

А. С. Пардаев, ассистент, С. П. Трофимов, канд. техн. наук, доцент, БГТУ

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ НЕОДНОРОДНЫХ МАССИВОВ ДРЕВЕСИНЫ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ НАГРУЗОК И ВОЗДЕЙСТВИЙ

The mathematical model of mixed wood was elaborated describing processes of deformation in the process of shrinkage and swelling based on cylindrical anisotropy of wood physical and mechanical characteristics. It was elaborated a system of quality performance estimation of stress-strain behavior of mixed woods at the process design stage in the process of shrinkage and swelling permitting to solve problems of increasing their shape stability.

Введение. Производства столярно-строительных, мебельных и других изделий из древесины развиваются быстрыми темпами в Республике Беларусь и странах СНГ. Они являются крупными потребителями древесины и характеризуются большими объемами выпуска продукции.

Основными конструктивными элементами столярных изделий (СИ) являются бруски и щиты (цельные и клееные). Клееные, в свою очередь, представляют собой множество однородных (по геометрическим характеристикам) и в то же время неоднородных (по физико-механическим свойствам) элементов, образующих единое целое, так называемый неоднородный массив древесины (НМД).

Древесина является материалом гигроскопичным, изменяющим свою влажность, размеры и форму под влиянием условий окружающей среды, что может приводить к снижению качества изделий на стадии их производства, транспортировки, хранения и эксплуатации. Изменение формы и размеров, превышающих регламентированные нормы на изделие, в процессе производства снижает эффективность сборочных операций и качество готовой продукции.

Прогресс в области информационных технологий и компьютерных средств моделирования изделий и процессов производства [1] расширяет возможности исследования напряженно-деформированного состояния конструкций, прежде всего, посредством метода конечных элементов (МКЭ) [2, 3], разработки и внедрения новых и эффективных методик расчета и оптимизации объектов проектирования.

Исследования, направленные на совершенствование конструкции НМД на основе моделирования его деформаций при усушке и разбухании, с учетом анизотропии физико-механических свойств древесины представляют большой практический интерес и являются актуальной научной задачей.

Целью данной работы является разработка математической модели деформаций НМД, возникающих при усушке и разбухании, а также научно обоснованной методики оценки показателей качества деформативности НМД, позволяющей на стадии конструирования объекта учесть изменение влажностного состояния

НМД и его элементов в процессах производства, хранения и эксплуатации изделий.

Основная часть. При разработке модели НМД принята криволинейная расчетная схема физико-механической анизотропии древесины на основе цилиндрической системы координат (рис. 1), которая позволила учесть структурные особенности этого материала при рассмотрении процессов усушки и разбухания.

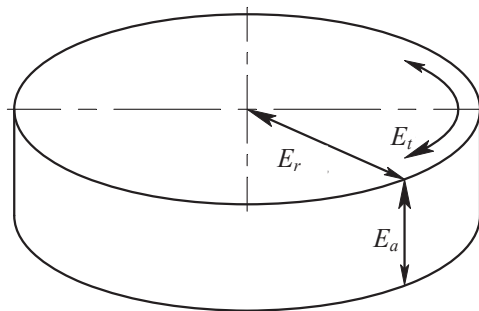


Рис. 1. Схема цилиндрической анизотропии древесины

Математическое описание модели деформаций НМД проведено на основе теории упругости и МКЭ.

В процессе разработки модели принято: связь между напряжениями и деформациями осуществляется через упругие постоянные на базе теории упругости анизотропного тела; параметры, характеризующие физико-механические свойства древесины, заданы с учетом цилиндрической системы координат (модуль упругости вдоль волокон, в тангентальном и радиальном направлениях, соответственно E_a , E_t , E_r ; модуль сдвига соответственно G_a , G_b , G_r ; коэффициенты поперечной деформации μ_{ra} , μ_{ar} , μ_{ta} , μ_{at} , μ_{tr} , μ_{rt} ; коэффициенты усушки и разбухания вдоль волокон в тангентальном и радиальном направлениях соответственно K_a , K_b , K_r); все нагрузки являются установившимися во времени.

Вектор деформаций НМД на примере однослойного щита (рис. 2) в глобальной системе координат x, y, z , рассмотрен с учетом неоднородной усушки и разбухания древесины, а также упругих свойств древесины и клееного слоя в следующем виде:

$$\{\varepsilon\} = \{\varepsilon'_u\} + \{\varepsilon'_w\} + \{\varepsilon'_{ku}\},$$

где $\{\varepsilon'_u\}$ – вектор упругих деформаций древесины, преобразованный от цилиндрической r_i, t_i, a_i системы координат к общей для всей конструкции – глобальной (декартовой) системе координат;

$\{\varepsilon'_w\}$ – вектор влажностных деформаций древесины, преобразованный к глобальной системе координат;

$\{\varepsilon'_{ku}\}$ – вектор упругих деформаций клевого слоя.

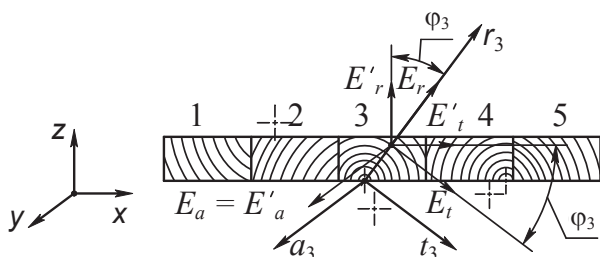


Рис. 2. Схема НМД однослойной щитовой конструкции с указанием глобальной x, y, z и цилиндрической r_i, t_i, a_i систем координат

Преобразование от цилиндрических систем координат каждого элемента НМД в отдельности r_i, t_i, a_i ($i = 1, 2, \dots, n$, где n – количество элементов НМД) в общую глобальную систему координат x, y, z осуществляли путем введения переменной для каждой точки поперечного сечения элемента НМД величины φ (угол между осями цилиндрической и глобальной систем координат) и последующего преобразования упругих и влажностных постоянных.

Исходя из допущения о существовании упругого потенциала, матрицу податливости для древесины, входящую в основное соотношение между напряжением и деформацией, рассматривали преобразованной к симметричному виду [4]. Учет зависимости физико-механических характеристик древесины от влажности осуществлен в соответствии с ГОСТ 16483.24-73–ГОСТ 16483.30-73. Матрица податливости клея рассмотрена с учетом предположения изотропии механических свойств клевого слоя.

Разработанная модель деформаций НМД в совокупности с методами и средствами компьютерного моделирования позволила дать качественную и количественную оценку влияния каждого из варьируемых факторов (физико-механических свойств и геометрических характеристик элементов массива), учесть взаимодействие элементов НМД, рассчитать деформированное состояние конструкции в целом и прогнозировать показатели качества изделия (волнистость, покوروبленность и др.).

Разработка методики оценки показателей качества НМД, связанных с деформациями при

усушке и разбухании, проведена на основе предложенной математической модели и теории раскроя бревен на пиломатериалы.

Сущность разработанной методики оценки показателей качества НМД заключается в расчете его деформаций при усушке и разбухании, которая позволяет на стадии составления схемы раскроя бревен на пиломатериалы учесть изменение влажностного состояния НМД и его элементов в процессах производства и эксплуатации изделий [5].

При моделировании осуществляется замена НМД на дискретную математическую модель, представляющую собой совокупность элементарных объемов заданной формы (конечных элементов), которые связаны между собой в граничных точках. Нагрузки и воздействия (механические, влажностные), условия закрепления модели НМД, а также расчет его деформаций в узлах конечных элементов производится в соответствии с общими положениями МКЭ.

Для определения исходных данных модели НМД необходимо составить схемы раскроя бревен на пиломатериалы, определить местоположение досок относительно сердцевины (рис. 3, а) в поставе на распиловку, что позволит указать положение цилиндрических систем координат анизотропии физико-механических свойств элементов массива (рис. 3, б) в его модели.

Результатом расчета деформированного состояния НМД (например, однослойного щита, рис. 3, б) является поле перемещений узлов его конечно-элементной модели в поперечном сечении по толщине щита (рис. 4, с указанием первоначальной формы щита и максимальной стрелы прогиба).

Методика расчета реализована с использованием компьютерной программы конечно-элементного анализа на примере НМД. Операции, характерные для расчетов влажностных деформаций деревянных конструкций (построение геометрической модели массивов из древесины, определение анизотропных свойств материала с учетом коэффициента усушки и разбухания, наложение граничных условий при изменении влажностного состояния деревянной конструкции) отсутствуют в распространенных системах конечноэлементного анализа. Данные операции были реализованы с помощью разработанных авторами пользовательских программ (макросов) на языке APDL, которые позволяют при необходимости создать параметрическую модель НМД и автоматически произвести расчет его деформаций при усушке и разбухании.

Проверка соответствия разработанной модели элемента НМД ее реальному объекту проведена на основе сравнения результатов расчета деформированного состояния элемента массива из древесины сосны с результатами,

полученными в ходе эксперимента, и известными аналитическими решениями.

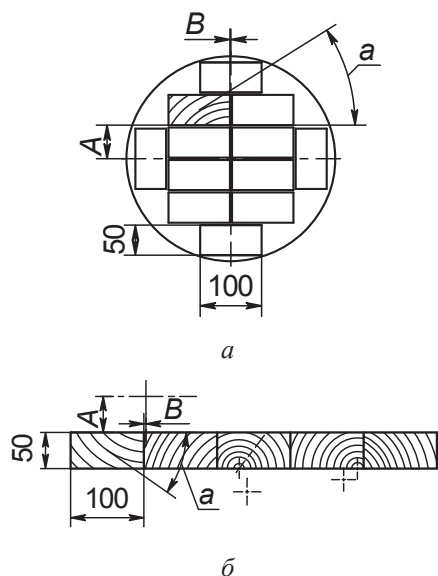


Рис. 3. Схема учета местоположения доски в поставе на распиловку относительно сердцевины при построении модели НМД
 а – схема раскроя бревна на пиломатериалы целевого назначения сечением 50×100 мм;
 б – геометрическая модель конструкции НМД в виде однослойного щита

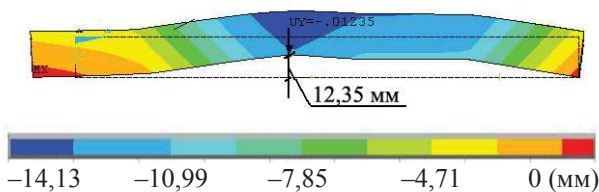


Рис. 4. Изображение поля перемещений на модели однослойного щита по его толщине при увеличении влажности древесины с 8% до 30%

В ходе проверки соответствия исследована поперечная покоробленность элемента НМД, на нижней пласти которого находится сердцевина. При этом определялась максимальная стрела прогиба образца при его усушке. Образцы, изготовленные из доски влажностью более 30% и обработанные на калибровально-шлифовальном оборудовании, были высушены в камере SECOMAT-2 до средней влажности 7%. По окончании сушки был проведен замер максимальной стрелы прогиба образцов с помощью индикатора часового типа ИЧ-10, укрепленного на движке линейки.

В ходе анализа результатов проверки модели установлено, что разработанная модель элемента НМД, по усредненным показателям с погрешностью не более 1%, соответствует известным аналитическим решениям [6, с. 93] и с погрешностью 10% соответствует аналогичным показателям по реальному объекту с уче-

том изменения его влажности по сечению. Поскольку физико-механические показатели древесины, являющиеся исходными данными модели, варьируются в широких пределах (10–28%), принятая модель анизотропии и методика оценки поперечной деформации элемента НМД адекватно отражает изменения формы и размеров древесины при усушке.

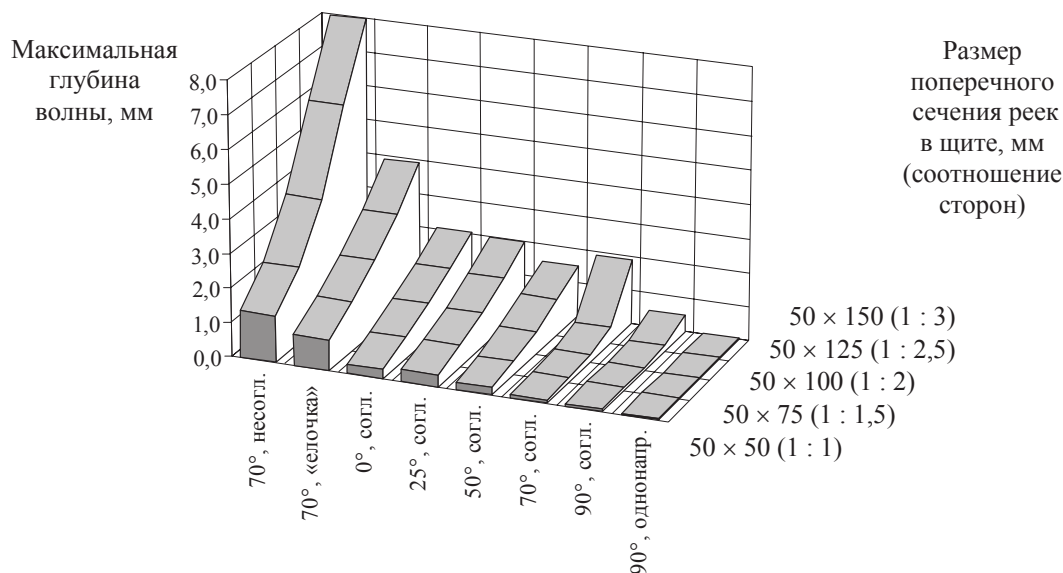
Проверка модели деформативности НМД при разбухании проведена путем сопоставления результатов расчета деформированного состояния НМД с результатами эксперимента. В ходе проверки соответствия исследована поперечная деформация НМД щитовой конструкции. При этом определялась максимальная стрела прогиба на поверхности НМД при разбухании.

Анализ результатов проверки показал, что расчет максимальной стрелы прогиба, произведенный в соответствии с разработанной моделью НМД, с погрешностью не более 10% соответствует аналогичному показателю по реальному объекту, что с достаточной степенью точности для решения производственных задач позволяет определить изменения формы и размеров НМД при разбухании.

С использованием разработанной модели НМД и методики оценки показателей качества исследована деформация однослойного щита в условиях его увлажнения для следующих соединений по кромке: на рейку, в паз и гребень, на гладкую фугу, на зубчатый шип. Установлено, что деформативность однослойного щита в условиях повышенной влажности практически не зависит от типа соединения. Растягивающие напряжения, возникающие в древесине и не превышающие предельно допустимых значений, характерны только для соединения на гладкую фугу. Особое внимание следует обратить на касательные напряжения, возникающие в клеевой прослойке. Они превышают предельно допустимые и характерны для всех типов соединений, однако носят локальный характер и разрушающее воздействие на конструкцию щита не оказывают.

В результате исследования влияния размеров поперечного сечения, ориентации годовичных слоев в рейках и их компоновки на деформативность щита установлено: при увеличении соотношения сторон поперечного сечения рейки с 1 : 1 до 1 : 3 (для щита толщиной 50 мм) максимальная глубина волны увеличивается более чем в 4 раза; при изменении угла наклона годовичных слоев в рейках щита с 0° до 90° максимальная глубина волны увеличивается более чем в 10 раз; в зависимости от принятой схемы ориентации годовичных слоев в смежных рейках максимальная глубина волны может различаться более чем в 15 раз.

Зависимость максимальной глубины волны щита от размеров поперечного сечения реек, угла наклона годовичных слоев и схемы компоновки реек в щите представлена на рис. 5.



Угол наклона годовичных слоев, схема компоновки реек в щите

Рис. 5. Влияние размеров поперечного сечения реек, угла наклона годовичных слоев и схемы компоновки реек в щите толщиной 50 мм на максимальную глубину волны на его поверхности

В результате исследования влияния клеевых композиций на деформированное состояние щита установлено, что при разбухании древесины механические характеристики отвержденного клеевого слоя не оказывают существенного влияния на деформацию конструкции.

Заключение. Для обеспечения формоустойчивости НМД, эксплуатируемых в условиях переменной влажности, необходимо принимать следующие конструктивные решения:

- соотношение сторон в поперечном сечении ламелей не должно быть более чем 1 : 3;
- угол наклона годовичных слоев в торце ламели должен быть не менее 45°, т. е. для изготовления щитов следует использовать радиальные пиломатериалы;
- ориентация годовичных слоев в смежных ламелях должна быть согласованной. Это означает, что при формировании НМД смежные ламели следует укладывать поочередно внутренней (обращенной к сердцевине) и внешней пластью вниз;
- наилучшим вариантом является использование строго радиальных пиломатериалов с углом наклона годовичных слоев, близким к 90° при однонаправленной схеме ориентации годовичных слоев в смежных ламелях. В этом случае допускается увеличение соотношения сторон в поперечном сечении ламели до 1 : 4.

Литература

1. Пижурин, Ан. А. Основы научных исследований в деревообработке: учеб. для ВУЗов /

Ан. А. Пижурин, Ал. А. Пижурин – М.: МГУЛ, 2005. – 305 с.

2. Kent, L. L. ANSYS Tutorial Releases 10 / L. L. Kent. – University of Texas at Arlington: SDC Publications. – 2006.

3. Zamani, N. G. CATIA V5 Finite element method Tutorials Release 17 / N. G. Zamani. – University of Windsor: SDC Publications, – 2005.

4. Пардаев, А. С. Моделирование физико-механических свойств древесины при конечно-элементном анализе столярных изделий / А. С. Пардаев // Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века: труды III Междунар. евразийского симпози., Екатеринбург, 30 сентября – 3 октября 2008 г. / Уральский гос. лесотехн. ун-т; науч. ред. В. Г. Новоселов. – Екатеринбург, 2008. – С. 77–83.

5. Пардаев, А. С. Оценка качественных показателей деформативности изделий из древесины на основе моделирования нагрузок и воздействий / А. С. Пардаев // Ресурсо- и энергосберегающие технологии и оборудование, экологически безопасные технологии: материалы докл. Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 19–20 ноября 2008 г.: в 2 ч. / Белорусский гос. техн. ун-т; редкол.: И. М. Жарский [и др.]. – Минск: БГТУ, 2008. – Ч. 2. – С. 277–28

6. Уголев, Б. Н. Древесиноведение с основами лесного товароведения: учеб. для лесотехнических вузов / Б. Н. Уголев. – 5-е изд. – М.: МГУЛ, 2007. – 340 с.