

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЖЕСТКОСТИ ДРЕВЕСИНЫ ПО ЕЕ ПЛОТНОСТИ

The article is devoted to problem of prediction elastic parameters of wood with different density. Offered three level structural model leaf wood with honeycomb layer. Calculated 11 parameters of structural model include elastic parameters of wood substances. Given equations for calculation elastic parameters of leaf wood with different density.

Введение. Традиционное применение натуральной древесины в качестве конструкционного и технологического материала в последнее время дополняется ее использованием и как компонента композиционных материалов. Это связано с относительно невысокой стоимостью древесины как армирующего материала, особенно в виде технологических отходов, а также отсутствием вредных выделений при утилизации композитов. При производстве композитов возможно использование древесины целиком, т. е. как исходной матрицы, либо в измельченном виде в качестве дисперсной фазы, т. е. наполнителя. В обоих случаях для оптимального конструирования, а также прогнозирования деформативных свойств композита необходимо иметь сведения о характеристиках жесткости древесины. Это модули упругости первого и второго рода, а также коэффициенты поперечной деформации (коэффициенты Пуассона). Известно, что эти характеристики зависят в первую очередь от особенностей анатомического строения древесины, т. е. породы, а также от ее плотности [1].

Экспериментальное определение деформативных характеристик или постоянных упругости древесины является весьма трудоемким, особенно это касается коэффициентов Пуассона μ_{ra} и μ_{ta} , поскольку диапазон измеряемых поперечных деформаций в аксиальном направлении зачастую составляет несколько микрометров (здесь и ниже первый индекс коэффициентов Пуассона соответствует направлению продольной деформации, второй индекс – направлению поперечной). По этой причине актуальным представляется прогнозирование этих свойств на основе плотности древесины и ее породы.

Многие авторы используют традиционный феноменологический подход к решению данной задачи. В основе методики прогнозирования лежит регрессионный анализ результатов экспериментальных исследований. Для этого определяют механические характеристики образцов древесины с различной плотностью, обычно при испытаниях на сжатие. При этом коэффициенты Пуассона μ_{ra} и μ_{ta} , величины которых весьма малы (0,01–0,02), как правило, экспериментально не определялись по указанным выше техническим причинам. Их рассчитывали на основании уравнения упругого потенциала, записанного для ортотропного тела. Полученные таким ме-

тодом данные обладают несомненной практической ценностью. Однако они не дают сведений о механических характеристиках древесинного вещества, представляющих значительный интерес для древесиноведения.

Принципы построения моделей древесины. Структурно-механические модели строения древесины обычно включают в себя параметры материала модели – аналога древесинного вещества. Такие модели часто используются для прогнозирования механических характеристик древесины, модифицированной полимерами, не проникающими в клеточные стенки [2]. Предложенные модели строения учитывают, как правило, два уровня строения древесины. На первом (субмикро-) уровне материал модели принимается анизотропным, что соответствует общепринятым сведениям о строении клеток древесины. На втором (микро) уровне учитывается наличие полостей в клетках. При этом обычно предлагается четырехугольная форма полостей, характерная для древесины хвойных пород. Разная жесткость древесины в радиальном и тангенциальном направлениях ($E_r > E_t$) обеспечивается в таких моделях разной толщиной стенок ячеек. При этом наличие сердцевинных лучей, которые в основном и обеспечивают это неравенство, игнорируется с целью упрощения. Кроме того, игнорируется наличие более жестких клеток в поздней зоне годичного слоя, а также проводящих сосудов. Очевидно, что такие приближения существенно упрощают методику расчета параметров модели, однако сама модель становится недопустимо далекой от реального объекта.

В работе [3] предложена структурно-механическая модель строения древесины рассеянно-сосудистых пород, разработанная для прогнозирования механических характеристик древесины, модифицированной полимерами, проникающими в клеточные стенки. Она учитывает особенности строения древесины на трех уровнях строения.

В основу модели положено наличие в древесине трех типов механических структур, соответствующих различным типам тканей. К ним относятся механические (прозенхимные клетки либриформа), запасующие (паренхимные клетки сердцевинных лучей) и проводящие (сосуды и трахеиды) ткани.

Коэффициенты регрессионного уравнения для древесины березы

a_n	E_{a_n} , МПа	μ_{ar}	μ_{at}	E_{r_n} , МПа	μ_{ra}	μ_{rt}	E_{t_n} , МПа	μ_{ta}	μ_{tr}
a_0	797	0,062 1	0,761 1	297,4	0,963	0,029 7	3,277	0,945 3	0,065 4
a_1	323 20	0,645 8	-0,857	-114 5	0	0	0	-0,631	-0,105
a_2	-139 1	0	0,597 1	353 2	-1,140	0	153 4	-1,87	-0,077
a_3	0	-0,965	0	108 3	0,338 1	0	0	3,097	0,221 7
a_4	399 82	0,646 4	0	0	0	0	0	-1,413	0
a_5	-307 2	0	-0,069	-538,3	0,171 1	-0,002	-385,6	0	-0,103

Расчетная схема элемента предложенной модели на уровне макро структуры имеет вид слоистого куба, состоящего из трех типов слоев – аналогов соответствующих типов тканей.

На уровне микро структуры механические ткани моделируются сотовой конструкцией, при этом продольные оси полостей шестиугольных ячеек параллельны аксиальному направлению ствола. Данное обобщение сделано на основании анализа микросрезов древесины рассеянно-сосудистых пород, который показал, что большинство клеток либриформа в поперечном сечении имеют правильную шестиугольную форму. Исключение составляет узкая полоска (3–4 ряда) клеток поздней зоны годичного слоя. Проведенный расчет жесткости сотовой конструкции показал, что она является трансверсально-изотропной. Для учета влияния клеток поздней зоны годичного слоя, повышающих жесткость в тангенциальном направлении, введен коэффициент, являющийся параметром модели.

Запасяющие ткани (сердцевинные лучи) представлены в виде рядов пустотелых четырехугольных ячеек, симметричных относительно продольной оси, параллельной радиальному направлению. Ось изотропии этого слоя параллельна радиальному направлению.

Проводящие ткани, в основном это крупные сосуды, представлены как пустоты между сотовыми ячейками в структуре-аналоге механических тканей.

На уровне субмикро структуры материал модели (аналог клеточной стенки древесины или древесинного вещества) принят трансверсально изотропным. Плотность материала модели принята равной плотности древесинного вещества, которая составляет 1530 кг/м^3 [4].

Деформативные свойства модели древесины были выражены через 11 параметров. В их

числе 5 упругих характеристик трансверсально-изотропного материала модели (идеализированного древесинного вещества), парциальные объемы отдельных слоев структуры и коэффициенты относительной жесткости.

Для расчета параметров модели необходимо располагать значениями 3 модулей упругости и 6 коэффициентов Пуассона, полученными экспериментально. С этой целью были проведены испытания образцов древесины рассеянно-сосудистых пород – березы бородавчатой и ольхи черной. Данный вид нагружения является предпочтительным, т. к. в сравнении со сжатием позволяет получить в рабочей части образцов наиболее однородное напряженное состояние, что повышает точность определения механических характеристик. Однако при этом существенно повышаются требования к чувствительности тензодетекторов и динамометра для измерения поперечных деформаций.

Для достижения необходимых параметров был разработан специальный тензомер [5] и электронно-механический динамометр [6]. Отличительными особенностями тензомера является использование механической системы мультипликации измеряемого перемещения, а также применения прецизионного датчика перемещения – механотрона. За счет этого удалось получить высокую чувствительность – 3 мВ/мкм при погрешности измерения не более $0,05 \text{ мкм}$ в диапазоне 5 мкм . Кроме того, конструкция прибора позволяет измерять поперечные деформации образцов с толщиной от $0,5 \text{ мм}$. Это позволило определить коэффициенты Пуассона μ_{ra} и μ_{ta} при испытаниях стандартных образцов на растяжение по ГОСТ 16483.23–73 с толщиной рабочей части в 4 мм .

Таблица 2

Коэффициенты регрессионного уравнения для древесины ольхи

a_n	E_{a_n} , МПа	μ_{ar}	μ_{at}	E_{r_n} , МПа	μ_{ra}	μ_{rt}	E_{t_n} , МПа	μ_{ta}	μ_{tr}
a_0	898	-0,010	0,534	82,2	0,045	0,897	-208,6	0,804	0,165
a_1	19 080	1,176	0	-322	0	-0,805	1376	-1,29	-0,44
a_2	0	-0,855	-2,07	6362	0	0	0	0	0,365
a_3	0	0	2,346	0	0,060	0	0	0	0
a_4	22 200	0	0	0	0	0	0	0	0
a_5	-2 370	0	0	0	-0,17	0	0	1,05	0

При испытаниях на образцы устанавливали 3 тензомера, что позволило производить одновременно запись диаграмм деформирования в 3 структурных направлениях строения древесины.

Параметры модели были рассчитаны численным методом Ефронсона. В качестве минимизируемой целевой функции использовалась абсолютная величина разности правой и левой частей уравнения упругого потенциала, записанного для материала модели. В качестве ограничений задачи использовали значения трех модулей упругости первого рода и шести коэффициентов Пуассона, полученные экспериментально. Модуль упругости материала клеточной стенки в продольном направлении для рассмотренных пород древесины оказался в диапазоне $E_a = 45-55$ ГПа, в поперечном направлении $E_r = E_t = 10-11$ ГПа. Коэффициенты Пуассона в зависимости от направления составили: $\mu_{at} = \mu_{ar} = 0,4-0,5$; $\mu_{ta} = \mu_{ra} = 0,03-0,04$; $\mu_{rt} = \mu_{tr} = 0,4-0,7$. Величины парциальных объемов отдельных слоев структуры оказались близкими к среднестатистическим, характерным для исследованных пород.

Заключение. На основании полученных значений параметров модели произведен прогнозный расчет деформативных характеристик для древесины березы и ольхи при различной толщине клеточных стенок, т. е. для различной плотности моделируемой древесины. Полученный массив данных для удобства при практическом использовании был подвергнут регрессионному анализу. В результате получены аппроксимирующие уравнения следующего вида:

$$E_i, \mu_{ij} = a_0 + a_1 \rho + a_2 \rho^2 + a_3 \rho^3 + a_4 \rho^4 + a_5 \rho^5,$$

где E_i – модуль упругости, соответствующий i -направлению, МПа; μ_{ij} – коэффициент Пуассона; a_i – коэффициент регрессионного уравнения; ρ – плотность древесины, кг/м³.

Значения коэффициентов регрессионного уравнения для древесины березы представлены в табл. 1, для древесины ольхи в табл. 2.

Проведенная проверка показала удовлетворительное, в пределах 10–15%, совпадение прогнозируемых и измеренных характеристик жесткости древесины.

Литература

1. Соболев, Ю. С. Древесина как конструкционный материал / Ю. С. Соболев. – М.: Лесная пром-сть. – 1979. – 248 с.
2. Макаревич, С. С. Деформативные свойства структурных элементов древесины / С. С. Макаревич // Механическая технология древесины. – 1985. – Вып. 15. – С. 95–101.
3. Дорожко, А. В. О моделях древесины натуральной и модифицированной полимерами, проникающими в клеточные стенки // А. В. Дорожко, С. С. Макаревич, Ю. В. Вихров // Технология и оборудование заготовки и переработки древесины. – 1987. – Вып. 2. – С. 65–72.
4. Уголев, Б. Н. Древесиноведение с основами лесного товароведения / Б. Н. Уголев // – М.: Лесная пром-сть, 1975. – 384 с.
5. Дорожко, А. В. Тензомер для измерения поперечных деформаций / А. В. Дорожко // Заводская лаборатория. – 1984. – № 5. – С. 88–89.
6. Дорожко, А. В. Высокочувствительный электронно-механический динамометр / А. В. Дорожко // Механическая технология древесины. – 1984. – Вып. 14. – С. 57–59.