

УДК 624.011.14; 625.142.21

**И. К. Божелко, О. К. Леонович, А. В. Ширко**  
Белорусский государственный технологический университет

### **ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ НЕСТАНДАРТНЫХ КЛЕЕННЫХ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ, ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ В ТЯЖЕЛЫХ УСЛОВИЯХ**

Разработана модель комбинированной шпалы, состоящей из двух брусев. Она учитывает анизотропию свойств древесины, наличие и расположение сердцевины; применение склеивания; колебания влажности древесины свыше 15%. Модель предполагает, что рассчитываемая конструкция представляется в виде совокупности конечных элементов, узлы которых обеспечивают соединение элементов между собой, а их перемещения определяют деформированное состояние конструкции в целом; связь между напряжениями и деформациями осуществляется через упругие постоянные на базе теории упругости анизотропного тела; параметры, характеризующие механические и физические свойства древесины, заданы с учетом цилиндрической системы координат; все нагрузки являются установившимися во времени; температурные деформации из-за их незначительной величины не учитываются. Разработанная модель была применена при расчете комбинированной деревянной сосновой шпалы второго типа для железных дорог широкой колеи. Из расчетов установлено, что возникновение трещин обусловлено влажностными колебаниями и анизотропией самой древесины. Под воздействием этих факторов в комбинированных шпалах возникают высокие напряжения, достигающие более 2 МПа, что является причиной возникновения глубоких трещин на боковой пластине. Напряжения концентрируются в плоскости расположения сердцевины, что и обуславливает появление трещины в этой же зоне. В верхней зоне сопряжения двух брусев возникает зазор. При перепаде влажности между пластинами в 15% возникающие нормальные напряжения достигают до 5,9 МПа, при 10% – 2,1 МПа, при 5% – 1,8 МПа. Полученные результаты свидетельствуют о необходимости обязательной влагозащитной обработки деревянных конструкций, эксплуатируемых в тяжелых условиях. Использование брусев без сердцевины позволяет снизить максимальные нормальные напряжения в 1,8 раза. Проведенные эксперименты подтвердили сопоставимость реального напряженно-деформированного состояния комбинированной шпалы с моделированным.

**Ключевые слова:** нестандартные деревянные конструкции, модель, метод конечных элементов, анизотропия, напряженно-деформированное состояние.

**I. K. Bozhelko, O. K. Leonovich, A. V. Shirko**  
Belarusian State Technological University

### **FEATURES OF FORMATION OF NON-STANDARD GLUED WOODEN STRUCTURES, HEAVY-DUTY**

The model combined sleepers was developed. It consists of two timbers. The model takes into account the anisotropy of the properties of wood, the presence and location of the core; use of gluing; fluctuations in wood moisture content above 15%. The model assumes that the calculated structure is represented as a set of finite elements, nodes which provide the connection between the elements themselves, and their movement is determined deformed state of the structure as a whole; relationship between stress and strain is carried out through the elastic constants on the basis of the anisotropic elasticity of the body; parameters characterizing the physical and mechanical properties of wood, set considering a cylindrical coordinate system; all loads are set the time; thermal deformation due to their small quantities are not taken into account. The developed model was applied in the calculation of the combined pine wooden sleepers of the second type for wide gauge railways. The calculations revealed that the occurrence of cracks caused by humid variations and anisotropy of the wood itself. Combined sleepers have a high stress, reaching more than 2 MPa with the influence of these factors. They are a cause of deep cracks in the side seams. Stresses concentrate in the plane of the core, which results in the appearance of cracks in the same area. Clearance arises in the upper area of the two coupling timbers. When the humidity difference between the formation in 15% of the normal stresses arising reach up to 5,9 MPa, at 10% – 2,1 MPa at 5% – 1,8 MPa. The results indicate the need for a mandatory waterproof wooden structures operating in harsh environments. Using the timbers without the core reduces the maximum normal stress is 1,8 times. The experiments confirmed the comparability of real stress-strain state of combined sleepers simulated.

**Key words:** non-standart wooden structures, model, finite element method, anisotropy, stress-strain state.

**Введение.** На сегодняшний день особый интерес в деревянных конструкциях, эксплуатируемых в условиях переменной влажности и на открытом воздухе, представляют клееные, комбинированные и армированные деревянные системы, позволяющие использовать тонкомерную древесину. Требования по формированию деревянных конструкций определяются ТКП 45-5.05-146-2009 (02250). Для изготовления деревянных конструкций нужно применять цельную и клееную древесину преимущественно хвойных пород. Древесину твердых лиственных пород следует использовать для нагелей, подушек и других ответственных деталей. Для несущих элементов деревянных конструкций должна применяться древесина 1-го, 2-го и 3-го сортов в соответствии с требованиями СТБ 1711–СТБ 1714, ГОСТ 11047, а также с учетом дополнительных требований:

а) ширина годичных слоев в древесине должна быть не более 5 мм, а содержание в них поздней древесины – не менее 20%;

б) в заготовках из пиломатериалов 1-го и 2-го сортов для крайней растянутой зоны (на 0,15 высоты сечения) клееных изгибаемых элементов и в досках 1–3-го сортов толщиной 60 мм и менее, работающих на ребро при изгибе или на растяжение, не допускается наличие сердцевины.

Деревянные конструкции должны удовлетворять требованиям расчета по несущей способности (I группа предельных состояний) и по деформациям, не препятствующим нормальной эксплуатации (II группа предельных состояний), с учетом характера и длительности действия нагрузок и воздействий.

Максимальная влажность клееной деревянной конструкции – 15%. Клееная древесина должна соответствовать требованиям СТБ 1722, EN 386. Толщина склеиваемых слоев в элементах допускается толщина слоев до 42 мм при условии устройства в них продольных прорезей. Рекомендуемые марки клеев – резорциновый ФР-12, фенольно-резорцинового ФРФ-50.

Однако в существующих нормативных документах не отражен ряд ключевых моментов по оценке влияния на деревянные клееные конструкции следующих факторов:

- соотношения и расположения ядра и заболони;
- анизотропии свойств древесины и наличия сердцевины;
- использования склеиваемых слоев толщиной более 42 мм (ряд конструкций предусматривает только такие соединения);
- применения защитных средств и способа пропитки ими;

- применения альтернативных клеевых систем с различными материалами;

- колебания влажности древесины свыше 15%.

Для расширения ассортимента деревянных конструкций, сфер их использования и оптимизации технологии необходимо прогнозирование их напряженно-деформированного состояния (НДС) с учетом вышеизложенных факторов.

**Основная часть.** Для решения поставленной задачи предлагается использовать моделирование деревянных конструкций с учетом анизотропии древесины, усушки и разбухания на основе уравнений теории упругости, решаемых численно методом конечных элементов (КЭ).

Модель предполагает, что:

- рассчитываемые конструкции представляются в виде совокупности КЭ, узлы которых обеспечивают соединение элементов между собой, а их перемещения определяют деформированное состояние конструкции в целом;

- связь между напряжениями и деформациями осуществляется через упругие постоянные на базе теории упругости анизотропного тела;

- параметры, характеризующие механические свойства древесины, заданы с учетом цилиндрической системы координат: модуль упругости вдоль волокон, поперек волокон в тангенциальном и радиальном направлениях соответственно  $E_z$ ,  $E_x$ ,  $E_y$ , модуль сдвига соответственно  $G_{yz}$ ,  $G_{xz}$ ,  $G_{xy}$ , коэффициент поперечной деформации (коэффициент Пуассона)  $\nu_{yz}$ ,  $\nu_{zy}$ ,  $\nu_{xz}$ ,  $\nu_{zx}$ ,  $\nu_{xy}$ ,  $\nu_{yx}$ ;

- параметры, характеризующие физические свойства древесины, также заданы с учетом цилиндрической системы координат: коэффициенты усушки вдоль волокон, поперек волокон в тангенциальном и радиальном направлениях соответственно;

- все нагрузки являются установившимися во времени;

- температурные деформации из-за их незначительной величины не учитываются.

Для определения влажностных деформаций решается однородное уравнение влагопроводности в стационарной постановке (аналог уравнения теплопроводности):

$$\rho c \frac{\partial W}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial W}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y \frac{\partial W}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial W}{\partial z} \right) = 0, \quad (1)$$

где  $K_z$ ,  $K_x$ ,  $K_y$  – коэффициенты влагопроводности вдоль волокон, поперек волокон в танген-

циальном и радиальном направлениях соответственно;  $c$  – влагосодержание.

Уравнение решается численно совместно с граничными условиями, формулируемыми на поверхностях деревянной конструкции.

Граничное условие первого рода в виде

$$W(x, y, z, t) = W_r(x, y, z, t). \quad (2)$$

Граничное условие 3-го рода (сформировано на основе закона Ньютона – Рихмана):

$$K \frac{\partial W}{\partial n} = \alpha(W_{out} - W_{in}), \quad (3)$$

где  $\alpha$  – коэффициент влагоотдачи (аналог коэффициента теплоотдачи);  $(W_{out} - W_{in})$  разность влажности окружающей среды и влажности на поверхности конструкции.

При расчете НДС поле влажности выступает в качестве дополнительной нагрузки, вызывающей влажностные деформации. Кроме того, моделируются внешние нагрузки в соответствии с ТКП 45-5.05-146-2009 (02250) или другими нормативно-техническими документами.

Расчет НДС проводится в соответствии с известным уравнением:

$$\{\sigma\} = [D](\{\epsilon\} - \{\epsilon^w\}), \quad (4)$$

где  $\{\sigma\} = [\sigma_x \ \sigma_y \ \sigma_z \ \sigma_{xy} \ \sigma_{yz} \ \sigma_{xz}]^T$  – вектор напряжений, составленный из компонент тензора напряжений;  $\{\epsilon\} = [\epsilon_x \ \epsilon_y \ \epsilon_z \ \epsilon_{xy} \ \epsilon_{yz} \ \epsilon_{xz}]^T$  – вектор полных деформаций, составленный из компонент тензора деформаций;  $\{\epsilon^w\} = \Delta W [\alpha_x \ \alpha_y \ \alpha_z \ 0 \ 0 \ 0]^T$  – вектор деформаций усушки;  $\alpha_x \ \alpha_y \ \alpha_z$  – коэффициенты усушки;

$[D]$  – применяемая матрица жесткости для ортотропного материала.

Разработанная модель была применена при расчете комбинированной деревянной сосновой шпалы второго типа для железных дорог широкой колеи. Предлагаемая деревянная конструкция состоит из двух брусьев с поперечным сечением 160×115 мм, что позволяет производить шпалы из круглых лесоматериалов диаметром не более 22 см и экономить на стоимости древесного сырья.

На рис. 1 представлено распределение нормальных напряжений по верхней и боковой пластям деревянной составной шпалы из двух брусьев, соответствующее реальным условиям эксплуатации.

Из расчетов полученной модели комбинированных шпал (рис. 1) видно, что возникновение трещин обусловлено влажностными колебаниями и анизотропией самой древесины. Под воздействием этих факторов в комбинированных шпалах возникают высокие напряжения, достигающие более 2 МПа, что является причиной появления глубоких трещин на боковой пласте. Напряжения концентрируются в плоскости расположения сердцевин, что и обуславливает появление трещины в этой же зоне. В верхней зоне сопряжения двух брусьев из-за разности усушки в тангенциальном и радиальном направлениях пластин также возникает зазор. Для оценки справедливости проведенных расчетов была изготовлена опытная комбинированная шпала и подвергнута температурно-влажностному воздействию в климатической камере с граничными условиями, идентичными принятым в расчетах (нижняя пласт – 30%, остальные – 15%). Поперечное сечение составных шпал представлено на рис. 2.

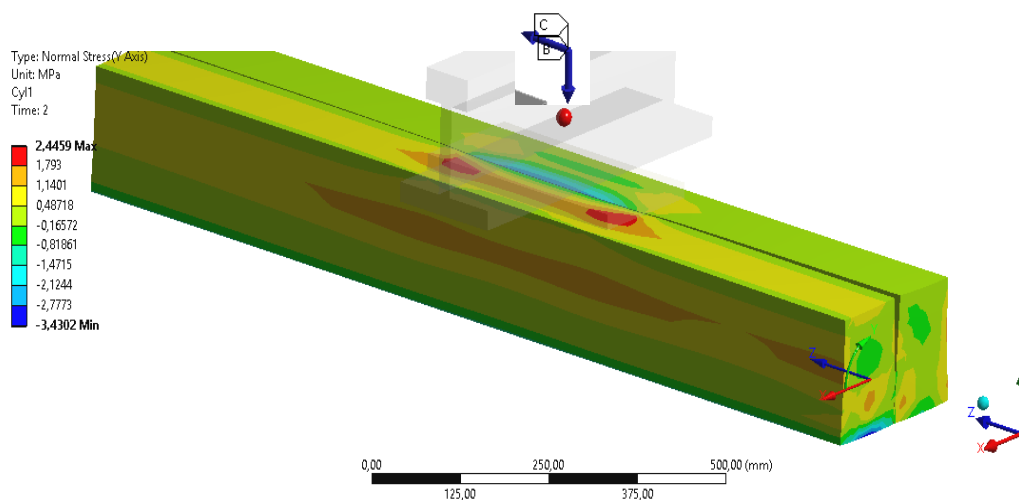


Рис. 1. Распределение нормальных напряжений по верхней и боковой пластям деревянной шпальной конструкции, состоящей из двух брусьев



Рис. 2. Сборная шпала в поперечном разрезе после температурно-влажностного воздействия

На основе проведенного эксперимента установлено, что в процессе температурно-влажностного воздействия на составную шпалу возникающие в древесине напряжения компенсируются трещинами на боковых гранях на уровне сердцевины. В верхней зоне сопряжения двух брусьев возникает зазор. Полученные экспериментальные данные в полной

мере соответствуют расчетным, представленным на рис. 1.

Для предотвращения возникновения зазора в верхней части брусьев, увеличения надежности сопряжения предложено осуществлять их предварительное склеивание фенольно-резорциновым клеем ФРФ-50, устойчивым к влажностным и вибрационным колебаниям. Далее были проведены расчеты склеенной деревянной конструкции по определению влияния перепада влажности между верхней и нижней пластими в 15 (рис. 3), 10 и 5%.

В результате было установлено, что при перепаде влажности между пластими в 15% возникающие нормальные напряжения достигают до 5,9 МПа, при 10% – 2,1 МПа, при 5% – 1,8 МПа. Причем в первом случае максимальные нормальные напряжения концентрируются на боковой поверхности в плоскости расположения сердцевины, чем обуславливаются возникновение сплошных продольных боковых трещин.

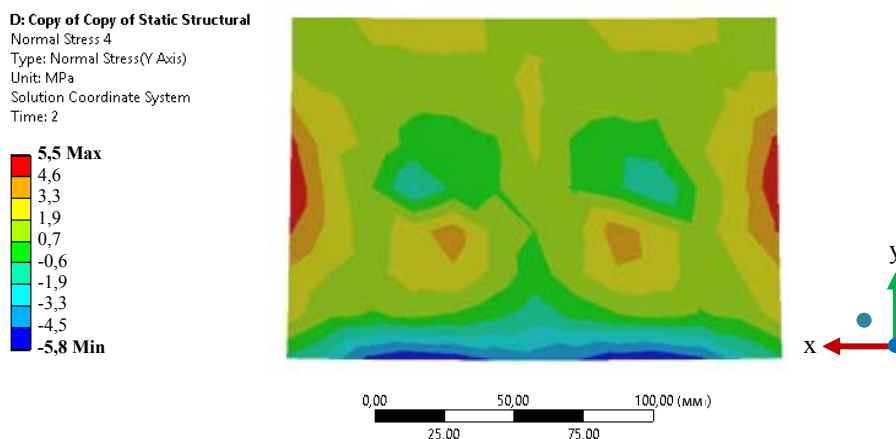


Рис. 3. Распределение нормальных напряжений в поперечном сечении деревянной шпальной конструкции, состоящей из двух склеенных брусьев с сердцевиной

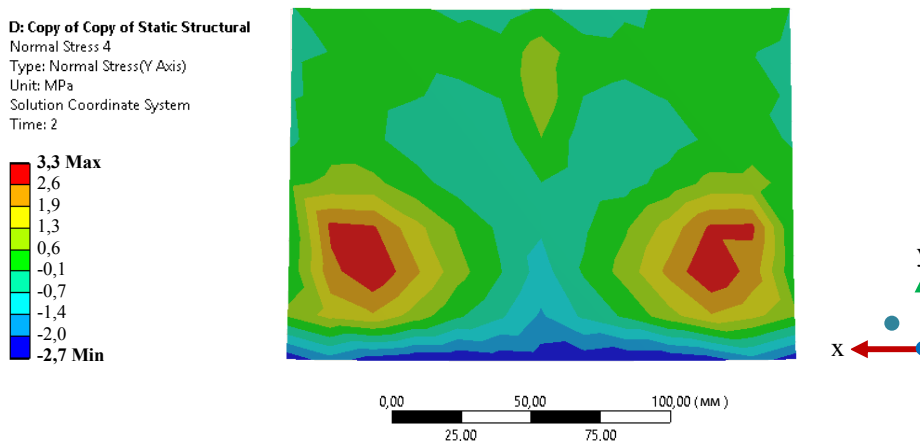


Рис. 4. Распределение нормальных напряжений в поперечном сечении деревянной шпальной конструкции, состоящей из двух склеенных брусьев без сердцевины

Полученные результаты свидетельствуют о необходимости дополнительной влагозащитной обработки деревянных конструкций, эксплуатируемых в тяжелых условиях, где неизбежно появление перепада влажности свыше 10%, особенно в осенне-весенний период.

Также было определено НДС представленной деревянной конструкции с учетом расположения сердцевины (рис. 4).

В результате установлено, что использование брусев без сердцевины позволяет снизить максимальные нормальные напряжения в 1,8 раза.

**Заключение.** Таким образом, учет влажностных колебаний, анизотропии самой древесины, наличия сердцевины, расширенных геометрических параметров и прочих вышеуказанных факторов позволяет более точно проектировать и прогнозировать состояние деревянных конструкций, тем самым расширяя область их применения.

#### Информация об авторах

**Божелко Игорь Константинович** – кандидат технических наук, ассистент кафедры технологии деревообрабатывающих производств. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: bikbstu@mail.ru

**Леонович Олег Константинович** – кандидат технических наук, заведующий научно-исследовательской лабораторией огнезащиты строительных конструкций и материалов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: OKL2001@mail.ru

**Ширко Алексей Владимирович** – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры механики материалов и конструкций. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: a.shirko103@gmail.com

#### Information about the authors

**Bozhelko Igor' Konstantinovich** – PhD (Engineering), assistant lecturer, the Department of Woodworking Technology. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: bikbstu@mail.ru

**Leonovich Oleg Konstantinovich** – PhD (Engineering), Head of Research Accredited Laboratory of Building Designs and Materials. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: OKL2001@mail.ru

**Shirko Aleksey Vladimirovich** – PhD (Physical and Mathematical Sciences), Assistant Professor, the Department of Material and Construction Mechanics. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: a.shirko103@gmail.com

*Поступила 15.02.2016*