

## ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ДЕРЕВЯННЫХ СОСТАВНЫХ БАЛОК ИЗ ЦЕЛЬНОЙ ДРЕВЕСИНЫ НА НАГЕЛЬНЫХ ПЛАСТИНАХ

В. В. Жук, В. Л. Шевчук, И. П. Коцюра, А. В. Антипович

### Введение

Вследствие ограниченного сортамента пиломатериалов при значительных нагрузках, когда несущая способность балок цельного сечения оказывается недостаточной, применяются балки, составленные по высоте из нескольких элементов, соединенных дискретными связями. Средствами соединения между отдельными элементами могут служить дубовые пластинчатые нагели, колодки, призматические и гладкие кольцевые шпонки [1,2]. Наибольший пролет балок из чистообрезных брусьев может быть не более 6,2 м, что ограничивает их применение в строительстве.

В ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко разработаны составные балки с ветвями из клееной древесины, соединенными наклонно клееными металлическими стержнями [3], и составные балки из окантованных бревен, совместная работа которых в балке обеспечивается наклонными стержнями с комбинированными шайбами, установленными под углом  $45^\circ$  к направлению волокон древесины [4]. При изготовлении таких балок возрастает их стоимость и металлоемкость.

Известны конструкции с соединениями на нагельных пластинах, устанавливаемых в зазор между соединяемыми по высоте брусьями [5]. Нагельные пластины имеют основу из материалов различной жесткости и конструктивной формы, к которой прикреплены цилиндрические нагели различного диаметра и длины.

Анализ литературных источников показал, что работа соединений на нагельных пластинах изучена недостаточно. Так, в [6] утверждается, что по своей работе нагельные пластины могут быть сравнены с работой гвоздевых соединений, что, очевидно, не учитывает то обстоятельство, что нагели имеют плотную посадку (нагель закрепляется на основе путем продавливания, контактной или электродуговой сваркой). В [7], при определении расчетного сопротивления нагеля изгибу, рекомендуется учитывать стесненность развития пластических деформаций при изгибе в зависимости от способа закрепления нагеля путем введения коэффициента  $K_H$ : при плотной посадке  $K_H = 1.1$ ; при закреплении на сварке  $K_H = 1.2$ . По данным [8], относительная прочность соединения на нагельных пластинах близка к расчетному сопротивлению цельной древесины на скалывание при изгибе (1.6–1.8 МПа), а относительная сдвиговая прочность еще более высока, так как несущая способность на один срез нагеля увеличивается до 40%.

В настоящей статье приводятся результаты экспериментальных исследований деревянной балки составного сечения на нагельных пластинах.

### Характеристика объекта исследования

Работа выполнялась в два этапа. На первом этапе, с целью изучения несущей способности и деформативности соединений деревянных элементов на

металлических нагельных пластинах, были изготовлены и испытаны на воздействие кратковременной статической нагрузкой при сжатии две серии образцов (5 образцов одной серии): серия С-1 – соединения на нагельных пластинах, установленных с зазорами между крайними и средним деревянными элементами (зазоры равны толщине основы нагельной пластины); серия С-2 – соединения на проволочных гвоздях (контрольные образцы) [9].

Нагельные пластины были изготовлены из полосовой стали толщиной 3 мм (жесткая основа) и цилиндрических нагелей – отрезков проволочных гвоздей диаметром 3 мм и длиной 38 мм. В пластине рассверливались отверстия диаметром 3 мм, в которые вставлялись четыре цилиндрических нагеля. Объединение элементов нагельных пластин выполнено с помощью точечной электродуговой сварки. Для соединения деревянных элементов серии С-2 использовались проволочные гвозди длиной 70 мм и диаметром 3 мм (по 4 с каждой стороны).

Назначение размеров образцов и нагельных пластин производилось с учетом действующих норм по расстановке нагелей [10] и требований [7]. В результате образцы всех серий имели следующие размеры: крайние элементы  $t_1 \times b \times h = 25 \times 50 \times 150$  мм; средние элементы  $t_2 \times b \times h = 50 \times 50 \times 150$  мм. Основа нагельных пластин  $b \times h \times \delta = 50 \times 60 \times 3$  мм. Глубина заделки цилиндрических нагелей  $a = 17$  мм, что находится в рекомендуемых [7] пределах. Заостренная часть цилиндрических нагелей равна 4.5 мм.

Полученные данные использовались для определения числа нагельных пластин при изготовлении опытных образцов балок. На втором этапе определялось напряженно-деформированное состояние деревянных балок составного сечения. Для испытания были изготовлены две балки из древесины 2-го сорта с влажностью 12-16%. Контрольный образец (Б1) имел размеры  $b \times h \times l = 47.9 \times 100.8 \times 2000$  мм. Балка (Б2) изготовлена из двух брусков  $b \times h \times l = 48.3 \times (46 \div 48.2) \times 2000$  мм. Для соединения деревянных элементов балки Б2 между собой использовались нагельные пластины с жесткой основой с размерами  $b \times l \times \delta = 50 \times 60 \times 3$  мм (рисунок 1).

Запрессовку нагельных пластин выполняли с использованием универсальной испытательной машины Р-10. Конструктивное решение балок приведено на рисунке 2.

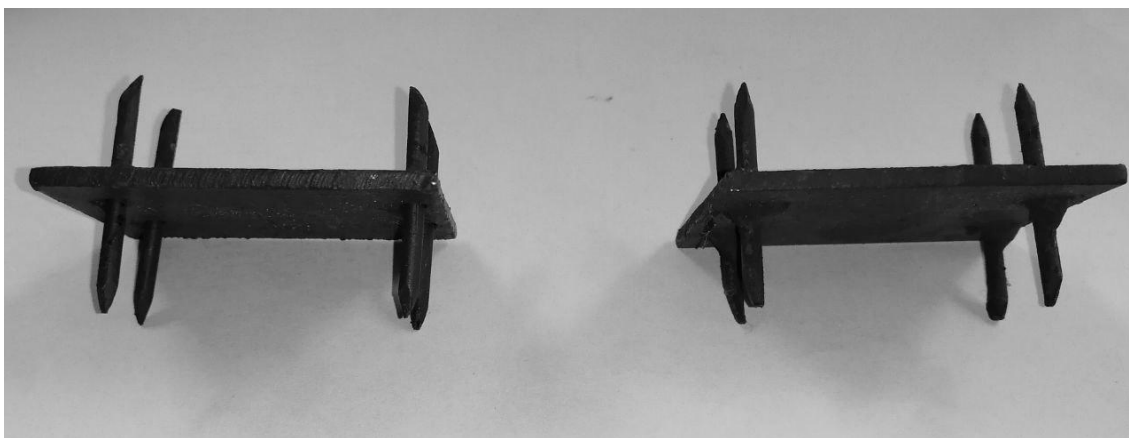


Рисунок 1 – Нагельные пластины

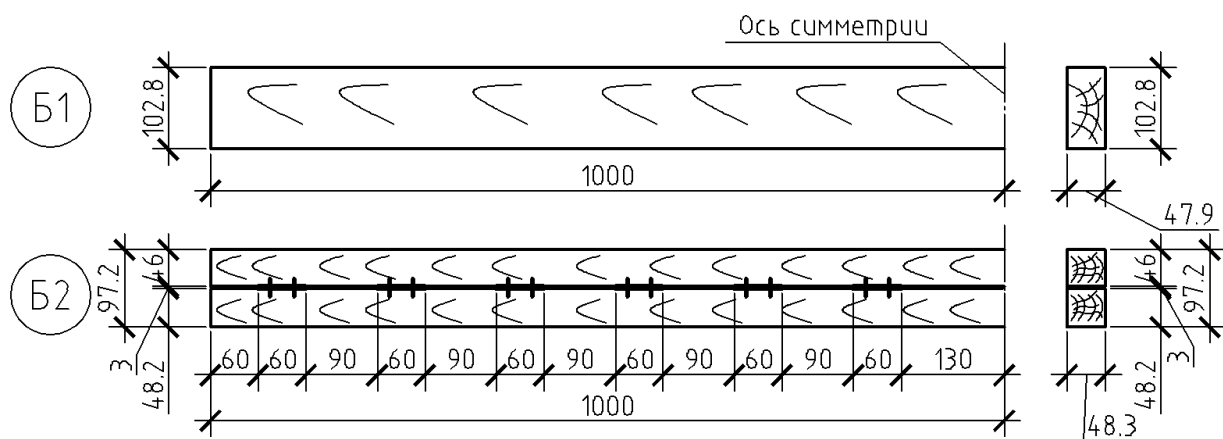


Рисунок 2 – Общий вид испытываемых балок

### Методика экспериментальных исследований

Испытания балок кратковременной нагрузкой проводили на специально оборудованном стенде. Две балки опирались на опоры, не препятствующие перемещению их вдоль оси и обеспечивающие свободу угловых перемещений. Нагрузку прикладывали в третях пролета и передавали на балки через распределительные траверсы. Усилия в балках создавали путем приложения к ним нагрузки ступенями  $F = 0.2 \text{ кН}$  и доводили ее до величины  $F = 1.0 \text{ кН}$ , что соответствует упругой области работы обеих балок. Общий вид установки приведен на рисунке 3.

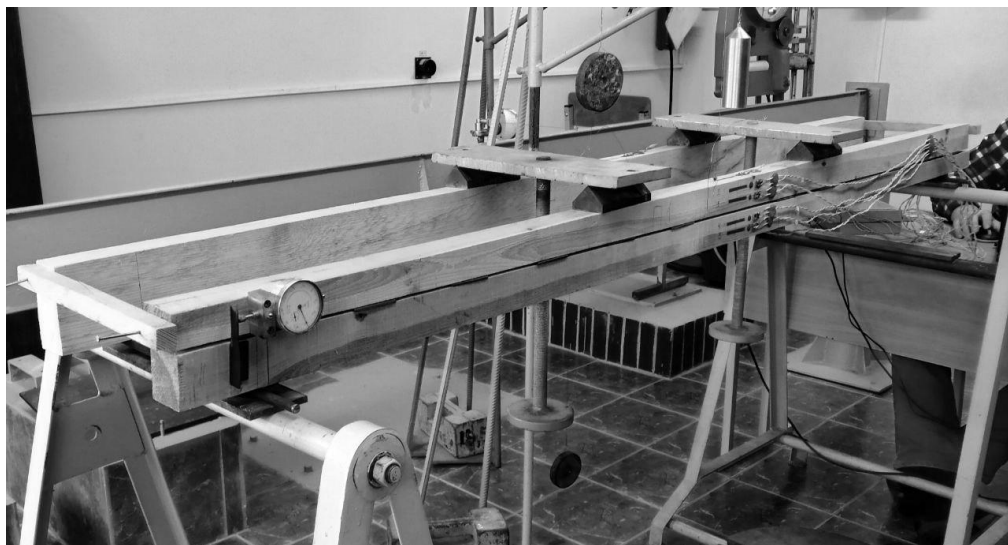
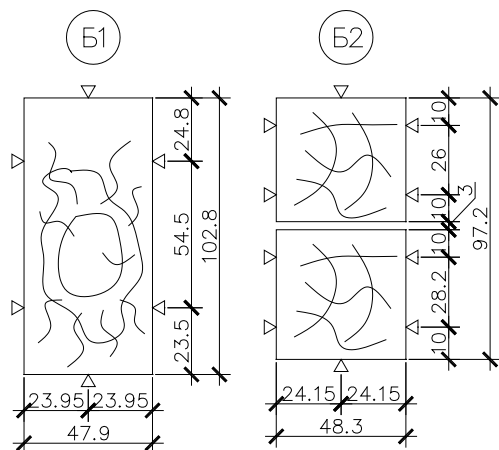


Рисунок 3 – Общий вид испытательной установки

В процессе испытаний проводили измерения прогибов балок в середине пролета с помощью прогибомеров 6-ПАО с ценой деления 0.01 мм. На опорных участках балки (Б2) были установлены индикаторы часового типа ИЧ-10 с ценой деления 0.01 мм для измерения сдвига брусков относительно друг друга. Оценку напряженного состояния проводили тензометрическим способом при помощи тензорезисторов с базой 50 мм. Отчеты по тензорезисторам осуществлялись в автоматическом режиме при помощи тензометрического комплекса «Горизонт» TSG-S01. Схема расстановки тензорезисторов приведена на рисунке 4(а).

а)



б)

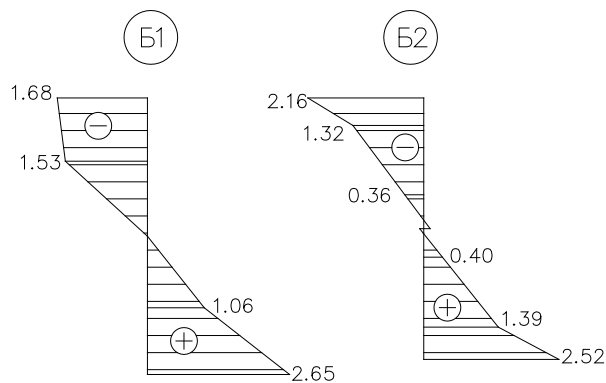


Рисунок 4 – Схема расстановки тензорезисторов (а), распределение нормальных напряжений (в МПа) по высоте поперечного сечения при нагрузке  $F = 1.0 \text{ кН}$  (б)

Величину нормальных напряжений по высоте поперечного сечения балок определяли по формуле:

$$\sigma = \varepsilon \times E_0, \quad (1)$$

где  $\varepsilon$  – относительные деформации;

$E_0$  – модуль упругости древесины вдоль волокон.

Модуль упругости древесины вдоль волокон определялся по результатам испытания балки цельного сечения (Б1) по формуле:

$$E_0 = \frac{23 \times \Delta F \times l_d^3}{108 \times b \times h^3 \times \Delta u_{\text{ср}}}, \quad (2)$$

где  $\Delta F$  – приращение нагрузки, кН;

$l_d$  – расстояние между центрами опор, см;

$b$  и  $h$  – ширина и высота балки соответственно, см;

$\Delta u_{\text{ср}}$  – среднее арифметическое значение приращения прогиба в середине пролета, см.

### Анализ результатов экспериментальных исследований

Распределение нормальных напряжений по высоте поперечного сечения испытанных балок показывает, что на первой ступени приложения нагрузки балка Б2 работает как элемент цельного сечения. На последующих этапах в балке Б2 в крайних волокнах верхнего бруска, близких к нейтральной оси, появляются растягивающие напряжения, т. е. балка работает как составной элемент. Характер распределения нормальных напряжений по высоте сечения балок на последней ступени нагружения представлен на рисунке 4(б).

Значение коэффициента  $K_w$ , учитывающего уменьшения момента сопротивления поперечного сечения за счет податливости нагельных пластин, определяли по формуле:

$$K_w = \sigma / \sigma_{\text{ef}}, \quad (3)$$

где  $\sigma = (|\sigma_o| + |\sigma_t|) / 2$  – среднее арифметическое максимальных напряжений сжатия и растяжения в сечении цельного элемента;

$\sigma_{ef} = (|\sigma_o| + |\sigma_t|) / 2$  – среднее арифметическое максимальных напряжений сжатия и растяжения в сечении составного элемента.

Используя данные (рисунок 4,б), получаем значения  $K_w = 0.93$ , что больше нормируемой величины  $K_w = 0.70$  (таблица 7.3 [10]).

Из графиков на рисунке 5 следует, что нарастание прогибов происходило практически равномерно в прямой зависимости от нагрузки.

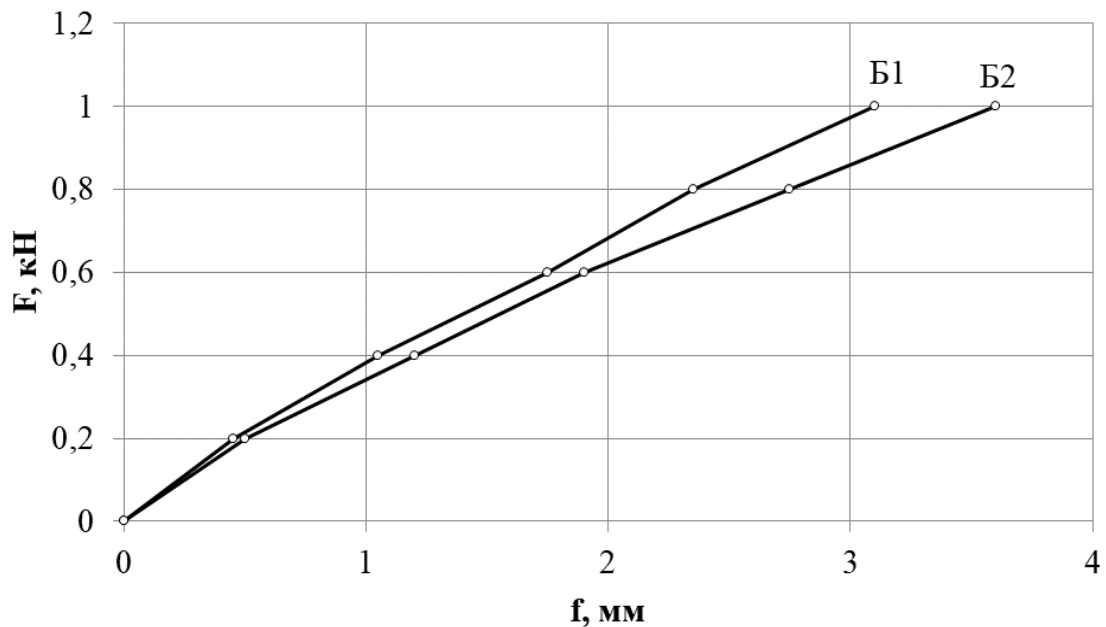


Рисунок 5 – Зависимость деформаций балок в середине пролета от нагрузки

Значение коэффициента  $K_i$ , учитывающего уменьшение момента инерции поперечного сечения за счет податливости нагельных пластин, определяли по формуле:

$$K_i = f / f_{ef}, \quad (4)$$

где  $f$  и  $f_{ef}$  – максимальные прогибы в середине пролета балки цельного и составного сечения соответственно.

Значение сечения  $K_i = 0.86$ , что значительно больше нормируемой величины (таблица 7.3 [10]).

Сравнительный анализ графика зависимости деформаций от нагрузки балки Б2 и балок составного сечения с соединениями, например, на гвоздях и винтах [11], показал, что конструкции с соединениями на нагельных пластинах имеют большую жесткость, очевидно, из-за увеличения количества связей на сдвиг на одной и той же площади крепления.

Деформации сдвига брусков относительно друг друга для балки составного сечения составили 0.05 мм, что значительно ниже нормируемой величины 1.5 мм [12].

### Заключение

Проведенные испытания показали, что деревянные балки составного по высоте сечения на нагельных пластинах могут конкурировать с составными балками на других видах дискретных связей. Полученные величины коэффициента  $K_w$  к моменту сопротивления поперечного сечения и  $K_i$  к моменту инерции поперечного сечения значительно больше нормируемых величин. Выпол-

ненные экспериментальные исследования поставили ряд задач для дальнейшей работы, а именно:

- изучение влияния шага расстановки нагельных пластин по длине балки на ее несущую способность и деформативность;
- проведение испытаний балок на действие кратковременных нагрузок до их разрушения;
- проведение испытаний балок на действие длительных нагрузок.

#### **Список цитированных источников**

1. Гётц, К.-Г. Атлас деревянных конструкций / К.-Г. Гётц, Д. Хоор, К. Мёлер, Ю. Наттерер; пер. с нем. Н.И. Александровой; под ред. В.В. Ермолова. – М.: Стройиздат, 1985. – 272 с.
2. Римшин, В.И. Соединения элементов деревянных конструкций на шпонках и шайбах / В.И. Римшин [и др.] // Вестник МГСУ, 2016. – С. 35 – 50.
3. Зотова, И.М. Жестокость и прочность деревянных клееных балок с наклонно вклеенными стержнями / И.М. Зотова // Исследования в области деревянных конструкций: сб. науч. тр. / ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко: под ред. Л.М. Ковальчука. – М., 1985. – С. 74-82.
4. Линьков, В.И. Исследование конструкции составной балки их цельной древесины / В.И. Линьков // Разработка и совершенствование деревянных конструкций: сб. науч. тр. / ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко: под ред. С.Б. Турковского. – М., 1989. – С. 54-59.
5. Пискунов, Ю.В. Несущие деревянные конструкции с соединениями на нагельных пластинах и элементах / Ю.В. Пискунов // Изв. вузов. Строительство и архитектура. – 1988. – № 6. – С. 13–17.
6. Конструкции из дерева и пластмасс: учеб. для вузов / Ю.В. Слицкоухов [и др.]; под ред. Г.Г. Карлсена и Ю.В. Слицкоухова. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1986. – 543 с.
7. Рекомендации по проектированию и изготовлению деревянных конструкций с соединениями на пластинах с цилиндрическими нагельями (системы КирПИ – ЦНИИСК) / ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко. – М.: 1988. – 77 с.
8. Соединения на зубчатых и нагельных пластинах // [электронный ресурс]. – 2015. – Режим доступа: <http://gardenweb.ru/soedineniya-na-zubchatykh-i-nagelnykh-plastinakh> – Дата доступа: 06.03.2019.
9. Жук, В.В. Исследование соединений деревянных элементов на нагельных пластинах при кратковременном действии нагрузки / В.В. Жук, А.В. Антипович // Вестник БрГТУ. – 2019. – N1<sub>(114)</sub>: Строительство и архитектура. – С. 63-66.
10. Технический кодекс установившейся практики. Деревянные конструкции. Строительные нормы проектирования. ТКП 45–5.05–146-2009(02250). – Введ. 01.01.2010. – Минск: Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2009. – 63 с.
11. Жук, В.В. Способы повышения несущей способности деревянных чердачных перекрытий / В.В. Жук // Актуальные проблемы инновационной подготовки инженерных кадров при переходе строительной отрасли на европейские стандарты: сб. Междунар. науч.-техн. статей (матер. науч.-метод. конф.), Минск, 26-27 мая 2015 г. / БНТУ; редкол.: В.Ф. Зверев, С.М. Коледа. – Минск: БНТУ, 2015. – С. 89-95.
12. Рекомендации по испытанию соединений деревянных конструкций. – М.: Стройиздат, 1980. – 40 с.