УДК 691.11:620.179.16

Зависимость механических характеристик древесины от ее плотности и макроструктуры

Михаил Фрументьевич ЛАВРОВ, кандидат технических наук, e-mail: yakutia@lenta.ru

Дмитрий Константинович ЧАХОВ, кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой технологии деревообработки и деревянных конструкций, e-mail: tdodk@mail.ru

ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова», 677013 Якутск, ул. Белинского, 58

Аннотация. *Применение древесины в качестве конструкционного материала предполагает наличие информации о ее физико-механических показателях, которые во многом определяются ее макроструктурным строением. К преимуществам древесины можно отнести легкую обрабатываемость, относительно высокую прочность и малый удельный вес. В то же время она обладает рядом недостатков, таких как пороки, малая огне- и биостойкость и т. д., которые можно устранить на этапе ее технологической переработки (сортировка, распиловка, сушка, пропитка). Кроме того, некоторые особенности древесины требуют специального учета, например анизотропность строения, изменчивость физико-механических характеристик по радиусу и высоте ствола дерева. Однако в практике производства строительных конструкций и изделий не регламентируются допустимые значения распределения плотности и макростроения древесины. Вопросы влияния этих параметров на механические свойства рассмотрены на примере образцов из лиственницы даурской. Разработан алгоритм прогнозирования физико-механических показателей древесины на основе определения ее плотности. Выполнен анализ полного факторного эксперимента по оценке влияния особенностей макроструктуры и плотности древесины на механические характеристики. Полученные данные показали, что определение качества древесины и сфера ее применения в строительстве должны выполняться с учетом плотности и параметров макростроения.*

Ключевые слова*: древесина лиственницы, макростроение древесины, предел прочности при сжатии вдоль волокон, плотность древесины.*

DEPENDENCE OF MECHANICAL CHARACTERISTICS OF WOOD ON ITS DENSITY AND MACROSTRUCTURE

Mikhail F. LAVROV, e-mail: yakutia@lenta.ru

Dmitry K. CHAKHOV, e-mail: tdodk@mail.ru

North-Eastern Federal University, ul. Belinskogo, 58, Yakutsk 677000, Russian Federation

Abstract. *The use of wood as a structural material assumes the availability of information about its physical-mechanical properties which, in many respects, are determined by its macro-structural configuration. Among the advantages of wood are easy treatment, relatively high strength, and low specific weight. But the wood has a series of disadvantages such as flaws in the wood, low flame resistance and biostability etc. which can be removed at the stage of the technological processing (drying, preservative treatment). In addition, some features of timber, such as the anisotropy of the structure, variability of physical and mechanical properties along the radius and height of the tree trunk, require special considerations. But in the practice of manufacture of timber building structures and products, allowable values of the density distribution and macrostructure are not regulated. Issues of the influence of these parameters on mechanical properties are considered on the example of dahurian larch wood. The algorithm of forecasting physical-mechanical characteristics of the wood on the basis of its density determination has been developed. The analysis of the full factorial experiment for assessment of the influence of macrostructure features and density of the wood on mechanical parameters has been made. The data obtained show that the wood quality and the sphere of its use in construction should be determined with due regard for the density and parameters of the macrostructure.*

Key words*: larch, characteristics of wood macrostructure, compression strength along the fibers, density of wood, dependence of mechanical properties on parameters of macrostructure and wood density.*

Проблема повышения эксплуатационных характеристик конструкций из древесины, а также композиционных материалов и клееных изделий на ее основе особенно актуальна для использования в северных районах [1]. Опыт строительства в Якутии продемонстрировал достаточную надежность и долговечность конструкций из древесины лиственницы, несмотря на некоторую сложность технологии ее обработки. Например, при высушивании доски из лиственницы коробятся, на поверхности выступает смола, появляются трещины и возрастает жесткость древесины [2–4].

Исследованиями отечественных и зарубежных ученых установлено, что прочностные и упругие свойства древесины находятся в прямой зависимости от плотности, суммарно отражающей особенности ее анатомического строения [5, 6]. Плотность древесины имеет преиму-

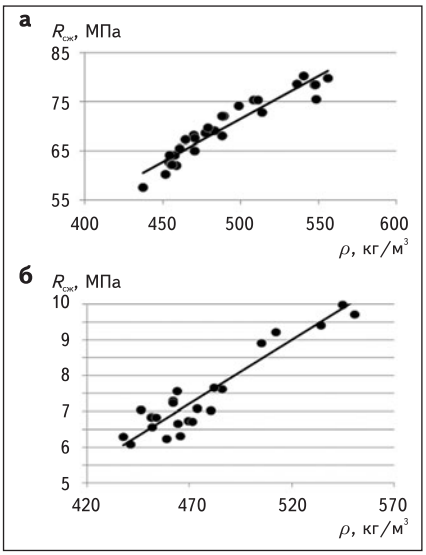

Рис. 1. ***Изменение предела прочности при сжатии $R_{сж}$ вдоль (а) и поперек (б) волокон от плотности древесины*** ρ

щества перед шириной годичного слоя, процентом поздней древесины и может служить определяющим фактором качества древесины.

По результатам обзора научных работ принято, что структурные неоднородности, плотность и размерные характеристики древесины оказывают наибольшее влияние на качество и однородность структуры древесного сырья, а также на прогнозирование стабильности физико-механических показателей изделий. В этой связи детализированную оценку распределения плотности и параметров макростроения древесины необходимо выполнять современными неразрушающими методами при отборе сырья для пиломатериалов и ответственных конструкций [7–9].

Для испытаний использовали предварительно кондиционированные стандартизированные образцы размером 20×20×30 мм влажностью 7–9 %, изготовленные из древесины лиственницы даурской, которая произрастает на юге Якутии. Физико-механические характеристики образцов рассчитывали согласно ГОСТ 16483.1, ГОСТ 16483.18, ГОСТ 16483.10, ГОСТ 16483.0.

1. Значения плотности древесины и предела прочности при сжатии вдоль волокон

Показатели	Плотность, кг/м³	Предел прочности при сжатии, МПа
Среднее	488,8	69,5
Стандартная ошибка	6,14	1,13
Медиана	478,9	69,7
Стандартное отклонение	34,75	6,4
Минимум	437,5	57,5
Максимум	556,4	80,2
Уровень надежности (95 %)	12,5	2,3

На основе полного факторного эксперимента исследовали три фактора:

- ширину годичных слоев x_1, 0,833 мм $\leqslant x_1 \leqslant$ 2,5 мм;
- процентное содержание поздней древесины в годичном слое x_2, 13 % $\leqslant x_2 \leqslant$ 22 %;
- плотность x_3, 437,5 кг/м³ $\leqslant x_3 \leqslant$ 556,4 кг/м³.

После определения начальной влажности образцов опытным путем устанавливали показатели макроструктуры, плотность и предел прочности при сжатии вдоль волокон. Для проведения эксперимента был выбран В-план с ПФП в ортогональной части с общим числом опытов, равным

$$N = 2^k + 2k = 2^3 + 2 \cdot 3 = 14,$$

где k – количество факторов, $k = 3$.

Значения плотности древесины и предела прочности при сжатии вдоль волокон малых чистых образцов приведены в *табл. 1*.

Полученные результаты показали линейную зависимость предела прочности при сжатии $R_{сж}$ вдоль и поперек волокон от плотности ρ *(рис. 1)* при степени корреляции соответственно $R^2 = 0,91$ и $R^2 = 0,88$:

$$y = 0,0175x - 1,6105; \quad (1)$$

$$y = 0,0036x - 0,9469. \quad (2)$$

На тщательно отобранных образцах с идентичными характеристиками макроструктуры выявлена хорошая корреляционная связь между прочностными показателями и плотностью образцов. При отсутствии сортировки коэффициенты корреляции составляют 0,48–0,69. Это доказывает, что макроструктура древесины должна учитываться как важный фактор, влияющий на реальные прочностные свойства изделий.

Данные для изучения взаимосвязи предела прочности при сжатии вдоль волокон от ширины годичных слоев и содержания поздней древесины приведены в *табл. 2.*

Для построения регрессионной модели по результатам В-плана использовали программу, составленную в формате Excel 2007. Уровень значимости влияния факторов определяли с помощью регрессионного уравнения

$$\hat{y} = 70,561 - 3,489x_1 - \quad (3)$$

$$- 2,192x_2 + 4,539x_3 - 1,099x_1x_2 +$$

$$+ 1,66x_1x_3 - 1,99x_2x_3.$$

Графики, характеризующие зависимость влияния плотности, содержания поздней древесины и ширины годичных слоев на предел прочности древесины приведены на *рис. 2.* Показано, что с увеличением ширины годичных колец прочностные показатели снижаются, при этом взаимовлияние двух факторов усиливается.

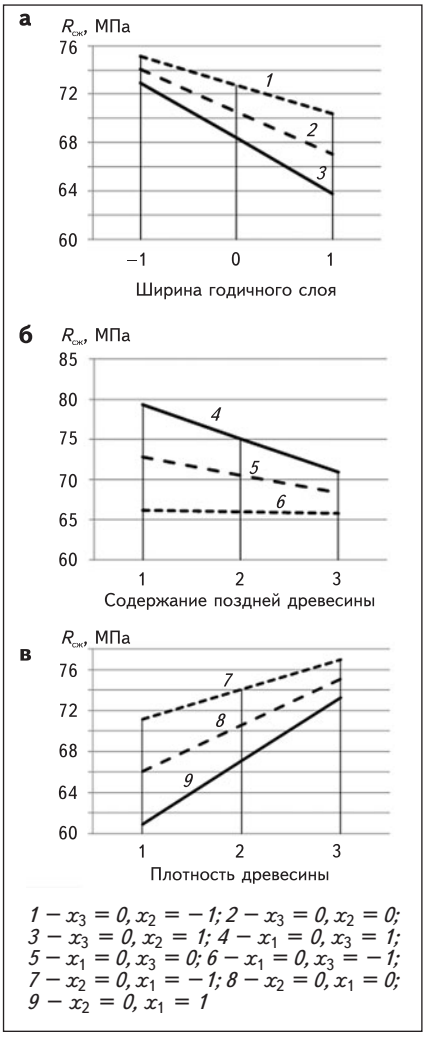

Рис. 2. ***Графики зависимости предела прочности при сжатии вдоль волокон от ширины годичных слоев (а), содержания поздней древесины (б) и ее плотности (б)***

Отрицательное значение коэффициента при факторах x_1 и x_2 демонстрирует, что с ростом содержания поздней древесины и ширины годичных слоев прочность древесины лиственницы при сжатии вдоль волокон снижается *(рис. 2а)*. Кроме того, ширина годичных колец влияет на прочность больше, чем содержание поздней древесины.

Положительное значение коэффициента фактора x_3 говорит о том, что с увеличением плотности прочность древесины лиственницы при сжатии вдоль волокон повышается *(см. рис. 2в)*. Из представленных факторов плотность имеет наибольшее значение в определении прочностных свойств. Отрицательные значения коэффициентов x_1x_2 показывают снижение прочностных свойств древесины *(см. рис. 2а)*, положительные значения факторов x_1x_3 — повышение прочности материала *(см. рис. 2в)*.

2. Экспериментальный план B_3 и результаты опытов

№	Нормализованные значения факторов			Результаты дублированных опытов			
	x_1	x_2	x_3	1	2	3	4
1	−1	−1	−1	68,688	72,114	71,212	69,333
2	1	−1	−1	62,799	60,458	61,76	62,689
3	−1	1	−1	72,196	70,185	74,634	71,399
4	1	1	−1	59,198	60,433	60,855	58,762
5	−1	−1	1	79,386	79,265	80,754	79,602
6	1	−1	1	76,393	77,437	80,482	79,673
7	−1	1	1	72,666	73,923	73,985	75,714
8	1	1	1	67,033	66,117	68,538	69,924
9	−1	0	0	75,394	72,296	74,284	75,85
10	1	0	0	65,699	67,411	69,538	68,109
11	0	−1	0	72,122	73,896	73,238	72,794
12	0	1	0	65,438	68,033	69,499	67,863
13	0	0	−1	66,99	65,156	63,489	66,55
14	0	0	1	72,533	74,55	77,288	75,18

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что при равнозначных значениях плотности наибольшими прочностными показателями обладает мелкослойная древесина с минимальным содержанием поздней древесины.

Анализ регрессионного уравнения и графиков влияния ширины годичных слоев, содержания поздней древесины и плотности на прочностные свойства показал, что значимым фактором является плотность. Данные результаты позволяют оценить реальные прочностные показатели и представить основные требования к сортировке древесины.

Так, по данным В. Н. Волынского [5] и других российских специалистов, прочность пиломатериалов третьего и четвертого сорта по ГОСТ 8486 может быть выше прочности пиломатериалов нулевого и первого сортов. При этом коэффициент вариации достигает 40 % и более, что не гарантирует реальных физико-механических свойств пиломатериалов на основании обнаружения видимых пороков древесины [10—12].

Выводы

1. На основе анализа регрессионного уравнения и графиков влияния ширины годичных слоев, содержания поздней древесины и плотности на прочностные свойства установлено, что при равнозначных показателях плотности наилучшими показателями прочности обладает мелкослойная древесина с наименьшим содержанием поздней древесины.

2. Полученные результаты показали, что при сортировке древесины для производства строительных конструкций должны учитываться плотность и содержание поздней древесины.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. *Буслаев Ю. Н.* Прочность цельной и клееной древесины при низких температурах. Якутск : ЯГУ, 1992. 73 с.
2. *Алексеев И. А., Полубояринов О. И.* Лесное товароведение с основами древесиноведения. Йошкар-Ола : МарГТУ, 2006. 457 с.
3. *Бокщанин Ю. Р.* Пути расширения переработки и потребления лиственницы. Свердловск : НТО бумлесдрев, 1962. 98 с.
4. *Соболев Ю. С.* Древесина как конструкционный материал. М. : Лесная промышленность, 1979. 248 с.
5. *Волынский В. Н.* Взаимосвязь и изменчивость физико-механических свойств древесины. Архангельск : АГТУ, 2000. 196 с.
6. *Санаев В. Г.* Физико-механические свойства элементов макроструктуры древесины // Строение, свойства и качество древесины. М., 1990. С. 171–176.
7. *Лавров М. Ф., Левинский Ю. Б., Чахов Д. К., Докторов И. А., Семенова С. А.* Распределение плотности по высоте и сечению ствола древесины лиственницы даурской // Промышленное и гражданское строительство. 2013. № 8. С. 41–42.
8. *Лавров М. Ф.* Составление карт распределения плотности в поперечных и продольных сечениях ствола дерева // Наука и образование. 2015. № 2(78). С. 79–84.
9. *Лавров М. Ф. Чахов Д. К., Докторов И. А.* Определение качественных показателей древесины методом сверления // Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник. 2014. № 5. С. 196–201.
10. *Чубинский А. Н., Тамби А. А.* Сортировка пиломатериалов: пора менять принципы сортообразования // Леспроминформ. 2013. № 6(96). С.18–20.
11. *Чубинский А .Н. Тамби А. А.* Средства неразрушающего контроля качества древесины. Ч. 1. Оборудование для сортировки круглых лесоматериалов // Леспроминформ. 2013. № 4(94). С. 98–101.
12. *Исаев С. П., Бегункова Н. О.* Моделирование годичных слоев древесины в объеме и на разрезах круглого лесоматериала // Вестник Тихоокеанского государственного университета. 2013. № 1(28). С. 159–168.

R E F E R E N C E S

1. Buslaev Ju. N. *Prochnost' cel'noj i kleenoj drevesiny pri nizkih temperaturah* [The strength of solid and laminated wood at low temperatures]. Jakutsk, JaGU Publ., 1992. 73 p. (In Russian).
2. Alekseev I. A., Polubojarinov O. I. *Lesnoe tovarovedenie s osnovami drevesinovedenija* [Forestry wood-merchandising with the basics]. Joshkar-Ola, MarGTU Publ., 2006. 457 p. (In Russian).
3. Bokshhanin Ju. R. *Puti rasshirenija pererabotki i potreblenija listvennicy* [Ways of enhancing the processing and consumption of larch. Sverdlovsk]. Sverdlovsk, Sverd. NTO bumlesdrev Publ., 1962. 98 p. (In Russian).
4. Sobolev Ju. S. *Drevesina kak konstrukcionnyj material* [Wood as a construction material]. Moscow, Lesnaja Promyshlennost' Publ., 1979. 248 p. (In Russian).
5. Volynskij V. N. *Vzaimosvjaz' i izmenchivost' fiziko-mehanicheskih svojstv drevesiny* [The relationship and variability of physical and mechanical properties of wood]. Arhangel'sk, AGTU Publ., 2000. 196 p. (In Russian).
6. Sanaev V. G. Fiziko-mehanicheskie svojstva jelementov makrostruktury drevesiny [Physical and mechanical properties of the elements of the macrostructure wood]. *Stroenie, svojstva i kachestvo drevesiny*. Moscow, 1990. Pp. 171–176. (In Russian).
7. Lavrov M. F., Levinskiy Yu. B., Chakhov D. K., Doktorov I. A., Semenova S. A. Distribution of wood density along the height and radius of a trunk of dahurian larch. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*, 2013, no. 8, pp. 41–42. (In Russian).
8. Lavrov M. F. Graph modelling of density distribution in crosscut and longitudinal section of a tree trunk. *Nauka i obrazovanie*, 2015, no. 2(78), pp. 79–84. (In Russian).
9. Lavrov M. F., Chahov D. K., Doktorov I. A. Wood qualyty indicator determination by drilling method. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa – Lesnoj vestnik*, 2014, no. 5, pp. 196–201. (In Russian).
10. Chubinskij A. N., Tambi A. A. Sorting sawn timber: it is time to change the principles of education grades. *Lesprominform*, 2013, no. 6(96), pp. 18–20. (In Russian).
11. Chubinskij A. N., Tambi A. A. Means of non-destructive quality control of wood. Part 1: equipment for sorting of round timber. *Lesprominform*, 2013, no. 4(94), pp. 98–101. (In Russian).
12. Isaev S. P., Begunkova N. O. Modeling of annual rings in volume and at the cut of round woods. *Vestnik Tihookeanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2013, no. 1(28), pp. 159–168. (In Russian).

Для цитирования: *Лавров М. Ф., Чахов Д. К.* Зависимость механических характеристик древесины от ее плотности и макроструктуры // Промышленное и гражданское строительство. 2016. № 8. С. 34–37.

For citation: Lavrov M. F., Chakhov D. K. Dependence of mechanical characteristics of wood on its density and macrostructure. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering], 2016, no. 8, pp. 34–37. (In Russian).