

УДК 674.21

А. С. Пардаев, старший преподаватель (БГТУ)

РАСЧЕТНЫЕ СХЕМЫ МЕХАНИЧЕСКОЙ АНИЗОТРОПИИ ДРЕВЕСИНЫ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В САЕ-СИСТЕМАХ

Представлен сравнительный анализ расчетных схем механической анизотропии древесины. Предложены рекомендации по их применению при назначении свойств древесины в САЕ-системах.

The comparative analysis of settlement schemes mechanical anisotropy wood is presented. Recommendations about their application are offered at appointment of properties wood in CAE-systems.

Введение. Характерной особенностью древесины всех пород и многих древесных материалов является явно выраженные различия в упругих свойствах этих материалов по разным направлениям. Анизотропия древесины является следствием ее анатомического строения (макροструктуры) и микростроения составляющих ее клеточных оболочек.

Расположение древесных волокон вдоль оси дерева обуславливает резкое различие механических свойств древесины в направлении вдоль и поперек ствола. Это различие усиливается влиянием ориентации микрофибрилл в клеточных стенках и ориентации части молекул целлюлозы в микрофибриллах.

Модули упругости для направления вдоль волокон почти в 40 раз (ель) больше, чем поперек, а предел прочности при сжатии в 10 раз, при растяжении в 20–30 раз больше. Таким образом, различие в величине характеристических свойств древесины в направлениях вдоль и поперек волокон обусловлено ее макро- и микростроением.

Цель данной работы заключается в сравнительной оценке используемых в проектной практике расчетных схем механической анизотропии древесины и разработке рекомендаций по их применению в системах конечно-элементного анализа (САЕ-системах).

Объектом исследования является древесина и ее механические свойства.

Предметами исследования являются расчетные схемы анизотропии древесины, применяемые при конструкционном анализе столярных изделий.

Основная часть. Различие между свойствами древесины для разных ориентаций, лежащих в плоскости поперек волокон, связано, главным образом с ее анатомическим строением (макροструктурой). Слоистость, обусловленная чередованием в годичных слоях ранней и поздней древесины, определяет различие в механической прочности древесины в радиальном и тангенциальном направлениях, в большинстве своем при сжатии. Поздние трахеиды, у которых размеры в тангенциальном направлении больше, чем в радиальном, а стенки толще, чем у ранних, опре-

деляют при сжатии в тангенциальном направлении механическую прочность древесины. Лиственные породы, в частности береза, обнаруживают при сжатии в тангенциальном направлении меньшую прочность, чем в радиальном, что связано в первую очередь с влиянием сердцевинных лучей, упрочняющих радиальное направление. Этим же влиянием сердцевинных лучей объясняется для лиственных пород меньшая прочность при растяжении в тангенциальном направлении, чем в радиальном. При растяжении в радиальном направлении разрушение идет по слабому слою ранней древесины, а в тангенциальном – разрыву сопротивляются слою ранние и поздние, причем последние воспринимают большую часть нагрузки. Влияние сердцевинных лучей у хвойных пород незначительно и в этом случае [1].

Если взять участок ствола дерева, несмотря на некоторые отступления от геометрически правильных очертаний и включения неоднородностей, то закономерность изменения физико-механических свойств древесины в стволе соответствует схеме цилиндрической анизотропии (рис. 1) с тремя плоскостями симметрии: поперечной H , радиальной V и тангенциальной W . Линии пересечения этих плоскостей есть оси: a (основная ось, параллельная волокнам), r (ось, совпадающая с радиусом ствола) и t (ось, совпадающая с касательной к выбранному годовому слою, перпендикулярная двум предыдущим осям a и r).

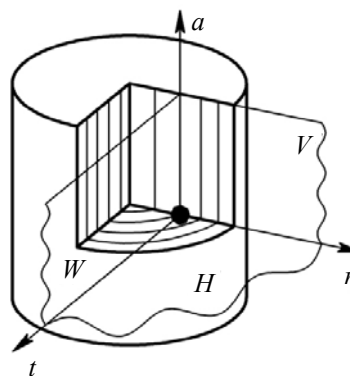


Рис. 1. Главные плоскости упругой анизотропии древесины

Схема цилиндрической анизотропии механических свойств материалов может быть реализована в расчетном комплексе метода конечных элементов ANSYS. При назначении свойства древесины следует выбрать трехмерный анизотропный элемент (например, SOLID64 или SOLID186 – используется для моделирования анизотропных твердотельных конструкций) и указать направления анизотропии материала с помощью цилиндрической системы координат.

Различие упругих свойств древесины в трех взаимно перпендикулярных направлениях установлено еще в 20-х гг. XIX в. Большой вклад в изучение анизотропии упругих и прочностных свойств древесины внесли такие ученые, как Е. К. Ашкенази, Е. Г. Лехницкий, А. Н. Метинский, А. П. Павлов, В. Н. Глухих и др.

Однако, несмотря на четкое и вполне определенное положение о применимости схемы цилиндрической анизотропии древесины в стволе, выбор характера анизотропии древесины в различных изделиях встречает ряд затруднений ввиду различных размеров и форм изделий, разных соотношений относительных размеров структурных элементов древесины и изделий и их расположения по отношению к осям симметрии изделий.

В изделиях и элементах конструкций древесины можно приписывать ортогональную, цилиндрическую или трансверсальную расчетную схему анизотропии в зависимости от формы, размеров и ориентации сечений [1, 2, 3].

Наиболее распространены изделия из древесины в виде прямых призм различных сечений (стойки, балки, щиты и т. д.). По данным [2], применение схемы цилиндрической анизотропии при решении задач механики твердого деформируемого тела для расчета указанных объектов нецелесообразно и наиболее приемлемой для большинства деталей является схема анизотропии ортотропного тела.

В применении к малым объемам древесины гипотеза об ортогональной анизотропии лучше отвечает ее структуре. Эта гипотеза соответствует результатам испытания малых чистых образцов и лежит в основе государственных стандартов на методы определения физико-механических показателей древесины, в которых различаются образцы трех основных ориентаций: вдоль волокон, поперек волокон в тангенциальном направлении и поперек волокон в радиальном направлении. За плоскости симметрии малого объема при этом принимаются плоскости, перпендикулярные радиальному r и тангенциальному t (по отношению к годичным слоям) направлениям, и плоскость, перпендикулярная направлению волокна a (рис. 2).

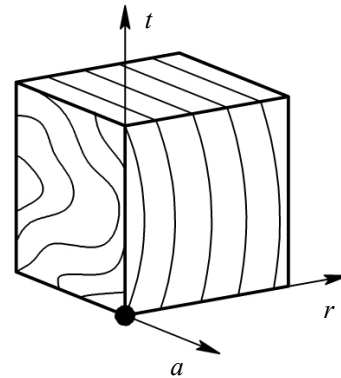


Рис. 2. Плоскости упругой симметрии малого объема древесины

Основное соотношение между напряжением и деформацией для упругих анизотропных материалов, в том числе и древесины, в матричной форме имеет вид [1, 4]:

$$\{\varepsilon\} = [D]\{\sigma\}, \quad (1)$$

где $\{\varepsilon\}$ – вектор деформаций; $[D]$ – матрица податливости; $\{\sigma\}$ – вектор напряжений.

Матрица податливости для ортотропных материалов, имеющих три плоскости упругой симметрии, имеет вид [4]

$$[D] = \begin{bmatrix} 1/E_r & -\mu_r/E_r & -\mu_{ar}/E_r & 0 & 0 & 0 \\ -\mu_r/E_r & 1/E_t & -\mu_{at}/E_t & 0 & 0 & 0 \\ -\mu_{ra}/E_a & -\mu_{ta}/E_a & 1/E_a & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{rt} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{ta} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{ar} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где E – модуль упругости; μ – коэффициент поперечной деформации; G – модуль сдвига.

В соответствии с ГОСТ 16483.29-73 [5] и ГОСТ 16483.30-73 [6] первый индекс μ указывает направление поперечной деформации ε , второй – направление вызвавшего ее напряжения σ . Двойные индексы G соответствуют направлениям осей симметрии, между которыми происходит изменение прямого угла. Индекс a указывает направление вдоль волокон древесины, r – радиальное направление поперек волокон, t – тангенциальное направление поперек волокон.

Из 12 упругих постоянных, входящих в матрицу податливости (2), только 9 являются независимыми, так как в силу симметрии матрицы правой части [4] для ортотропных тел всегда выполняются следующие условия:

$$\frac{\mu_{ra}}{E_a} = \frac{\mu_{ar}}{E_r}, \quad \frac{\mu_{ta}}{E_a} = \frac{\mu_{at}}{E_t}, \quad \frac{\mu_{tr}}{E_r} = \frac{\mu_{rt}}{E_t}. \quad (3)$$

Этим соотношениям, с хорошей степенью точности, соответствуют экспериментальные

данные, полученные на малых чистых образцах для сосны [1] и березы [3].

При достаточно больших размерах сечений деталей и отсутствии правильной их ориентации по отношению к годичным слоям направление волокон древесины условно считается осью симметрии ее строения, а плоскость, перпендикулярная этой оси, – плоскостью изотропии всех ее свойств. В этом случае предполагается, что для всех направлений, лежащих в плоскости, перпендикулярной волокнам, механические свойства одинаковы. Следовательно, учитываются только различия между свойствами вдоль и поперек волокон (рис. 3). На допущении о поперечной (трансверсальной) изотропии основано рассмотрение древесины в строительных деревянных конструкциях и источниках [7, 8]. Эта расчетная схема более проста, чем схема ортогональной анизотропии, и применима к более широкому классу задач, в том числе и ко всем случаям неопределенной ориентации по отношению к направлениям r и t . Вместе с тем рассмотрение древесины как материала поперечно изотропного приводит к большей схематизации явления, менее полно отражает действительный характер анизотропии древесины и в этом уступает предположению об ортогональной анизотропии.

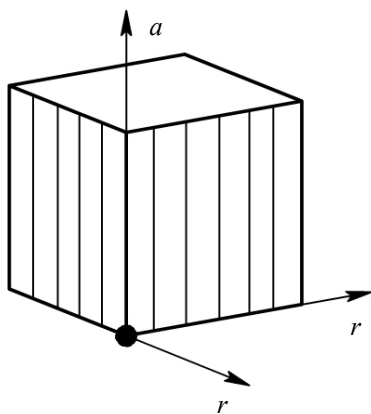


Рис. 3. Плоскости упругой симметрии большого объема древесины

Следует отметить, что у трансверсально-изотропного тела 5 независимых упругих постоянных, входящих в матрицу податливости (2), т. к. выполняются следующие соотношения [1]:

$$\frac{1}{E_t} = \frac{1}{E_r}; \quad -\frac{\mu_{ar}}{E_r} = -\frac{\mu_{ra}}{E_a} = -\frac{\mu_{ta}}{E_a} = -\frac{\mu_{at}}{E_t};$$

$$\frac{1}{G_{ta}} = \frac{1}{G_{ar}}; \quad G_{rt} = \frac{E_r}{2(1 + \mu_{rt})}. \quad (4)$$

Схема ортогональной и трансверсальной анизотропии механических свойств материалов

может быть реализована в таких САЕ-системах, как ANSYS, COSMOS, MSC/NASTRAN, ИСПА, T-FLEX/Анализ и др. При назначении свойства древесины следует выбрать трехмерный ортотропный элемент и указать механические свойства материалов в трех направлениях.

Заключение. При расчете большинства столярных конструкций и их элементов наиболее широко используется схема трансверсальной изотропии. Схема ортогональной анизотропии применяется в основном при разработке методов испытаний древесины и определении ее механических показателей. Практическое использование схемы цилиндрической анизотропии при расчете столярных конструкций и их элементов целесообразно в случае, когда нельзя пренебречь кривизной годичных слоев, например, при анализе формоустойчивости изделий из древесины и их конструктивных элементов при усушке и разбухании [9].

Литература

1. Ашкенази, Е. К. Анизотропия древесины и древесных материалов / Е. К. Ашкенази. – М.: Лесная пром-сть, 1978. – 223 с.
2. Соболев, Ю. С. Древесина как конструкционный материал / Ю. С. Соболев. – М.: Лесная пром-сть, 1979. – 248 с.
3. Уголев, Б. Н. Древесиноведение с основами лесного товароведения: учеб. для лесотехнических вузов / Б. Н. Уголев. – 3-е изд. – М.: МГУЛ, 2001. – 340 с.
4. Лехницкий, С. Г. Теория упругости анизотропного тела / С. Г. Лехницкий. – М.: Наука, 1977. – 415 с.
5. Древесина. Метод определения коэффициентов поперечной деформации: ГОСТ 16483.29-73. – Введ. 01.01.1975. – М.: Госстандарт России: Изд-во стандартов, 1999. – 6 с.
6. Древесина. Метод определения модулей сдвига: ГОСТ 16483.30-73. – Введ. 01.01.1975. – М.: Госстандарт России: Изд-во стандартов, 1999. – 6 с.
7. Деревянные конструкции. Строительные нормы проектирования: ТКП 45-5.05-146-2009 – Введ. 01.01.2010. – М.: Минстройархитектуры Респ. Беларусь: Стройтехнорм, 2009. – 63 с.
8. Строительные нормы и правила. Деревянные конструкции: СНиП II-25-80. – Введ. 01.01.1982. – М.: Госстандарт России: ГП ЦПП, 1995. – 34 с.
9. Пардаев, А. С., Обеспечение формоустойчивости неоднородных массивов древесины с учетом цилиндрической анизотропии их элементов при усушке и разбухании: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.21.05 / А. С. Пардаев; Белорус. гос. технол. ун-т. – Минск, 2008. – 21 с.

Поступила 14.03.2011