

## КОНСТРУКЦИОННЫЙ АНАЛИЗ СОЕДИНЕНИЙ ПО КРОМКЕ В СТОЛЯРНЫХ ЩИТАХ, ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ В УСЛОВИЯХ ПОВЫШЕННОЙ ВЛАЖНОСТИ

The computer simulation and research of joiner's items is considered on the basis of a finite element method during designer preparation of production. The estimation analytical, numerical methods and available software is given. The methodical principles of simulation and realization of a finite element method for the analysis of a construction of joiner's items with application of systems CAE of automation of engineering accounts are stated.

**Введение.** При изготовлении столярных изделий детали и узлы составляют основу их конструкции. Вследствие этого к столярным соединениям предъявляют достаточно высокие требования, так как от прочности их изготовления зависят эффективность сборочных операций и качество готовых изделий.

Основные положения, применяемые при конструировании и расчетах столярных изделий, а также их соединений, приведены в работах Н. М. Белякова, В. А. Давиденко, В. И. Королева, А. И. Отрешко, П. И. Демешина и др.

Анализ данных работ показывает, что в настоящее время конструкционный анализ столярных соединений и рекомендации по их применению, как правило, связаны с общими положениями по расположению годичных слоев в смежных деталях и относительной прочностной характеристикой соединений. Например, при склеивании заготовок в щиты необходимо, чтобы склеивались одноименные поверхности по расположению годичных слоев, а смежные поверхности, образующие пласти заготовок после склеивания, были различными [1], [2]. Также во избежание коробления щиты укрепляют шпонками, вклеенными и наклеенными рейками. Для большей формоустойчивости щиты склеивают из трех или пяти однослойных щитов с взаимно перпендикулярным направлением волокон [1].

Следует также отметить недостаточное развитие комплексных расчетных методов столярных изделий и их конструктивных элементов, позволяющих оценить прочность конструкции на стадии проекта.

В настоящее время традиционные способы оценки прочности все больше уступают место подходам, основанным на численных методах. Это связано с внедрением в процесс разработки изделий САД-систем, усложнением геометрии конструкций с одновременным ужесточением требований к их прочности, а также снижением сроков, отводимых на подготовку производства изделий.

Применение компьютерного математического моделирования в процессе проектирования позволяет найти параметры, наиболее удовлетворяющие назначению будущего изделия,

и оценить их в соответствии с предполагаемыми условиями эксплуатации. Проведение подобных испытаний с помощью компьютерных технологий позволяет сократить число дорогих натуральных испытаний, а иногда и вовсе их устранить.

В большинстве современных систем конечно-элементного анализа (например, ANSYS, NASTRAN, ADAMS и им подобных) численный анализ реализован с помощью метода конечных элементов (МКЭ) [3]. МКЭ позволяет практически полностью автоматизировать расчет конструкций, хотя, как правило, требует выполнения большего количества вычислительных операций по сравнению с классическими методами механики. Однако в современных условиях развития ЭВМ большой объем вычислений не является серьезной проблемой, и в связи с этим МКЭ получил широкое распространение.

Цель данной работы заключается в определении напряженно-деформированного состояния столярных щитов, эксплуатируемых в условиях повышенной влажности на основе МКЭ.

**Постановка задачи.** В соответствии с целью работы сформулированы основные задачи исследований:

- определить деформации и напряжения, возникающие как в самом щите, так и в его конструктивных составляющих, с помощью существующих программ конечно-элементного (КЭ) анализа;
- провести сравнительный конструкционный анализ следующих соединений по кромке: на рейку, в паз и гребень, на гладкую фугу [4], на зубчатый шип [5].
- сформулировать рекомендации по применению расчетов с использованием КЭ анализа в проектной практике.

Предметом исследования является напряженно-деформированное состояние столярных щитов, эксплуатируемых в условиях повышенной влажности.

Объектом исследования является соединение по кромке в однослойных столярных щитовых конструкциях.

**Описание конструкции.** Клееный щит состоит из трех ламелей древесины сосны полу-

радиальной распиловки 28×78×150 мм, соединенных между собой по длине. Схема расположения годичных слоев в смежных ламелях принята с учетом рекомендаций [1]. Толщина клеевого слоя принята исходя из рекомендуемого расхода для клеевой композиции на основе поливинилацетатной дисперсии (ПВАД) и составляет 0,014 мм. Расчетное увеличение влажности древесины составляет 10%. Размеры деталей в соединении на рейку, в паз и гребень, на гладкую фугу приняты в соответствии с ГОСТ 9330–76, на зубчатый шип – ГОСТ 19414–90.

**Метод и результаты расчета.** Исследования проводились на базе теории упругости, сопротивления материалов и метода конечных элементов.

При использовании МКЭ рассчитываемая конструкция представляется в виде совокупности простых геометрических объектов – конечных элементов (КЭ), для каждого из которых заранее определен вид функциональной зависимости распределения перемещений в этом элементе от перемещений в его узлах. Узлы обеспечивают соединение элементов между собой, их перемещения определяют напряженно-деформированное состояние конструкции в целом.

Для каждого КЭ можно задать следующую зависимость между смещениями и силами в узлах:

$$F = [K]u + [D]u' + [M]u'', \quad (1)$$

где  $F$  – вектор, определяющий значения сил в узлах конечного элемента;  $[K]$ ,  $[D]$  и  $[M]$  – соответственно матрицы жесткости, демпфирования и масс конечного элемента;  $u$ ,  $u'$  и  $u''$  – векторы, определяющие соответственно значения смещений в узлах конечного элемента, а также его первые и вторые производные по времени.

В случае статической задачи все компоненты векторов  $u'$  и  $u''$  являются нулевыми и уравнение (1) сводится к следующему:

$$F = [K]u. \quad (2)$$

Приравняв к нулю сумму сил, действующих на каждый из узлов КЭ модели и выразив данные силы через смещения узлов в соответствии с (1) и (2), можно получить систему уравнений, содержащую в качестве неизвестных смещения узлов и найти их значения путем решения этой системы.

В процессе моделирования и анализа конструкции столярного щита приняты следующие допущения:

- рассматривается линейное поведение древесного материала и клеевой прослойки под действием внешних воздействий (набухание древесины в следствии ее увлажнения);

- тип деформации – упругая;
- скорость деформации не влияет на поведение конструкции;
- деформация после снятия нагрузки не сохраняется;
- закон поведения материала – закон Гука (древесного – ортотропный, клеевого – изотропный);
- все нагрузки являются установившимися во времени.

Конструкционный анализ объекта исследования состоит из трех стадий: препроцессорная подготовка, получение решения и постпроцессорная обработка.

Рассмотрим пример анализа клееного щита из древесины с соединением по кромке в паз и гребень.

На стадии препроцессорной подготовки построена твердотельная модель щита (разработана на базе существующих систем автоматизированного проектирования, рис. 1) и заданы необходимые для решения исходные данные. Выбраны координатные системы ЛСК1, ЛСК2, ЛСК3 для последующего указания расположения годичных слоев в ламелях расчетной модели (рис. 1). Заданы тип конечных элементов (трехмерный конечный элемент с 20 узлами, рис. 2) и параметры, характеризующие физико-механические свойства древесины и клеевой прослойки (ортотропные свойства материала заданы с учетом цилиндрической системы координат, рис. 3). Для древесины сосны: модуль упругости вдоль волокон, поперек волокон в тангентальном и радиальном направлениях соответственно  $E_z$ ,  $E_\theta$ ,  $E_r$ ; модуль сдвига соответственно  $G_z$ ,  $G_\theta$ ,  $G_r$ ; коэффициент разбухания вдоль волокон, поперек волокон в тангентальном и радиальном направлении соответственно  $K_z$ ,  $K_\theta$ ,  $K_r$  [6]. Для клея на основе ПВАД приняты: модуль упругости  $E$ , коэффициент Пуассона  $\mu$ , коэффициент разбухания клея  $U$ , толщина клеевого слоя  $T$  [7], [8]. Далее сгенерирована регулярная сетка КЭ (содержит элементы исключительно шестигранной формы и позволяющая провести расчет ортотропных материалов с большей точностью). В узлах КЭ задана начальная влажность недеформированного щита и ее расчетное изменение. Предложенная схема закрепления (рис. 4) позволяет обеспечить условия, близкие к реальной конструкции.

Далее с учетом принятых допущений заданы статический вид анализа, его опции и шаг решения. Затем произведен расчет конечно-элементной задачи.

Результаты решения включают в себя значения перемещений, напряжений и деформаций, представленные в графическом виде: для соединения в паз и гребень – рис. 5–6, на рейку – рис. 7, на гладкую фугу – рис. 8, на зубчатый шип – рис. 9.

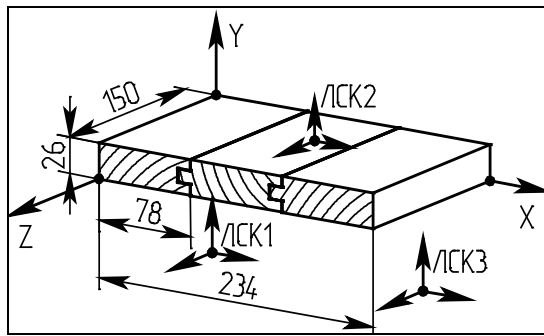


Рис. 1. Твёрдотельная модель клееного щита из древесины с соединением в паз и гребень

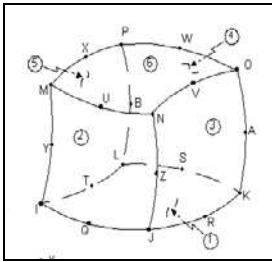


Рис. 2. Форма конечного элемента в виде параллелепипеда

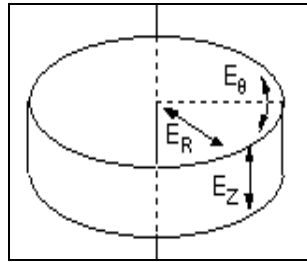


Рис. 3. Координатная система с указанием направлений анизотропии свойств материала

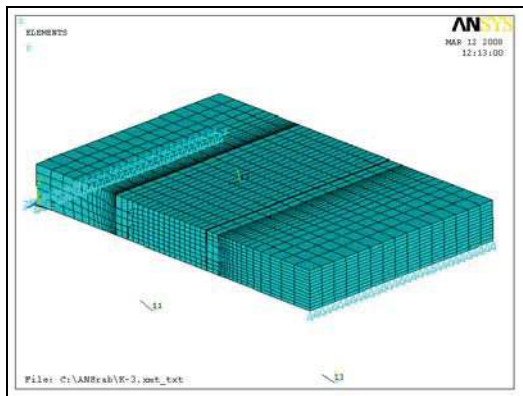


Рис. 4. Результат генерации объемной конечно-элементной сетки, приложения нагрузок и граничных условий к модели щита

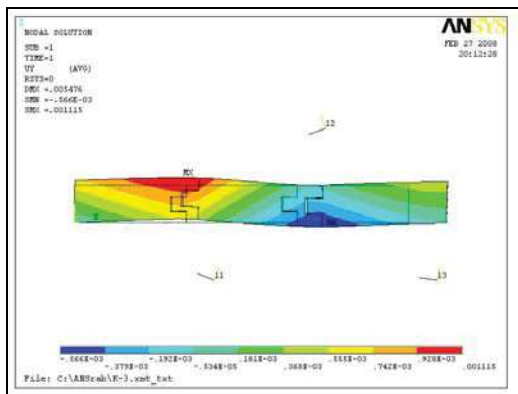


Рис. 5. Деформации, возникающие в щите под действием набухания древесины в направлении  $Y$  с указанием исходного недеформированного состояния (соединение ламелей в паз и гребень)

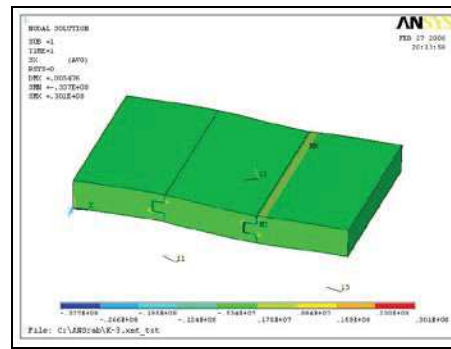


Рис. 6. Распределение напряжений в направлении  $X$ , возникающих в древесине под действием ее набухания (соединение ламелей в паз и гребень)

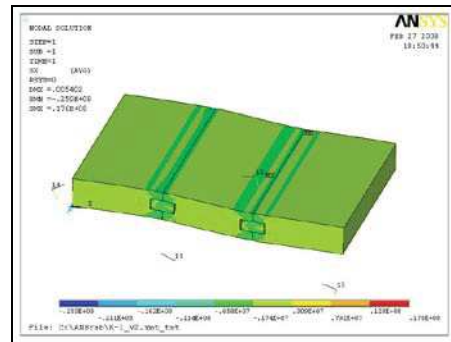


Рис. 7. Распределение напряжений в направлении  $X$ , возникающих в древесине (соединение ламелей на рейку)

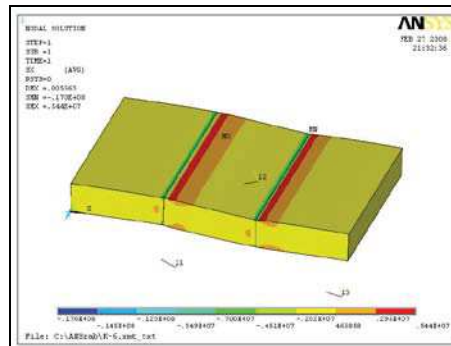


Рис. 8. Распределение напряжений в направлении  $X$ , возникающих в древесине (соединение ламелей на гладкую фугу)

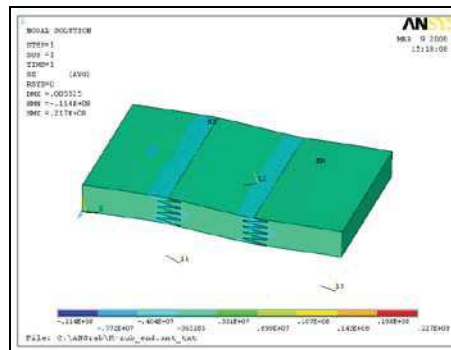


Рис. 9. Распределение напряжений в направлении  $X$ , возникающих в древесине (соединение ламелей на зубчатый шип)

Результаты расчета максимальных напряжений и деформаций соединений по кромке представлены в виде объемной гистограммы с накоплением (рис. 10–11).

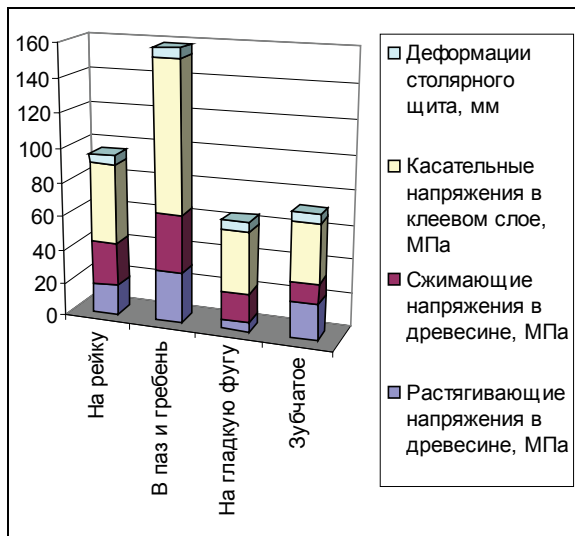


Рис. 10. Гистограмма максимальных напряжений и деформаций в направлении X (по ширине щита), возникающих в его конструктивных элементах под действием набухания древесины

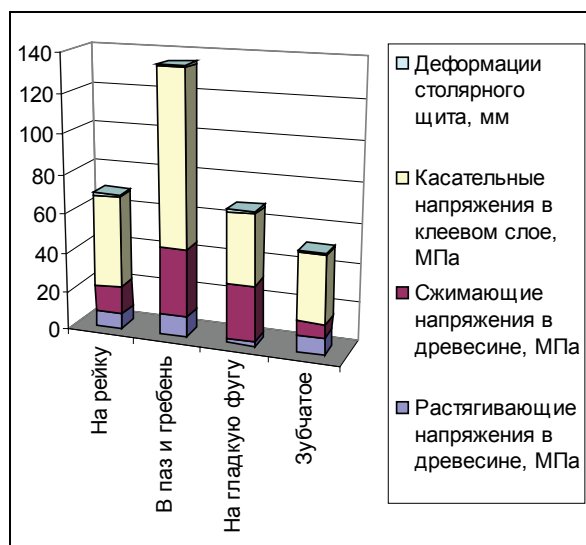


Рис. 11. Гистограмма максимальных напряжений и деформаций в направлении Y (по толщине щита), возникающих в его конструктивных элементах под действием набухания древесины

Из анализа гистограмм следует, что деформативность массивных щитов из древесины, эксплуатируемых в условиях повышенной влажности, практически не зависит от типа соединения, однако существенно зависит от выбранного направления годичных слоев и их относительного расположения [9]. Растягивающие напряжения, возникающие в древесине, не превышающие предельно допустимые, характерны только для соединения на гладкую фугу. Особое внимание следует обратить на

касательные напряжения, возникающие в клеевой прослойке. Они превышают предельно допустимые в несколько раз и характерны для всех типов соединения. При указанных условиях задачи и принятых физико-механических свойствах древесных и клеевых материалов наиболее рациональным является соединение деталей по кромке на гладкую фугу.

**Выводы.** Проведено численное исследование соединений по кромке в столярных щитах, эксплуатируемых в условиях повышенной влажности.

Приведенный анализ щитовых конструкций показывает, что применение компьютерного математического моделирования позволяет выявить недостатки изделия на концептуальной стадии проекта и исправить их до начала изготовления и эксплуатации.

Предложенная методика моделирования столярных изделий может быть применена также для исследования прочности, надежности и безопасности других изделий из древесины и древесных материалов.

### Литература

1. Гончаров, Н. А. Технология изделий из древесины: учеб. для вузов / Н. А. Гончаров, В. Ю. Башинский, Б. М. Буглай. – 2-е изд. – М.: Лесная пром-сть, 1990. – 528 с.
2. Braun, J. The Encyclopedia of Woodworking Techniques / J. Braun. – USA: Quarto Publishing plc., 2003. – 180 p.
3. Зенкевич, О. С. Метод конечных элементов в тех нике / О. С. Зенкевич. – М.: Мир, 1975. – 541 с.
4. Основные соединения деталей из древесины и древесных материалов. Типы и размеры: ГОСТ 9330–76. – Введ. 01.07.1977. – М.: Госстандарт России: Изд-во стандартов, 2000. – 11 с.
5. Древесина клееная массивная. Общие требования к зубчатым клеевым соединениям: ГОСТ 19414–90. – Введ. 01.01.1991. – М.: Госстандарт России: Изд-во стандартов, 2000. – 6 с.
6. Уголев, Б. Н. Древесиноведение с основами лесного товар оведения / Б. Н. Уголев – М.: МГУЛ, 2001. – 340 с.
7. Волынский, В. Н. Технология клееных материалов: учеб. пособие для вузов / В. Н. Волынский. – 2-е изд. – Архангельск: АГТУ, 2003. – 280 с.
8. Pocius, Alphonsus V. Adhesion and Adhesives Technology / Alphonsus V. Pocius An Introduction. – 2nd Edition. – Hanser Publishers, Munich, Cincinnati, 2002. – 356 p.
9. Пардаев, А. С. Конечно-элементный анализ напряженно-деформированного состояния клееного щита из древесины / А. С. Пардаев // Архитектура и строительные науки. – 2008. – № 8. – С. 45–49.