

УДК 674.038.3

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.4.118

## ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ ГИБРИДНЫХ БРУСЬЕВ ИЗ ДРЕВЕСИНЫ\*

*Ю.В. Немировский, д-р физ.-мат. наук, проф.*

*А.И. Болтаев, асп.*

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет,  
ул. Ленинградская, д. 113, г. Новосибирск, Россия, 630008;  
e-mail: nemirov@itam.nsc.ru, boltaev\_artem@mail.ru

Приводится решение проблемы определения напряженно-деформированного состояния гибридных (состоящих из разных пород древесины) деревянных брусьев. Поперечное сечение такого бруса – слоистое. Каждый его слой может изменять форму поперечного сечения в широких пределах, т. е. необходимо учитывать физическую нелинейность диаграмм деформирования слоев, а также разную их сопротивляемость растяжению и сжатию. В общем случае брус испытывает прямой поперечный изгиб с растяжением-сжатием. Сравниваются диаграммы деформирования для 6 пород древесины на растяжение-сжатие вдоль волокон. Полученные результаты показывают, что разные породы древесины совершенно по-разному сопротивляются растяжению и сжатию: одна порода лучше работает на растяжение (может испытывать большие предельные напряжения и деформации), другая – на сжатие. При одном уровне напряжений графики деформирования различных пород расположены близко друг к другу, при других – значительно расходятся. Данные расчетов гибридных брусьев демонстрируют значительные особенности деформирования и разрушения гибридных физически нелинейных брусьев по сравнению с однородными (состоящими из одной породы), материал которых подчиняется закону Гука. К этим особенностям относятся: значительное изменение величины предельной нагрузки и максимального прогиба при варьировании пород слоев; возможность возникновения скрытых механизмов разрушения, когда предельные продольные деформации достигаются во внутренних слоях бруса. Эти особенности деформирования и разрушения гибридных деревянных конструкций необходимо учитывать в процессе их производства.

*Ключевые слова:* слоистые конструкции, физическая нелинейность, гибридное проектирование, механизмы разрушения.

### *Введение*

Клееные деревянные конструкции широко используются в нашей стране и за рубежом в качестве покрытий промышленных, складских и жилых зданий, разнообразных ферменных конструкций, элементов каркасных стержневых систем, междуэтажных перекрытий и ограждающих элементов высотных сооружений [1, 17, 18, 21–24]. Клееные конструкции имеют ряд существенных особенностей, которые отличают их от других однородных строительных конструкций и которые, безусловно, должны учитываться при их проектиро-

---

\*Работа выполнена в рамках гранта РФФИ № 15-01-00825.

*Для цитирования:* Немировский Ю.В., Болтаев А.И. Особенности деформирования и разрушения гибридных брусьев из древесины // Лесн. журн. 2018. № 4. С. 118–131. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.4.118

вании. К ним прежде всего относятся монолитность клеевых конструкций при наличии в их составе широкой номенклатуры разнообразных пород древесины, размеров, форм поперечных сечений и расположения составляющих элементов, возможность эффективного использования элементов разного качества и местных пород древесины, простота технологической обработки при оформлении архитектурно-художественных экономически эффективных обликов зданий и сооружений.

При проектировании клееных деревянных конструкций важно учитывать наблюдаемую при испытаниях образцов разных пород древесины [3, 6, 7] существенную нелинейность, а также различие диаграмм растяжения-сжатия. Еще одним фактором, существенно влияющим на деформируемость и несущую способность монолитных клеевых стержневых элементов в условиях поперечного изгиба с растяжением-сжатием, является форма поперечного сечения. По условиям экономической доступности материалов, рациональным технологическим возможностям производства и требованиям эксплуатации при создании конструкций из клееной древесины могут понадобиться элементы с различными структурами гибридных (составленных из различных пород) сечений брусьев (рис. 1).

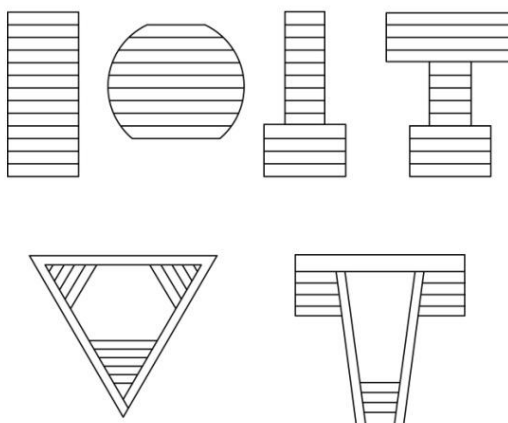


Рис. 1. Разнообразие форм поперечных сечений гибридных деревянных брусьев

Все перечисленные выше особенности строения и деформирования деревянных конструкций вызывают появление и изменение в процессе нагружения сложных неоднородных полей напряжений. Это в свою очередь не позволяет использовать для проектирования гибридных деревянных конструкций существующий метод расчета по предельным состояниям [8, 14], так как он опирается на экспериментальные данные, полученные для однородных (выполненных из одной породы) конструкций и для основных форм поперечного сечения (прямоугольное, круглое, двутавровое, коробчатое и др.).

Существующие методы расчета стержневых конструкций с учетом физической нелинейности [4, 5, 16, 19, 20] в основном рассматривают однородные конструкции и не уделяют должного внимания изучению особенностей деформирования такого сильно разносопротивляющегося материала, как древесина.

Общая теория изгиба слоистых гибридных стержневых систем до сих пор отсутствует. Некоторые ее начальные элементы, изложенные в [10, 11],

будут использоваться в данной работе для теоретического анализа особенностей деформирования и разрушения клеевых балок в условиях поперечного изгиба с растяжением-сжатием.

Цель исследования – определение напряженно-деформированного состояния гибридных деревянных брусев с разной сопротивляемостью древесины растяжению и сжатию.

#### Диаграммы деформирования древесины

На рис. 2, 3 приведены диаграммы кратковременных испытаний малых чистых образцов древесины различных пород на растяжение-сжатие вдоль волокон.

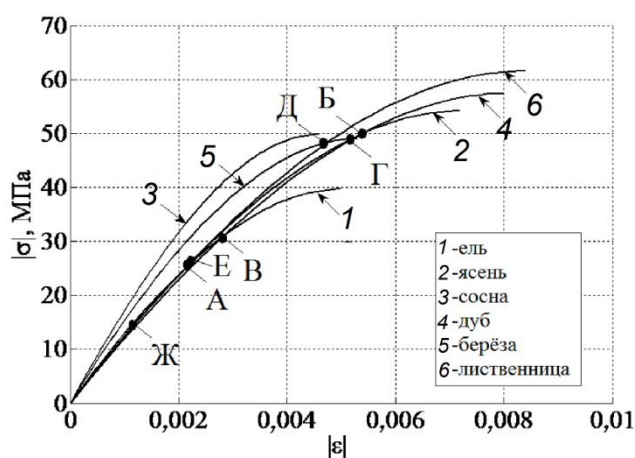


Рис. 2. Диаграммы сжатия древесины

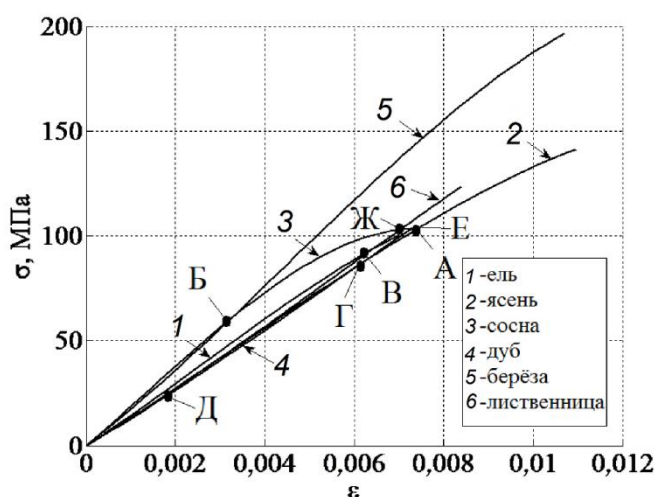


Рис. 3. Диаграммы растяжения древесины

Диаграммы построены по данным [2, 3, 6, 7, 13]. На них прописными буквами обозначены точки пересечения графиков, координаты которых приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Координаты точек пересечения графиков на диаграммах деформирования**

Точка	Для диаграмм сжатия			Для диаграмм растяжения			
	Номера пересекающихся графиков	Координаты		Точка	Номера пересекающихся графиков	Координаты	
		$\varepsilon \cdot 10^{-3}$	$ \sigma $ , МПа			$\varepsilon \cdot 10^{-3}$	$\sigma$ , МПа
А	1 и 2	2,18	25,5	А	2 и 3	7,41	103,6
Б	2 и 4	5,39	50,0	Б	3 и 5	3,18	59,5
В	1 и 4	2,83	31,0	В	1 и 6	6,42	93,8
Г	5 и 2 (5 и 4)	5,19	49,0	Г	2 и 4	6,1	86,1
Д	5 и 6	4,74	48,3	Д	2 и 6	1,79	24,2
Е	1 и 6	2,06	24,4	Е	3 и 4	7,28	103,5
Ж	2 и 6	1,12	13,8	Ж	3 и 6	7,02	103,0

Анализируя диаграммы на рис. 2, 3, выделяем следующие характерные особенности деформирования древесины под нагрузкой:

1. При растяжении древесина деформируется линейно практически до самого разрушения, при сжатии уже в области средних напряжений начинает проявляться физическая нелинейность, которая возрастает по мере увеличения нагрузки.

2. Для одной и той же породы древесины пределы прочности на растяжение и сжатие различаются до 4 раз, максимальные деформации – до 2 раз.

3. При растяжении наибольшее напряжение возникает у березы (196,0 МПа), при сжатии – у лиственницы (61,5 МПа).

4. Тангенс угла наклона касательной к диаграмме деформирования в начале координат, определяющий модуль упругости, также значительно изменяется в зависимости от породы древесины (максимум в 1,45 раза).

5. Графики для пород, имеющих малые пределы прочности при сжатии (сосна, береза), лежат выше графиков для пород с высоким пределом прочности на сжатие. При этом в области максимальных напряжений эти диаграммы пересекаются (рис. 2, точки Д и Г).

6. Графики деформирования 1, 2, 4 и 6 при малых и средних напряжениях расположены достаточно близко друг к другу, но при дальнейшем увеличении напряжений некоторые из них значительно расходятся. Это же характерно для графиков 3 и 5.

Сравнение диаграмм показало, что разные породы древесины совершенно по-разному сопротивляются растяжению и сжатию: одна порода лучше работает на растяжение (может испытывать большие предельные напряжения и деформации), другая – на сжатие. При одних уровнях напряжений графики деформирования различных пород лежат близко друг к другу, при других – значительно расходятся. Все это является предпосылкой для создания из древесины гибридных конструкций, в которых рационально соединяются материалы с различными физико-механическими свойствами.

*Определение напряженно-деформированного состояния гибридных брусьев*

Брус представляет собой стержень, состоящий из нескольких слоев. Каждый слой может быть выполнен из различных материалов. Общее число слоев не ограничено, а их форма может изменяться в широких пределах (рис. 4).

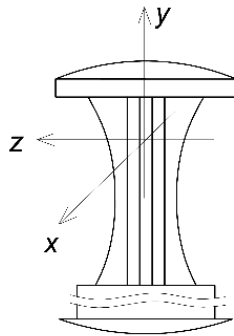


Рис. 4. Поперечное сечение стержня

Начало системы координат  $xyz$  помещаем в левый конец стержня. Плоскость  $xy$  – плоскость геометрической и физической симметрии стержня. Ось  $x$  совпадает с продольной осью стержня и имеет определенную геометрическую привязку к его поперечному сечению.

В общем случае стержень может иметь переменное по длине (по оси  $x$ ) поперечное сечение. Условия контакта слоев считаются совершенными, когда отсутствуют взаимные смещения любого направления в плоскости контакта. Материал слоев считается условно гомогенным (без пороков), транслопным.

Вес и стоимость стержня:

$$V = \sum_{i=1}^{n_{\text{сл}}} \gamma_i \int_{V_i} dV_i; \quad C = \sum_{i=1}^{n_{\text{сл}}} c_i \int_{V_i} dV_i. \quad (1)$$

Здесь  $n_{\text{сл}}$  – количество слоев;

$\gamma_i$  – вес единицы объема материала (удельный вес);

$c_i$  – стоимость  $1 \text{ м}^3$  материала  $i$ -го слоя.

Интегрирование в формуле (1) ведется по объему  $i$ -го слоя стержня.

В общем случае стержень испытывает прямой поперечный изгиб с растяжением-сжатием. Все нагрузки приведены к продольной оси стержня – оси  $x$ .

Деформации и перемещения будем считать малыми. Точка приложения вектора внутренних усилий лежит на оси стержня. Запишем уравнения равновесия для недеформированного состояния [15]:

$$\begin{aligned} \frac{dM_z}{dx} + Q_y + m_z &= 0; \\ \frac{dQ_y}{dx} + q_y &= 0; \quad \frac{dN}{dx} + q_x &= 0, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $M_z$  – проекция вектора внутреннего момента на ось  $z$ ;

$Q_y, N$  – проекции вектора внутренних усилий на оси  $x$  и  $y$ ;

$m_z$  – проекция вектора распределенного момента на ось  $z$ ;

$q_y, q_x$  – проекции вектора распределенной нагрузки, приложенной к оси стержня.

Принимаются справедливыми теория плоских сечений Бернулли и упрощенное выражение кривизны плоской кривой. В соответствии с данными ограничениями связь между деформациями и перемещениями стержня выражается следующими известными соотношениями [15]:

$$\begin{aligned} \varepsilon(x, y) &= \varepsilon_0(x) - \kappa y; \\ \kappa(x) &= \frac{d^2 w}{dx^2}; \quad \varepsilon_0(x) = \frac{du_0}{dx}. \end{aligned} \quad (3)$$

где  $\varepsilon_0$  – продольная деформация на уровне оси стержня;  
 $\kappa$  – изменение кривизны оси стержня;  
 $w, u_0$  – вертикальное и горизонтальное перемещение точек оси стержня.

Связь между нормальными напряжениями ( $\sigma_i$ ) и деформациями ( $\varepsilon_i$ )  $i$ -го слоя выражается степенным многочленом [9]:

$$\sigma_i = \sum_{j=1}^3 E_{ij} \varepsilon_i^j; \quad -\varepsilon_{i*}^- \leq \varepsilon_i \leq \varepsilon_{i*}^+, \quad (4)$$

где  $E_{ij}$  – константы, зависящие от механических свойств  $i$ -го слоя стержня;  
 $\varepsilon_{i*}^\pm$  – предельно допустимые продольные деформации  $i$ -го слоя при растяжении (+) и сжатии (-).

Численные значения  $E_{ij}$  и  $\varepsilon_{i*}^\pm$  для различных пород древесины приведены в [11]. Использование кубической зависимости (4) позволяет учитывать характерную для дерева разносопротивляемость при растяжении и сжатии, а также нелинейный характер связи между  $\sigma_i$  и  $\varepsilon_i$ . При этом, если принять  $E_{i2} = E_{i3} = 0$ , то приходим к одноосному закону Гука.

Основываясь на выше приведенных положениях, в работе [11] была получена разрешающая система нелинейных алгебраических уравнений 3-й степени относительно двух неизвестных –  $\kappa$  и  $\varepsilon_0$ :

$$\begin{cases} \sum_{t=0}^3 (-\kappa)^t \sum_{j=t}^3 C_j^t \varepsilon_0^{j-t} \sum_{i=1}^{n_{cl}} E_{ij} d_{it} = N; \\ \sum_{t=0}^3 (-\kappa)^t \sum_{j=t}^3 C_j^t \varepsilon_0^{j-t} \sum_{i=1}^{n_{cl}} E_{ij} d_{i(t+1)} = -M_z; \end{cases} \quad (5)$$

$$d_{it} = \int_{S_i} y^t dS_i; \quad C_j^t = \frac{j!}{t!(j-t)!}, \quad (6)$$

где  $S_i$  – площадь поперечного сечения  $i$ -го слоя стержня.

Коэффициенты  $E_{i0} = 0$  введены для получения краткой и удобной для решения записи. В (6) интегрирование ведется по площади поперечного сечения  $i$ -го слоя стержня. Приняв  $E_{ij} = 0$  ( $j = 2, 3$ ), имеем определяющие уравнения для слоистого линейно-упругого стержня. Если при этом  $n_{cl} = 1$ , то приходим к уравнениям технической теории изгиба стержней [15].

Условие прочности задается соотношением

$$|\varepsilon_{i, \max}^{\pm}| \leq \varepsilon_{i*}^{\pm} \quad (i = 1 \dots n_{\text{сл}}), \quad (7)$$

где  $\varepsilon_{i, \max}^{\pm}$  – максимальные продольные деформации растяжения (+) и сжатия (–)  $i$ -го слоя.

Проверка выполнения условия прочности осуществляется в каждом слое поперечного сечения для его верхних и нижних границ. Устойчивость стержня считается обеспеченной.

Получение решения системы (5) в аналитическом виде представляет значительные трудности. В связи с этим был разработан численный метод, основанный на методе наименьших квадратов [12]. Используя его, определим обобщенные деформации стержня –  $\varepsilon_0$  и  $\kappa$ . После этого, интегрируя соотношения (3), найдем перемещения оси стержня, напряжения в слоях вычислим по формуле (4).

#### Примеры расчета гибридных брусьев

Расчетная схема однопролетной балки для первой серии расчетов приведена на рис. 5. Балка загружена равномерно распределенной нагрузкой интенсивностью  $q$ . Поперечное сечение – прямоугольное с размерами  $b \times h = 200 \times 400$  мм. Балка имеет три слоя высотой  $h_1, h_2$  и  $h_3$ .

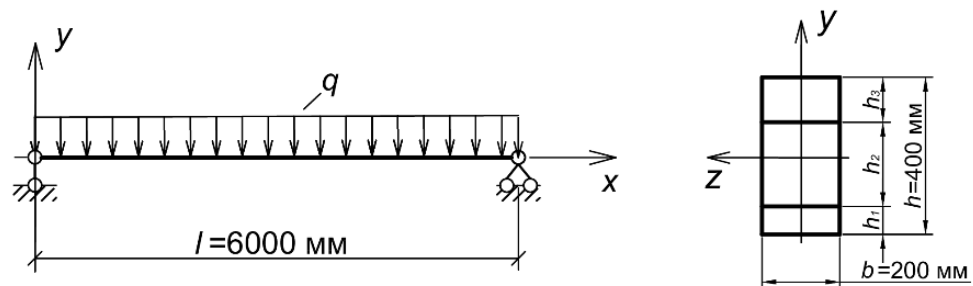


Рис. 5. Расчетная схема балки для первой серии расчетов

В первой серии расчетов будем изменять размеры и породы слоев. Используем те породы, для которых даны диаграммы деформирования на рис. 2, 3. Нумерация пород совпадает с нумерацией на рис. 2, 3. В каждом расчете будем загружать конструкцию до тех пор, пока в каком-либо слое максимальные деформации не достигнут предельных значений.

При данных условиях закрепления и характере нагрузки опасное сечение будет находиться в середине пролета. Волокна нижней части балки будут растянуты, верхней – сжаты.

Для выявления особенностей работы слоистой балки из разносопротивляющегося материала проведем расчеты по разным вариантам: в первом – все слои из сосны; во втором – в верхний слой помещена порода, лучше всего сопротивляющаяся сжатию, в нижний – растяжению; в третьем – меняем местами слои из второго расчета; в четвертом – верхний слой выполнен из породы, хуже всего работающей на сжатие, нижний – на растяжение; в пятом – средний слой из наиболее слабой породы.

Результаты расчетов приведены в табл. 2.

Таблица 2

## Результаты расчета однопролетной балки

Вариант	Распределение пород	$q_{\max}$ , кН/м	$w_{\max}$ , см	Высота слоя, см			Номер слоя, в котором достигнуты предельные деформации	Вес балки, кН	Стоимость балки, р.	Степень нагружения нижних волокон, %
				$h_1$	$h_2$	$h_3$				
1	333	79	7,7	13,3	13,3	13,3	1	2,40	1005	53
2	6-5	108	12,9	20,0	0,0	20,0	1	3,08	912	56
3	5-6	76	9,2	20,0	0,0	20,0	1	3,08	912	58
4	1-1	65	8,3	20,0	0,0	20,0	1	2,12	960	78
5	615	86	10,4	13,3	13,3	13,3	2	2,36	926	60

Примечания. 1. Характер начала разрушения во всех вариантах соответствовал сжатию. 2. Распределение пород: 1 – ель; 3 – сосна; 5 – береза; 6 – лиственница.

Стоимость балки включает в себя только стоимость древесины, которую брали из Интернета, р./м<sup>3</sup>: для березы – 1300, для ели – 2000, для лиственницы – 2500, для сосны – 2100. В последнем столбце содержится информация о степени нагружения крайних нижних волокон, равной  $\max(\varepsilon(x - 0,5h))/\varepsilon_{3*}^+$ .

Анализ результатов расчетов показал следующее:

1. Варьирование слоев из разных пород приводит к значительному изменению величин предельной нагрузки и максимального прогиба: предельная нагрузка изменяется в 1,66 раза, максимальный прогиб – в 1,55 раза.

2. Вес балок изменяется максимум в 1,45 раза, стоимость – в 1,10 раза.

3. В расчете варианта № 5 предельные деформации были достигнуты во внутреннем слое балки, тогда как в однородных конструкциях предельные деформации всегда достигаются на фибровых волокнах балки. В расчетах вариантов № 1–4 предельные деформации достигались на верхних фибровых волокнах.

4. Во всех расчетах нижние волокна балки были сильно недогружены, что является следствием значительной разностойкости древесины.

Во второй серии расчетов добавим к распределенной нагрузке продольную растягивающую силу, приложенную в центре тяжести сечения. Поперечное сечение полностью выполним из сосны (рис. 6).

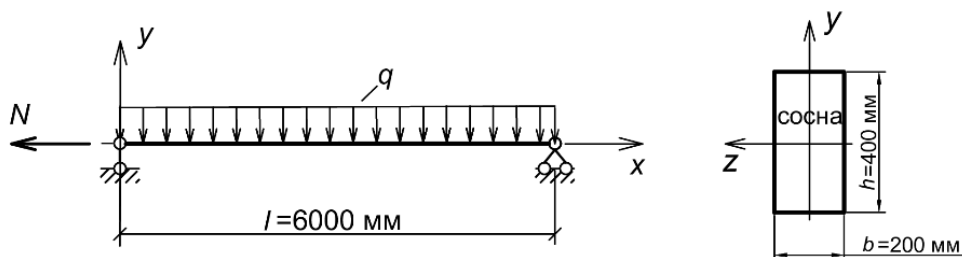


Рис. 6. Расчетная схема балки для второй серии расчетов



Задаем определенную величину продольной силы и ищем максимум распределенной нагрузки. На рис. 7–9 показано влияние продольной силы  $N$  на  $q_{\max}$  и  $w_{\max}$ , а также на степень нагружения крайних верхних и нижних волокон балки.

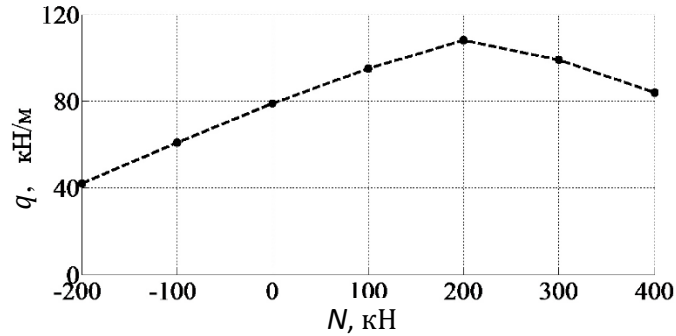


Рис. 7. Определение  $q_{\max}$  от продольной силы  $N$

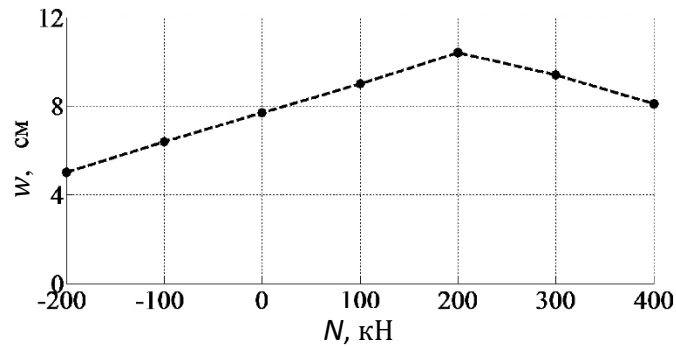


Рис. 8. Определение  $w_{\max}$  от продольной силы  $N$

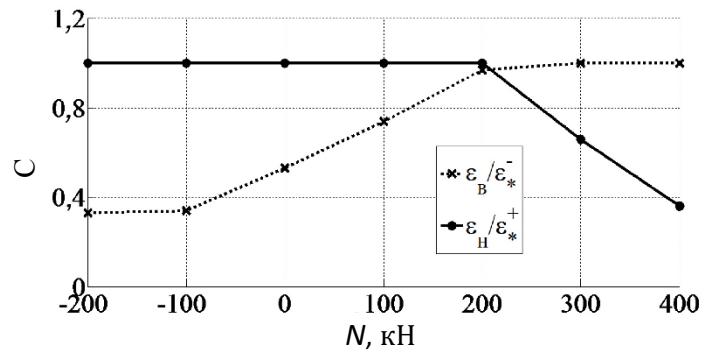


Рис. 9. Зависимость степени нагруженности ( $C$ ) фибровых волокон от продольной силы  $N$  в опасном сечении ( $\epsilon_B, \epsilon_H$ ) – величина продольной деформации верхнего (нижнего) волокна опасного сечения)

Графики, выражающие зависимость  $q_{\max} - N$  и  $w_{\max} - N$ , имеют максимум при  $N = 200$  кН. При этом максимальные продольные деформации в

опасном сечении одновременно достигают предельной величины. В случае одинаково сопротивляющегося материала максимальное значение  $q_{\max}$  достигается при  $N = 0$  кН. Из графиков, приведенных на рис. 7–9, видно, что прикладываемая продольную силу, можно увеличить  $q_{\max}$  от 79 (при  $N = 0$ ) до 108 кН/м (при  $N = 200$  кН).

#### Заключение

В работе представлено решение проблемы определения напряженно-деформированного состояния гибридных деревянных брусьев с учетом физической нелинейности и разной сопротивляемости древесины растяжению и сжатию.

Приведены диаграммы деформирования для 6 пород древесины. Дан их анализ, показывающий значительное различие в сопротивлении растяжению и сжатию в зависимости от породы. Например, одна порода может лучше работать на сжатие, другая – на растяжение. При одних уровнях напряжений графики деформирования лежат близко друг к другу, при других – значительно расходятся. Такое различие в характеристиках пород может быть использовано при создании конструкций из древесины, в которых рационально соединяются материалы с различными физико-механическими свойствами.

На примере расчетов слоистой однопролетной балки показаны особенности, возникающие при деформировании гибридных (состоящих из разных пород) брусьев, с учетом реальных диаграмм деформирования. К особенностям прежде всего необходимо отнести: сильное влияние перестановки слоев из разных пород на напряженно-деформированное состояние конструкций, в частности на несущую способность и предельный прогиб балки; возможность возникновения скрытых механизмов разрушения (в случае, когда предельные деформации возникают во внутренних слоях конструкции).

Показанные особенности деформирования гибридных деревянных брусьев дают большие возможности для оптимизации слоистых конструкций и могут быть использованы в практике производства современных клееных деревянных конструкций.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арленинов Д.К., Буслаев Ю.Н., Игнатъев В.П., Романов П.Г., Чахов Д.К. Конструкции из дерева и пластмасс. М.: Изд-во Ассоц. строит. вузов, 2002. 280 с.
2. Боровиков А.М., Уголев Б.Н. Справочник по древесине. М.: Лесн. пром-сть, 1989. 296 с.
3. Быков В.В. Экспериментальные исследования прочности и деформативности древесины сибирской лиственницы при сжатии и растяжении вдоль волокон с учетом длительного действия нагрузки // Строительство. 1967. № 8. С. 3–8. (Изв. высш. учеб. заведений).
4. Геммерлинг А.В. Расчет стержневых систем. М.: Стройиздат, 1974. 208 с.
5. Григолюк Э.И., Шалашилин В.И. Проблемы нелинейного деформирования: Метод продолжения решения по параметру в нелинейных задачах механики твердого деформируемого тела. М.: Наука, 1988. 232 с.
6. Исследования прочности и деформативности древесины: сб. ст. / под ред. Г.Г. Карлсена. М.: Госстройиздат, 1956. 172 с.
7. Квасников Е.Н. Вопросы длительного сопротивления древесины. Л.: Стройиздат, 1972. 96 с.

8. *Коченов В.М.* Несущая способность элементов и соединений деревянных конструкций. М.: Госстройиздат, 1953. 320 с.
9. *Немировский Ю.В.* Метод расчета композитных стержневых систем из разномодульных материалов // *Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики: материалы V Всерос. науч. конф. (Томск, 3–5 нояб.).* Томск: Изд-во ТГУ, 2006. С. 288–290.
10. *Немировский Ю.В., Болтаев А.И.* Метод расчета деревянных стропильных покрытий зданий. Сообщ. 1. Моделирование и общие закономерности // *Строительство.* 2014. № 3. С. 5–13. (Изв. высш. учеб. заведений).
11. *Немировский Ю.В., Болтаев А.И.* Особенности деформирования и разрушения деревянных клееных многопролетных балок. Сообщ. 1 // *Строительство.* 2016. № 6. С. 116–126. (Изв. высш. учеб. заведений).
12. *Немировский Ю.В., Болтаев А.И.* Особенности расчета деревожелезобетонного балочного моста // *Вестн. СибАДИ.* 2016. Вып. 5(51). С. 114–124.
13. *Немировский Ю.В., Гребенюк Г.И., Ажермачев А.В.* Расчет ребристых деревянных конструкций с учетом эффектов разномодульности и нелинейного сопротивления // *Строительство.* 2007. № 3. С. 4–12. (Изв. высш. учеб. заведений).
14. СП 64.13330.2011. *Деревянные конструкции.* М., 2011. 88 с.
15. *Филин А.П.* Прикладная механика твердого деформируемого тела: Сопротивление материалов с элементами теории сплошных сред и строительной механики. Т. 2. М.: Наука, 1978. 616 с.
16. *Шапиро Д.М., Агарков А.В., Мельничук Н.Н., Чан Т.Т.В.* Нелинейные методы расчета в современном проектировании (на примерах объектов геотехники и мостовых сооружений) // *Науч. вестн. Воронеж. гос. архит.-строит. ун-та. Строительство и архитектура.* 2009. № 3. С. 85–94.
17. *Шмидт А.Б., Дмитриев П.А.* Атлас строительных конструкций из клееной древесины и водостойкой фанеры. М.: Изд-во Ассоц. строит. вузов, 2002. 292 с.
18. *De La Rosa García P., Escamilla A.C., Nieves González García M.* Bending Reinforcement of Timber Beams with Composite Carbon Fiber and Basalt Fiber Materials // *Composites Part B: Engineering.* 2013. Vol. 55. Pp. 528–536.
19. *McGuire W., Gallagher R.H., Ziemian R.D.* Matrix Structural Analysis. New York, USA: Wiley, 2000. 474 p.
20. *Owen D.R.J., Hinton E.* Finite Elements in Plasticity: Theory and Practice. Swansea, U.K.: Pineridge Press, 2013. 640 p.
21. *Pischl R., Schickhofer G.* The Mur River Wooden Bridge, Austria // *Structural Engineering International.* 1993. Vol. 3, iss. 4. Pp. 217–219.
22. *Poirier E., Moudgil M., Fallahi A., Staub-French S., Tannert T.* Design and Construction of a 53-Meter-Tall Timber Building at the University of British Columbia // *Proc. WCTE.* 2016.
23. *Porteous J., Kermani A.* Structural Timber Design to Eurocode 5. Wiley-Blackwell Publ., 2013. 638 p.
24. *Raftery G.M., Whelan C.* Low-Grade Glued Laminated Timber Beams Reinforced Using Improved Arrangements of Bonded-in GFRP Rods // *Construction and Building Materials.* 2014. Vol. 52. Pp. 209–220.

UDC 674.038.3

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.4.118

**Features of Deformation and Destruction of Hybrid Timber Beams***Yu.V. Nemirovskiy, Doctor of Physico-Mathematical Sciences, Professor**A.I. Boltaev, Postgraduate Student*

Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering, ul. Leningradskaya, 113, Novosibirsk, 630008, Russian Federation; e-mail: nemirov@itam.nsc.ru, boltaev\_artem@mail.ru

The paper presents a problem solution of determining the stress-strain state of hybrid (consisting of different species of wood) wooden beams. The cross-section of the beam is laminated. Each layer can change the shape of the cross-section in a wide range. The physical nonlinearity of the layer deformation curves, as well as their different resistance to tension and compression should be taken into account. In general, a beam experiences a straight cross-bending with tension and compression. The deformation curves for 6 wood species for tension-compression along fibers are compared. The results show that different wood species resist tension and compression differently: one species works better for tension (can experience greater stresses and strains), the other – for compression. At one stress level, the deformation graphs of different species are located close to each other, while at other levels they significantly diverge. The data of calculations of hybrid bars show significant features of deformation and destruction of hybrid physically non-linear bars in comparison with homogeneous ones (consisting of one species), the material of which follows the Hooke's law. These features include a significant change in the magnitude of the extreme load and maximum deflection when varying the layer species and the possibility of emergence of hidden mechanics of destruction, when ultimate longitudinal strains are achieved in the inner layers of the beam. These features of deformation and destruction of hybrid wooden structures should be considered in the process of their production.

*Keywords:* laminated structure, physical nonlinearity, hybrid design, mechanisms of destruction.

## REFERENCES

1. Arleninov D.K., Buslaev Yu.N., Ignat'yev V.P., Romanov P.G., Chakhov D.K. *Konstruktsii iz dereva i plastmass* [Construction of Wood and Plastics]. Moscow, Association of Educational Civil Engineering Institutions of Construction Publ., 2002. 280 p. (In Russ.)
2. Borovikov A.M., Ugolev B.N. *Spravochnik po drevesine* [Wood Guide]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1989. 296 p. (In Russ.)
3. Bykov V.V. Eksperimental'nye issledovaniya prochnosti i deformativnosti drevesiny sibirskoy listvenitsy pri szhatii i rastyazhenii vdol' volokon s uchetom dliitel'nogo deystviya nagruzki [Experimental Studies of Ultimate Compressive and Tensile Strength of Siberian Larch Wood Along the Fibers, Taking into Account the Long Load Action]. *Stroitel'stvo*, 1967, no. 8, pp. 3–8.
4. Gemmerling A.V. *Raschet sterzhnevyykh system* [Calculation of Rod Systems]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1974. 208 p. (In Russ.)

---

*For citation:* Nemirovskiy Yu.V., Boltaev A.I. Features of Deformation and Destruction of Hybrid Timber Beams. *Lesnoy zhurnal* [Forestry journal], 2018, no. 4, pp. 118–131. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.4.118

5. Grigolyuk E.I., Shalashilin V.I. *Problemy nelineynogo deformirovaniya: Metod prodolzheniya resheniya po parametru v nelineynykh zadachakh mekhaniki tverdogo deformiruyemogo tela* [Problems of Nonlinear Deformation: the Continuation Method with Respect to a Parameter in Nonlinear Problems of Mechanics of Solids]. Moscow, Nauka Publ., 1988. 232 p. (In Russ.)
6. Karlsen G.G. *Issledovaniya prochnosti i deformativnosti drevesiny* [Investigation of Strength and Deformability of Wood]. Moscow, Gosstroyizdat Publ., 1956. 172 p. (In Russ.)
7. Kvasnikov E.N. *Voprosy dlitel'nogo soprotivleniya drevesiny* [Issues of Long-Term Wood Resistance]. Leningrad, Stroyizdat Publ., 1972. 96 p. (In Russ.)
8. Kochenov V.M. *Nesushchaya sposobnost' elementov i soedineniy derevyannykh konstruksiy* [Bearing Capacity of Elements and Joints of Wooden Structures]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1953. 320 p. (In Russ.)
9. Nemirovskiy Yu.V. *Metod rascheta kompozitnykh sterzhnevnykh sistem iz raznomodul'nykh materialov* [A Method of Calculation of Composite Rod Systems from Heterogeneous Materials]. *Fundamental'nyye i prikladnyye problemy sovremennoy mekhaniki: materialy V Vseros. nauch. konf. (Tomsk, 3–5 noyab.)* [Fundamental and Applied Problems of Modern Mechanics: Proc. 5th All-Russ. Sci. Conf. (Tomsk, 3–5 November)]. Tomsk, TSU Publ., 2006, pp. 288–290. (In Russ.)
10. Nemirovskiy Yu.V., Boltaev A.I. *Metod rascheta derevyannykh stropil'nykh pokrytiy zdaniy. Soobshch. 1. Modelirovanie i obshchie zakonomernosti* [Method for Calculating Wooden Roof Coatings of Buildings. Report 1: Modeling and General Patterns]. *Stroitel'stvo*, 2014, no. 3, pp. 5–13.
11. Nemirovskiy Yu.V., Boltaev A.I. *Osobennosti deformirovaniya i razrusheniya derevyannykh kleynykh mnogoproletnykh balok. Soobshch. 1* [Features of Deformation and Destruction of Wooden Glued Multispan Beams. Report 1]. *Stroitel'stvo*, 2016, no. 6, pp. 116–126.
12. Nemirovskiy Yu.V., Boltaev A.I. *Osobennosti rascheta derevozhelezobetonogo balochnogo mosta* [Calculation of Wood Reinforced Concrete Girder Bridge]. *Vestnik SibADI*, 2016, no. 5(51), pp. 114–124.
13. Nemirovskiy Yu.V., Grebenyuk G.I., Azhermachev A.V. *Raschet rebristykh derevyannykh konstruksiy s uchetom effektov raznomodul'nosti i nelineynosti soprotivleniya* [Calculation of Ribbed Wooden Structures Taking into Account the Effects of Heterogeneity and Nonlinearity of Resistance]. *Stroitel'stvo*, 2007, no. 3, pp. 4–12.
14. *SP 64.13330.2011. Derevyannyye konstruksii* [Code of Practice 64.13330.2011. Timber Structures]. Moscow, 2011. 88 p.
15. Filin A.P. *Prikladnaya mekhanika tverdogo deformiruemogo tela: Soprotivleniye materialov s elementami teorii sploshnykh sred i stroitel'noy mekhaniki. Tom 2.* [Applied Mechanics of Solids: Material Resistance with Elements of Continuum Theory and Structural Mechanics. Vol. 2]. Moscow, Nauka Publ., 1978. 616 p. (In Russ.)
16. Shapiro D.M., Agarkov A.V., Mel'nichuk N.N., Chan T.T.V. *Nelineynyye metody rascheta v sovremennom proyektirovanii (na primerakh ob'yektov geotekhniki i mostovykh sooruzheniy)* [Non-Linear Methods of Analysis in Modern Designing (by the Example of Geotechnics Objects and Bridgeworks)]. *Nauchnyy Vestnik VGASU. Ser.: Stroitel'stvo i Arkhitektura* [Scientific Herald of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture], 2009, no. 3, pp. 85–94.
17. Shmidt A.B., Dmitriev P.A. *Atlas stroitel'nykh konstruksiy iz kleynoy drevesiny i vodostoykoy fanery* [Atlas of Building Structures Made of Glued Wood and Waterproof Plywood]. Moscow, Association of Educational Civil Engineering Institutions of Construction Publ., 2002. 292 p. (In Russ.)
18. De La Rosa García P., Escamilla A.C., Nieves González García M. *Bending Reinforcement of Timber Beams with Composite Carbon Fiber and Basalt Fiber Materials. Composites Part B: Engineering*, 2013, vol. 55, pp. 528–536.

---

19. McGuire W., Gallagher R.H., Ziemian R.D. *Matrix Structural Analysis*. New York, USA, Wiley, 2000. 474 p.

20. Owen D.R.J., Hinton E. *Finite Elements in Plasticity: Theory and Practice*. Swansea, U.K., Pineridge Press, 2013. 640 p.

21. Pischl R., Schickhofer G. The Mur River Wooden Bridge, Austria. *Structural Engineering International*, 1993, vol. 3, iss. 4, pp. 217–219.

22. Poirier E., Moudgil M., Fallahi A., Staub-French S., Tannert T. Design and Construction of a 53-Meter-Tall Timber Building at the University of British Columbia. *Proc. WCTE*, 2016.

23. Porteous J., Kermani A. *Structural Timber Design to Eurocode 5*. Wiley-Blackwell Publ., 2013. 638 p.

24. Raftery G.M., Whelan C. Low-Grade Glued Laminated Timber Beams Reinforced Using Improved Arrangements of Bonded-in GFRP Rods. *Construction and Building Materials*, 2014, vol. 52, pp. 209–220.

Received on January 30, 2018

---