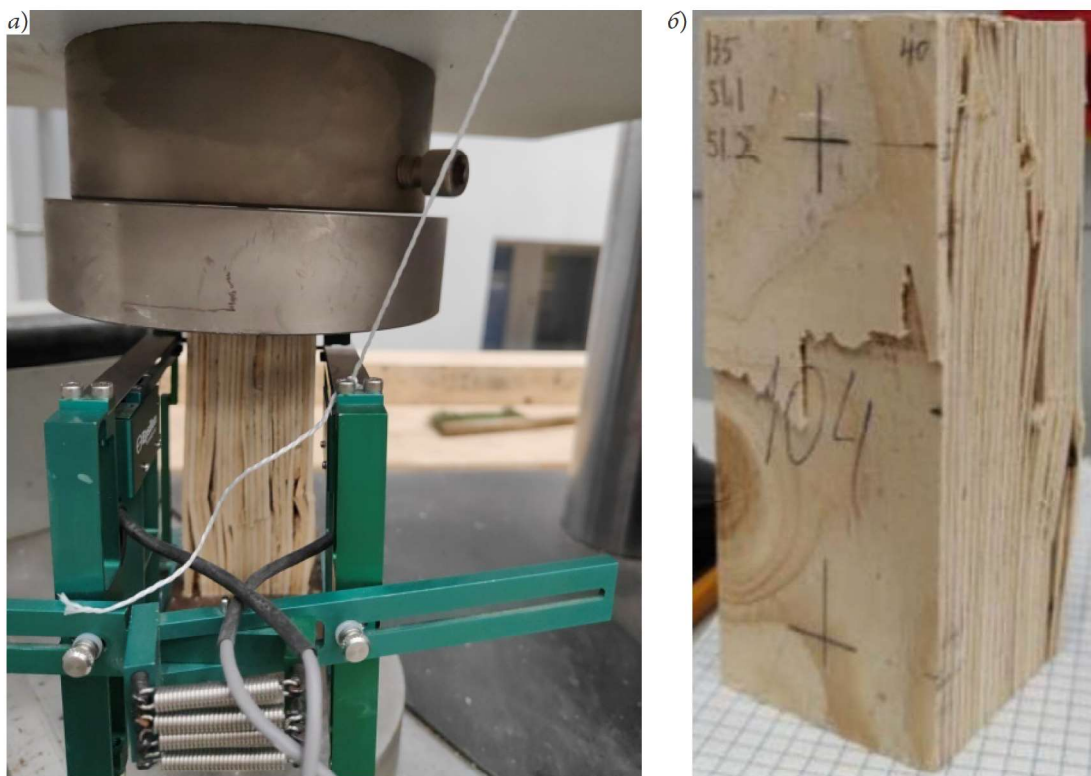


Рис. 2. Общий вид разрушения образцов: а — в процессе испытаний; б — после снятия нагрузки

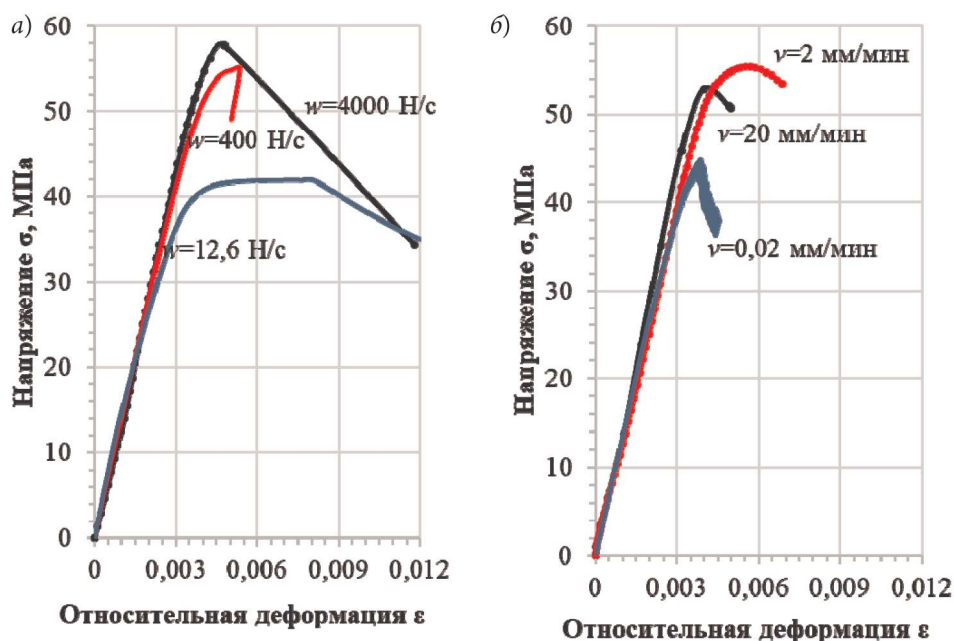


Рис. 3. Характерные диаграммы « σ — ϵ » деформирования образцов: а — при мягком режиме нагружения; б — при жестком режиме

деформаций σ_v для мягкого режима представлены в табл. 1, для жесткого режима — в табл. 2.

Диаграммы зависимости средних значений прочности $f_{u,ср}$, предела вынужденных

высокоэластических деформаций $\sigma_{v,ср}$, предельных (максимальных) относительных деформаций $\epsilon_{u,ср}$ и модулей деформаций $E_{I,ср}$, $E_{u,ср}$, $E_{0,ср}$ от логарифмов скоростей нагружения и деформирования, т. е. в полу-

Таблица 1

Результаты испытаний образцов из LVL при мягком режиме нагружения

Показатель		Ед. изм.	Значение при скорости нагружения w , Н/с				
			12,6	40	125,9	400	4000
$\lg(w)$		—	1,1	1,6	2,1	2,6	3,6
Количество образцов n		шт.	16	18	18	17	20
Среднее значение	Разрушающая нагрузка $P_{u,ср}$	кН	120,7	127,78	140,69	139,65	145,13
	Время до разрушения $t_{u,ср}$	с	9581,5	3196,1	1118,9	349,7	36,6
	Предельная относительная деформация $\epsilon_{u,ср}$	—	0,008	0,0067	0,0062	0,0057	0,0053
	Прочность образца $f_{u,ср}$	МПа	46,47	49,82	54,49	54,21	56,79
	Предел вынужденных высокоэластических деформаций $\sigma_{v,ср}$	МПа	43,73	48,45	51,19	49,44	52,20
	Модуль деформаций образца в I области деформирования $E_{I,ср}$	МПа	13 098,0	13 821,96	14 020,05	13 022,49	14 452,42
	Предельный модуль деформаций образца $E_{u,ср}$	МПа	7671,24	9133,38	9280,35	10 248,66	11 778,64
	Начальный модуль деформаций образца $E_{0,ср}$	МПа	15 342,47	18 266,76	18 560,7	20 497,32	23 557,29

Таблица 2

Результаты испытаний образцов из LVL при жестком режиме нагружения

Показатель		Ед. изм.	Значение при скорости нагружения v , мм/мин					
			0,02	0,06	0,2	0,63	2,0	20,0
$\lg(v)$		–	–1,7	–1,2	–0,7	–0,2	0,3	1,3
Количество образцов n		шт.	13	15	21	19	20	20
Среднее значение	Разрушающая нагрузка $P_{и,ср}$	кН	121,25	119,25	130,03	130,24	136,12	148,94
	Время до разрушения $t_{и,ср}$	с	5985,9	1677,9	611,2	180,7	63,9	6,9
	Предельная относительная деформация $\varepsilon_{и,ср}$	–	0,0044	0,004	0,0046	0,0043	0,0045	0,0049
	Прочность образца $f_{и,ср}$	МПа	46,69	46,08	50,78	50,86	52,86	57,64
	Предел вынужденных высокоэластических деформаций $\sigma_{в,ср}$	МПа	43,79	43,97	46,94	46,86	50,36	52,47
	Модуль деформаций образца в I области деформирования $E_{I,ср}$	МПа	12 683,53	14 278,87	13 744,73	14 439,25	13 524,37	13 823,28
	Предельный модуль деформаций образца $E_{и,ср}$	МПа	11 592,29	13 682,11	11 282,25	12 688,97	12 128,43	12 156,8
	Начальный модуль деформаций образца $E_{0,ср}$	МПа	23 184,59	27 364,21	22 564,5	25 377,93	24 256,85	24 313,61

логарифмических координатах, приведены на рис. 4–6.

Анализируя графические зависимости, приведенные на рис. 4, можно отметить, что между логарифмами скоростей нагружения (w) и деформирования (v) и прочностью f_u , а также пределом вынужденных высокоэластических деформаций σ_v образцов из LVL при сжатии вдоль волокон наблюдается прямая корреляционная зависимость. Линейная аппроксимация экспериментальных данных позволяет предложить следующие эмпирические выражения:

$$f_u(w) = 43,6 + 3,98 \lg(w); \quad (4)$$

$$f_u(v) = 52,2 + 3,80 \lg(v); \quad (5)$$

$$\sigma_v(w) = 42,7 + 2,85 \lg(w); \quad (6)$$

$$\sigma_v(v) = 48,5 + 3,11 \lg(v). \quad (7)$$

Рост скорости нагружения (w) образцов из LVL при сжатии вдоль волокон приводит к уменьшению значений предельных (максимальных) относительных деформаций ε_u (см. рис. 5, а), а рост скорости деформирования (v) — к их увеличению (см. рис. 5, б).

Таким образом, в первом случае характер разрушения становится более хрупким, а во втором — менее. Для жесткого режима испытания экспериментальные значения могут быть с удовлетворительной точностью аппроксимированы линейной зависимостью (8), а для мягкого — полиномиальной функцией второй степени (9):

$$\varepsilon_u(v) = 0,0045 + 0,0002 \lg(v); \quad (8)$$

$$\varepsilon_u(w) = 0,0005[\lg(w)]^2 - 0,0033 \lg(w) + 0,011. \quad (9)$$

Согласно рис. 6, значение модуля деформаций в I области деформирования E_I практически не зависит от скоростей нагружения (w) и перемещения пуансона испытательной установки (v): при их увеличении от 12,6 до 4000 Н/с и от 0,02 до 20 мм/мин (т. е. в 317 и 1000 раз) соответственно, средняя величина $E_{I,ср}$ возрастает менее чем на 10 % в обоих случаях. Также не установлено явной корреляции между значениями модулей деформаций E_u , E_0 и логарифмом скорости деформирования (v) образцов

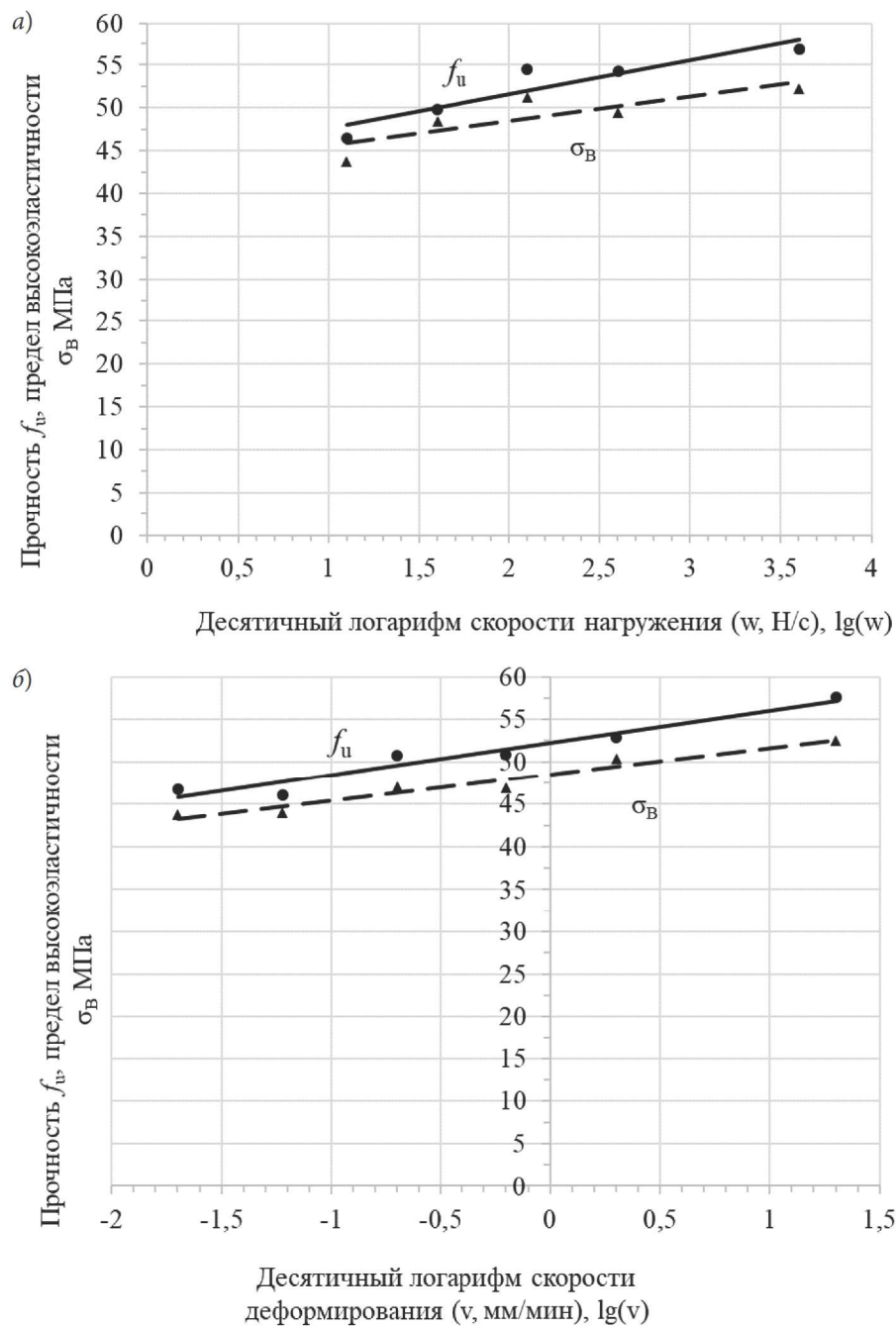


Рис. 4. Графические зависимости прочности LVL от логарифма скорости нагружения образцов: а — при мягком режиме нагружения; б — при жестком режиме

из LVL при сжатии вдоль волокон. Линейная аппроксимация в данном случае графически представляет собой практически горизонтальные прямые (см. рис. 6, б), причем отклонения средних значений экспериментально определенных E_u , E_0 от этих прямых падают с увеличением скорости деформиро-

вания. Однако согласно рис. 6, а между логарифмом скорости нагружения (w) образцов из LVL при сжатии вдоль волокон и предельным (минимальным) и начальным модулями деформаций E_u , E_0 наблюдается зависимость, близкая к линейной, которая может быть аппроксимирована функцией

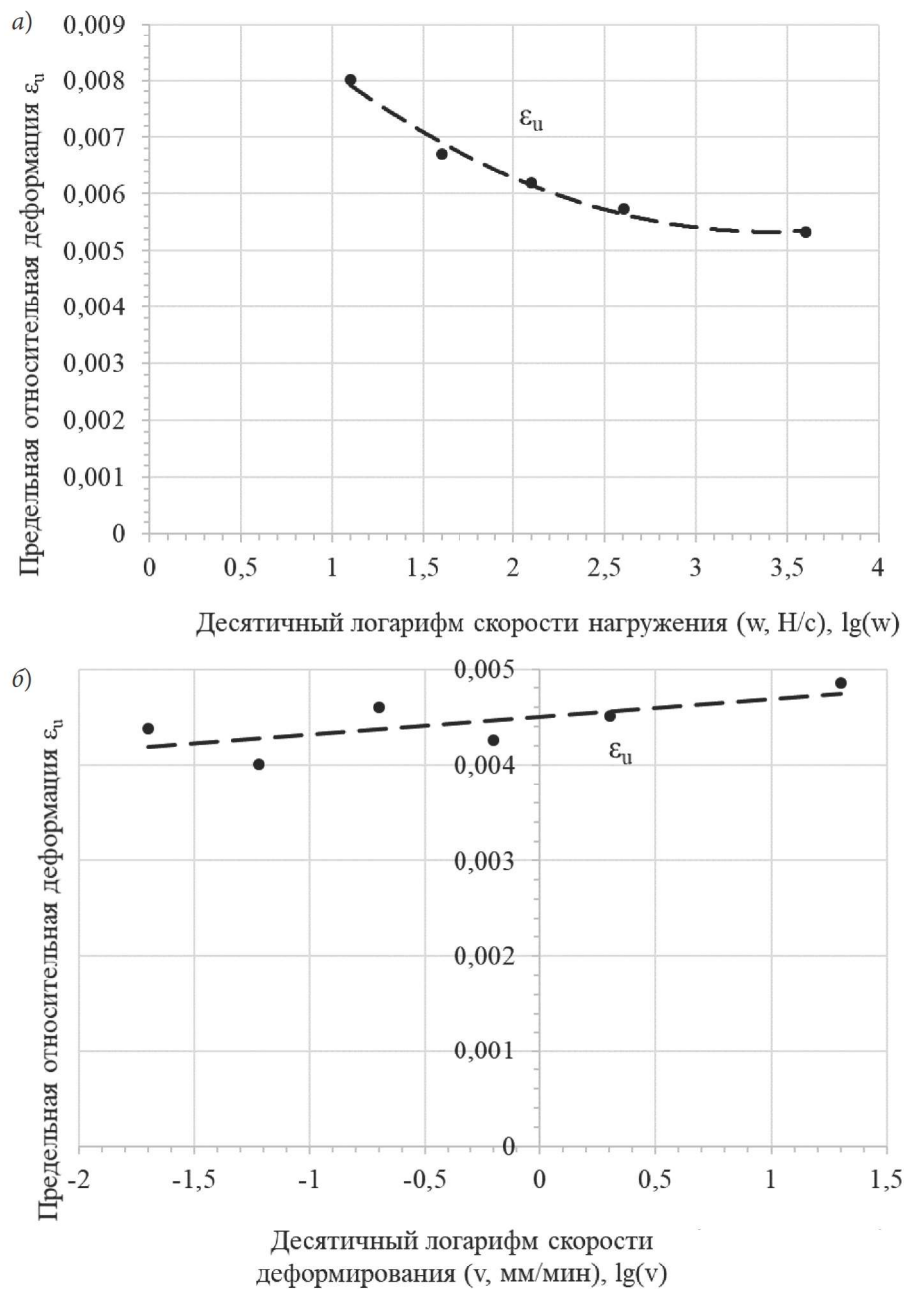


Рис. 5. Графические зависимости предельных относительных деформаций LVL от логарифма скорости нагружения образцов: а — при мягком режиме нагружения; б — при жестком режиме

$$E_u(w) = 6207,0 + 1551,5 \lg(w). \quad (10)$$

В выражениях (4)–(10) зависимость от $\lg(w)$ предполагает силовое нагружение (w — в Н/с), а зависимость от $\lg(v)$ — кинематическое нагружение (v — в мм/мин).

Полученные зависимости могут быть применены для разработки физических и чис-

ленных методов экспериментальных исследований конструктивных систем, несущих и ограждающих конструкций с применением LVL, а также конструктивных свойств этого материала, в том числе с учетом вязкоупругого поведения и сложных моделей нагружения.

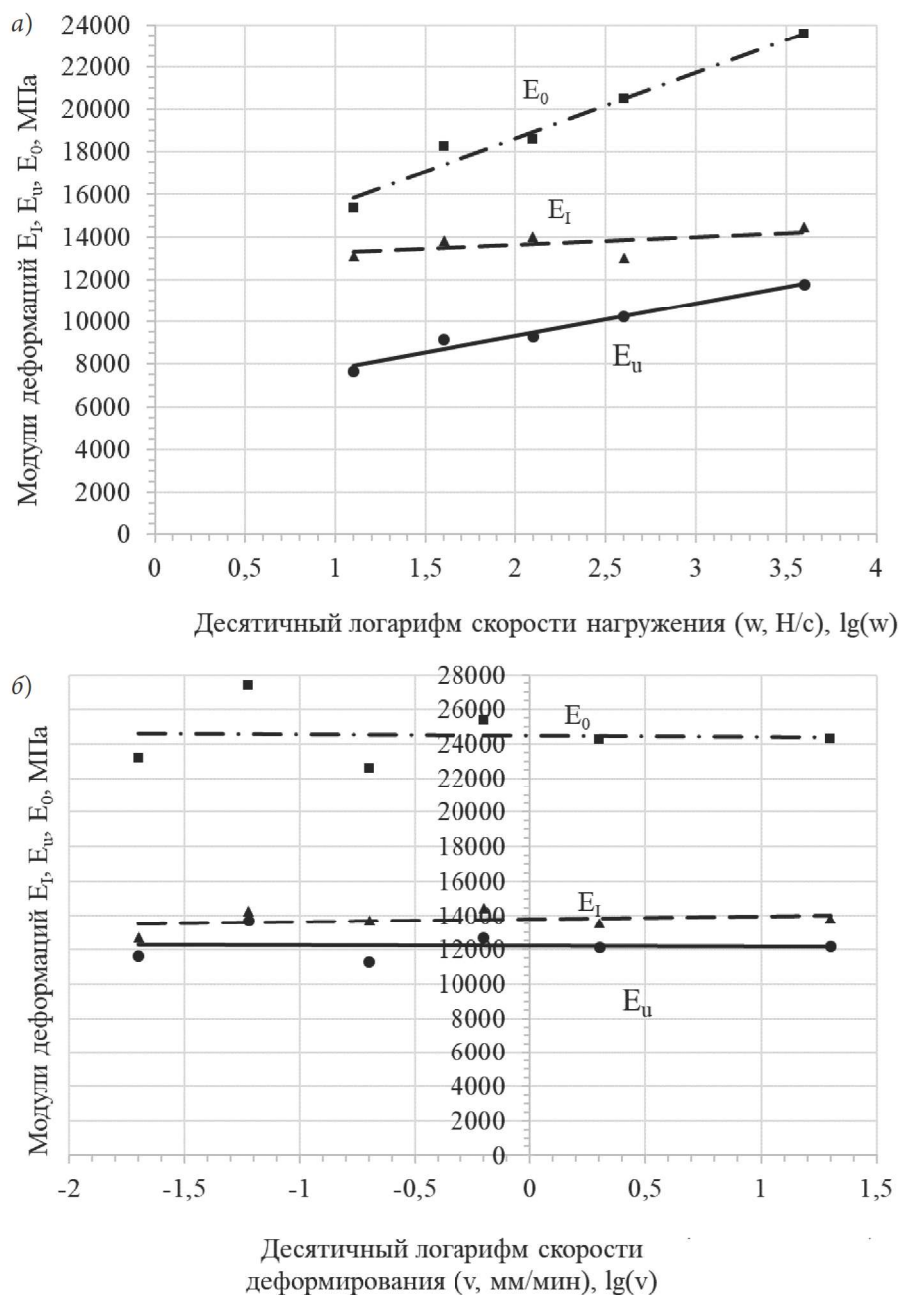


Рис. 6. Графические зависимости модулей деформаций LVL от логарифма скорости нагружения образцов: а — при мягком режиме нагружения; б — при жестком режиме

Выводы

На основании выполненных экспериментальных исследований образцов из LVL на сжатие вдоль волокон при разных режимах испытания с различными скоростями нагружения можно сделать следующие выводы:

- 1) качественная картина зависимости напряжений от относительных деформаций (вид диаграммы « $\sigma - \epsilon$ ») не меняется при смене скорости нагружения или режима испытания;
- 2) наблюдается прямая корреляционная зависимость между скоростью нагружения

(при линейном росте нагрузки — это скорость w ; при линейном перемещении пуансона испытательной установки — скорость v) и прочностью материала f_u , а также пределом вынужденных высокоэластических деформаций σ_v ;

3) при увеличении скорости нагружения предельные (максимальные) относительные деформации ϵ_u снижаются при силовом режиме (хрупкое разрушение) и возрастают при кинематическом (следовательно, разрушение сопровождается большими необратимыми деформациями);

4) значение модуля деформаций в I области деформирования E_I (модуля упругости) практически не зависит от режима испытания и скорости нагружения w или скорости перемещения пуансона испытательной установки v ;

5) при силовом нагружении наблюдается прямая корреляционная зависимость между начальным E_0 и предельным E_u модулями деформаций, с одной стороны, и скоростью роста напряжений w , с другой стороны, которая может быть записана в виде линейной функции логарифма скорости нагружения $E_u[\lg(w)]$;

6) при кинематическом нагружении не наблюдается явной зависимости между начальным E_0 и предельным (минимальным) E_u модулями деформаций, с одной стороны, и скоростью перемещения пуансона испытательной установки v , с другой стороны.

Сделанные выводы справедливы для указанного диапазона скоростей нагружения.

Финансирование

Статья публикуется по результатам выполнения гранта НИР СПбГАСУ 2026 года.

Библиографический список

1. Огарков Б. И. Теория деформирования древесных материалов с учетом ползучести // Исследования в области древесины и древесных материалов. Тр. Института леса и древесины СО АН СССР. Красноярск, 1967. С. 130–139.

2. Найчук А. Я. Учет изменения деформативных свойств древесины во времени при проектировании деревянных конструкций // Вестник Брестского государственного технического университета. 2021. № 1 (124). С. 24–28.

3. Иванов Ю. М. Предел пластического течения древесины. М.: Госстройиздат, 1948. 200 с.

4. Иванов Ю. М. Области упругого и неупругого деформирования древесины и фанеры // Известия вузов. Строительство и архитектура. 1979. № 12. С. 17–22.

5. Ржаницын А. Р. Теоретические предпосылки к построению методов расчета деревянных конструкций во времени // Исследования прочности и деформативности древесины (под ред. Г. Г. Карлсена). М.: Госстройиздат, 1956. С. 21–31.

6. Фрейдин А. С., Вуба К. Т. Прогнозирование свойств клеевых соединений древесины. М.: Лесная промышленность, 1980. 224 с.

7. Коваль П. С. Ускоренный метод определения длительной прочности древесины и материалов на ее основе // Вестник гражданских инженеров. 2024. № 6 (107). С. 68–80. DOI 10.23968/1999-5571-2024-21-6-68-80.

8. Ржаницын А. Р. Теория ползучести. М.: Стройиздат, 1968. 416 с.

9. Лукаш П. А. Основы нелинейной строительной механики. М.: Стройиздат, 1978. 204 с.

10. Пятикрестовский К. П. О расчете пространственных конструкций с учетом физической нелинейности // Современные пространственные конструкции (железобетон, металл, дерево, пластмассы): справочник; под ред. Ю. А. Дыховичного, Э. З. Жуковского. М.: Высшая школа, 1991. 274 с.

11. Коваль П. С., Кушниц А. Э. Исследование длительного модуля упругости LVL при кратковременных воздействиях // Вестник Евразийской науки. 2024. Т. 16, № 3. 11 с. URL: <https://esj.today/PDF/90SAVN324.pdf>

12. Любошиц М. И. Влияние скорости испытания на предел пластического течения древесины сосны: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Минск, 1950. 8 с.

13. Тутурин С. В. Механическая прочность древесины // Физическая мезомеханика. 2004. Т. 7, № 6. С. 85–88.

14. Тутурин С. В. Механическая прочность древесины. М.: Спутник+, 2007. 312 с.

15. Коваль П. С., Трунина Ю. В. Деформации и прочность LVL при сжатии в условиях оттаивания // Вестник гражданских инженеров. 2025. № 3 (110). С. 38–50. DOI 10.23968/1999-5571-2025-22-3-38-50.

References

1. Ogarkov B. I. *Teoriya deformirovaniya drevesnykh materialov s uchetom polzuchesti* [Theory of deformation

of wood materials taking into account creep]. *Issledovaniya v oblasti drevesiny i drevesnykh materialov. Trudy Instituta lesa i drevesiny SO AN SSSR* [Wood and wood materials research. Proceedings of the Institute of Forest and Wood of the Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences]. Krasnoyarsk, 1967, pp. 130–139.

2. Naychuk A. Ya. *Uchet izmeneniya deformativnykh svoystv drevesiny vo vremeni pri proektirovanii derevyannykh konstruktsey* [Taking into account the change in the deformation properties of wood over time when designing wooden structures]. *Vestnik Brestskogo gos. tekhn. un-ta – Bulletin of the Brest State Tech. University*, 2021, no. 1 (124), pp. 24–28.

3. Ivanov Yu. M. *Predel plasticheskogo techeniya drevesiny* [Limit of plastic flow of wood]. Moscow, Gosstroyizdat Publ., 1948, 200 p.

4. Ivanov Yu. M. *Oblasti uprugogo i neuprugogo deformirovaniya drevesiny i fanery* [Areas of elastic and inelastic deformation of wood and plywood]. *Izv. vuzov. Stroitel'stvo i arkhitektura – Proceedings of universities. Construction and Architecture*, 1979, no. 12, pp. 17–22.

5. Rzhantsyn A. R. *Teoreticheskie predposylki k postroyeniyu metodov rascheta derevyannykh konstruktsey vo vremeni* [Theoretical prerequisites for the construction of methods for calculating wooden structures in time]. *Issledovaniya prochnosti i deformativnosti drevesiny (pod red. G. G. Karlsena)* [Studies of the strength and deformability of wood (edited by G. G. Karlsen)]. Moscow, Gosstroyizdat Publ., 1956, pp. 21–31.

6. Freydin A. S., Vuba K. T. *Prognozirovaniye svoystv kleevykh soedineniy drevesiny* [Prediction of properties of wood adhesive joints]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1980, 224 p.

7. Koval' P. S. *Uskorennyy metod opredeleniya dlitel'noy prochnosti drevesiny i materialov na ee osnove* [Accelerated method for determining the long-term strength of wood and materials based on it]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2024, no. 6 (107), pp. 68–80. DOI 10.23968/1999-5571-2024-21-6-68-80.

8. Rzhantsyn A. R. *Teoriya polzuchesti* [Creep theory]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1968, 416 p.

9. Lukash P. A. *Osnovy nelineynoy stroitel'noy mekhaniki* [Fundamentals of nonlinear structural mechanics]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1978, 204 p.

10. Pyatikrestovskiy K. P. *O raschete prostranstvennykh konstruktsey s uchedom fizicheskoy nelineynosti* [On the calculation of spatial structures taking into account physical nonlinearity]. *Sovremennye prostranstvennye konstruktсии (zhelezobeton, metall, derevo, plastmassy). Spravochnik* [Modern spatial structures (reinforced concrete, metal, wood, plastics). Reference book]. Ed. by Dykhovichnyy Yu. A., Zhukovskiy E. Z. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1991, 274 p.

11. Koval' P. S., Kushnir A. E. *Issledovanie dlitel'nogo modulya uprugosti LVL pri kratkovremennykh vozdeystviyakh* [Study of the long-term modulus of elasticity of LVL under short-term impacts]. *Vestnik evraziyskoy nauki – Bulletin of Eurasian Science*, 2024, vol. 16, no. 3, 11 p. Available at: <https://esj.today/PDF/90SAVN324.pdf>.

12. Lyuboshits M. I. *Vliyanie skorosti ispytaniya na predel plasticheskogo techeniya drevesiny sosny. Avtoref. disc. kand. tekhn. nauk* [Influence of test speed on the limit of plastic flow of pine wood. Author's thesis of PhD in Sci. Tech. diss.]. Minsk, 1950, 8 p.

13. Tuturin S. V. *Mekhanicheskaya prochnost' drevesiny* [Mechanical strength of wood]. *Fizicheskaya mezomekhanika – Physical meso-mechanics*, 2004, vol. 7, no. 6, pp. 85–88.

14. Tuturin S. V. *Mekhanicheskaya prochnost' drevesiny* [Mechanical strength of wood]. Moscow, Sputnik+ Publ., 2007, 312 p.

15. Koval' P. S., Trunina Yu. V. *Deformatsii i prochnost' LVL pri szhatii v usloviyakh ottaivaniya* [LVL deformations and compression strength under thawing conditions]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2025, no. 3 (110), pp. 38–50. DOI 10.23968/1999-5571-2025-22-3-38-50.