

Жук В.В., Мелюх Д.В., Милашук Е.С.

**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. Несущая способность составных балок, например, на дубовых пластинчатых нагелях на 10-20 % меньше, а прогиб на 25-50% больше, чем монолитных балок того же сечения [1]. Наибольший пролет балок из чистообрезных брусьев может быть не более 6,2м, что ограничивает их применение в строительстве.

В ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко разработаны составные балки с ветвями из клееной древесины, соединенными наклонно вклеенными металлическими стержнями[2], 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[3]. При изготовлении таких балок возрастает их стоимость и металлоемкость.

В зарубежной практике прослеживается тенденция применения балок составного сечения на металлических зубчатых пластинах(МЗП). Так, компания “SystembauWolf”[4] разработала несущие конструкции пролетом до 30 м, причем, брусья получают при конической распиловке бревен, что позволяет изготавливать балки постоянной или переменной высоты. Более того, наличие собственного производства МЗП, стационарного и мобильного оборудования для запрессовки пластин, программного обеспечения, позволяющего оперативно проектировать конструкции и выдавать для производства рабочую документацию, позволило компании занять ведущую позицию в области производства деревянных конструкций.

При проверке прочности и жесткости балок составного сечения на податливых связях их моменты сопротивления и моменты инерции, вычисленные как для монолитного сечения, уменьшают умножением соответственно на коэффициенты  $k_w$  и  $k_i$ , значения которых в зависимости от числа сплачиваемых брусьев и пролета балки приведены в таблице 7.3 [5]. Экспериментальными исследованиями составных деревянных балок [6,7] установлено, что прочность и жесткость конструкций зависит как от геометрических характеристик составного элемента, так и от вида дискретных связей.

В настоящей статье приводятся результаты экспериментальных исследований деревянных балок составного сечения на МЗП.

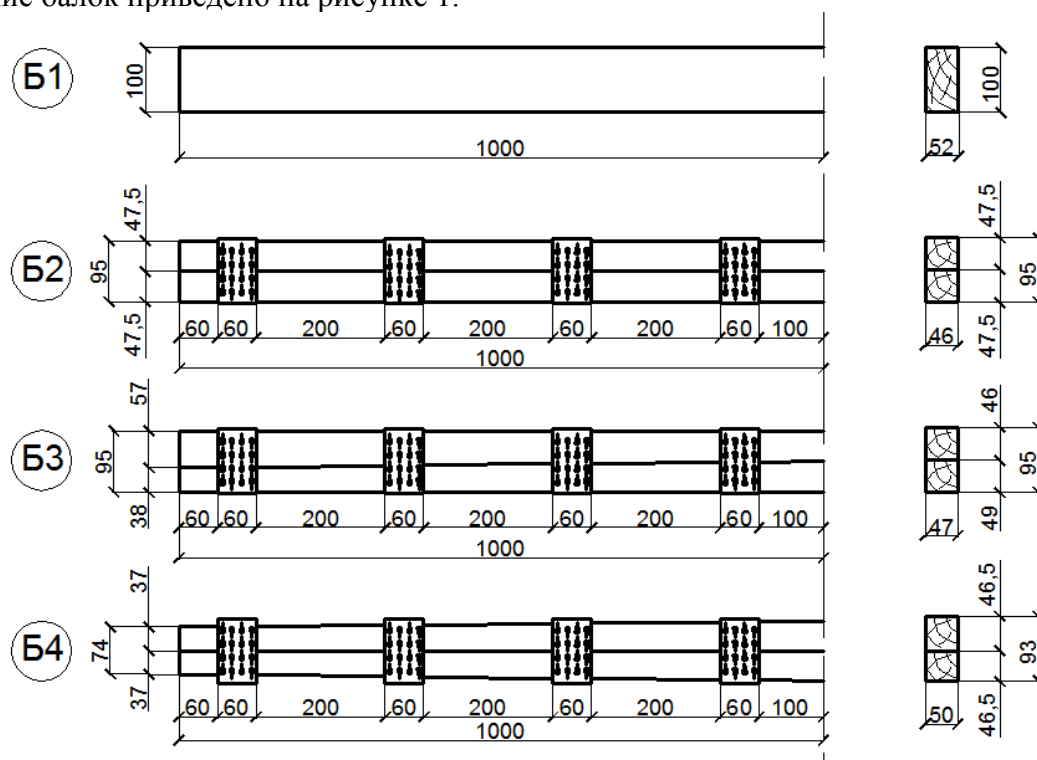
#### **Характеристика объекта исследования**

Работа выполнялась в два этапа. Учитывая, что несущая способность МЗП зависит от длины, формы и частоты зубьев, ориентации пластин по отношению к волокнам древесины [8], на первом этапе были испытаны образцы двухсрезных соединений деревянных элементов на действие кратковременных нагрузок при сдвиге[9]. Установлено, что величина усилий, приходящихся на 1 зуб, при деформации 1,5 мм [10], равна: при передаче усилия вдоль волокон - 140Н, при передаче усилия под углом  $90^\circ$  - 148Н. Полученные данные использовались для определения размеров МЗП и их количества при изготовлении опытных образцов балок. На втором этапе определялось напряженно-деформированное состояние деревянных балок составного сечения.

Для испытания были изготовлены четыре балки из древесины сосны 2 сорта с влажностью 12-16%. Контрольный образец (Б1) имел размеры  $bxhxl = 52x100x2000$  мм. Балка (Б2) изготовлена из двух брусков  $bxhxl = 46x47,5x2000$  мм. Балка (Б3) изготовлена из двух брусков, имеющих форму призмы переменного сечения, нижнее основание сечением  $bxh = 47x57$  мм, верхнее основание –  $bxh = 47x38$  мм; высота(длина брусков) – 2000 мм. При изготовлении балки нижнее основание первого бруска совмещалось с верхним основанием второго бруска, таким образом балка (Б3) имела постоянное по всей длине сечение  $bxh = 47x95$  мм. Балка (Б4) была изготовлена по аналогии с балкой (Б3) из брусков, имеющих форму призмы переменного сечения, только при изготовлении балки совмещались нижние и верхние основания.

В результате балка (Б4) имела переменное по высоте сечение: один конец – 112 мм, второй конец – 74 мм, в середине пролета – 93 мм.

Для соединения деревянных элементов балок (Б2-Б4) между собой использовалась немаркированные металлические зубчатые пластины российского производства. Пластины полученные путем штамповки из оцинкованной стали толщиной 1 мм имеют прямое расположение зубьев треугольной формы. Ширина зубьев у основания 5 мм, их высота 14,8 мм. Расстояние между зубьями по длине пластины 14 мм, по ширине пластины 21 мм, при этом четные ряды зубьев сдвинуты по отношению к нечетным на 7 мм. Для соединения элементов балок (Б2-Б4) использовались пластины с размерами 60x100 мм. Запрессовку МЗП выполняли с использованием универсальной испытательной машины Р-10. Давление запрессовки прикладывалось одновременно по всей плоскости МЗП до полного внедрения зубьев в древесину. Конструктивное решение балок приведено на рисунке 1.



**Рисунок 1 – 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 пролёта и передавали на балки через распределительные траверсы. Усилия в балках создавали путем приложения к ним нагрузки ступенями  $F=0,2$  кН и доводили ее до величины  $F=1,2$  кН, что составило 50% от расчетной нагрузки контрольного образца балки (Б1). Общий вид установки приведен на рисунке 2.



**Рисунок 2 – Общий вид испытательной установки**

В процессе испытаний проводили измерения прогибов балок в середине пролета с помощью прогибомеров 6ПАО с ценой деления 0,01 мм. На опорных участках балок (Б2-Б4) 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 20 мм. Отчёты по тензорезисторам осуществлялись в автоматическом режиме при помощи специального тензометрического комплекса ТИССА. Схема расстановки тензорезисторов приведена на рисунке 3а.

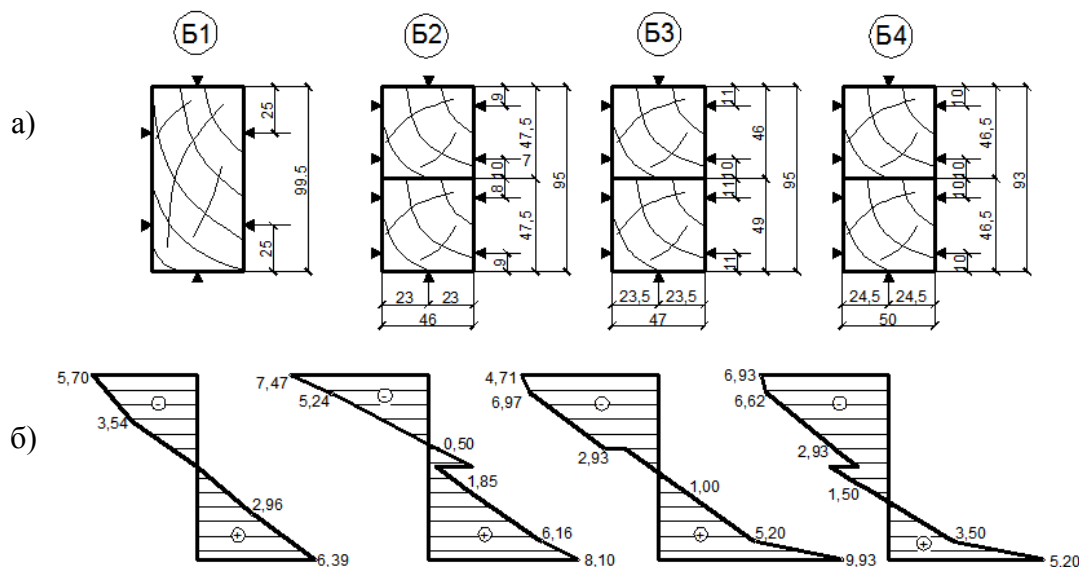


Рисунок 3 – Схема расстановки тензорезисторов (а), распределение нормальных напряжений (в МПа) по высоте поперечного сечения при нагрузке  $F=1.2$  кН (б)

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

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

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:

$$E_0 = \frac{23 \cdot \Delta F \cdot l_a^3}{108 \cdot b \cdot h^3 \cdot \Delta u_{cp}}, \quad (2)$$

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

$l_a$  – расстояние между центрами опор, см;

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

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

#### Анализ результатов экспериментальных исследований

Распределение нормальных напряжений по высоте поперечного сечения испытанных балок (рисунок 3, б) показывает, что в верхнем бруске балок (Б3 и Б4) возникают сжимающие, а в нижней – растягивающие напряжения, т.е. их работа приближается к работе балки (Б1) монолитного сечения. В балке (Б2) в крайних волокнах верхнего бруска, близких к нейтральной оси, появляются растягивающие напряжения, т.е. балка работает как составной элемент. Можно предположить, что смещение нейтральной оси балок (Б3-Б4) по отношению к плоскости соединения брусков между собой способствует повышению несущей способности их по сравнению с балкой (Б2).

Величина коэффициента  $k_w$  определялась по формуле:

$$k_w = \frac{\sigma}{\sigma_{ef}}, \quad (3)$$

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

Используя данные рисунка 3,б, получим:  $k_w = 0,78; 0,68; 0,80$  соответственно для балки Б2, Б3 и Б4, что практически согласуется с нормируемым значением  $k_w = 0,70$  (таблица 7.3 [5]).

Из графиков на рисунке 4 следует, что нарастание прогибов происходило практически равномерно в прямой зависимости от нагрузки. Величина коэффициента  $k_i$ , определенная по формуле:

$$k_i = \frac{f}{f_{ef}}, \quad (4)$$

где  $f$  и  $f_{ef}$  — максимальные прогибы в середине пролета балки цельного и составного элемента соответственно, составила:

$k_i = 0,79$  для балок Б2 и Б3 и  $k_i = 0,71$  для балки Б4, что больше нормируемой величины  $k_i = 0,45$  (таблица 7.3 [5]).

Сравнительный анализ графиков зависимости деформаций от нагрузки балок Б2-Б4 и балок составного сечения с соединениями, например, на гвоздях и винтах [6] показал, что конструкции с соединениями на МЗП 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 балок Б2-Б4 составного сечения составили 0,09 мм, что значительно ниже нормируемой величины 1,5 мм [10].

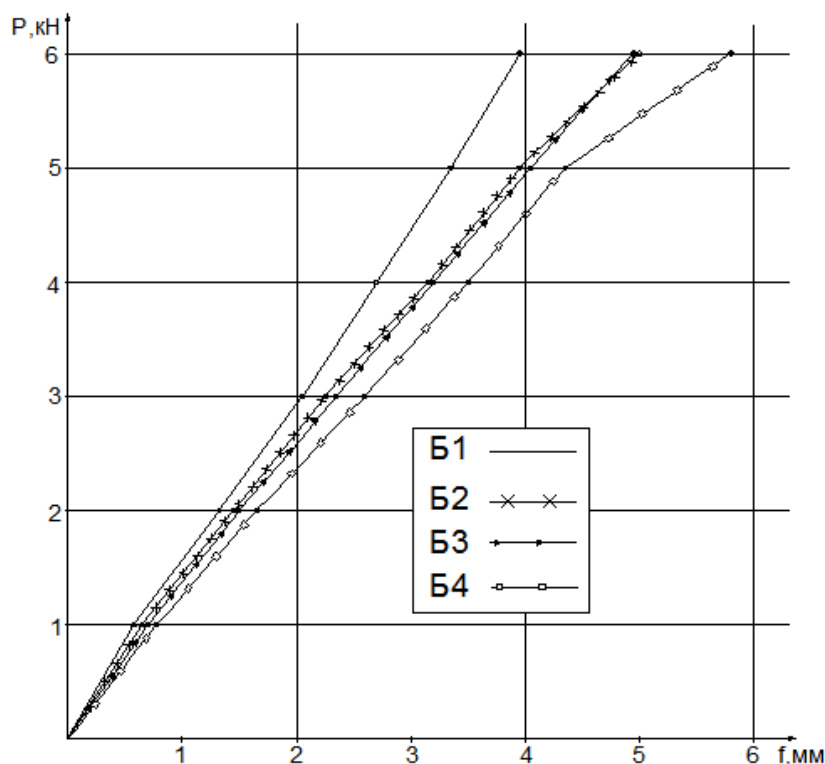


Рисунок 4 – Прогибы балок в середине пролета

### Заключение

Проведенные испытания показали, что деревянные балки составного по высоте сечения на МЗП могут конкурировать с составными балками на других видах дискретных связей. Полученные величины коэффициентов  $k_w$  к моменту сопротивления поперечного сечения находятся в пределах нормируемой величины  $k_w = 0,70$ . Коэффициенты  $k_i$  к моменту инерции поперечного сечения находятся в пределах 0,71-0,79, что в среднем в 1,67 раза выше нормируемой величины  $k_i = 0,45$ . Смещение нейтральной оси балок, по отношению к плоскости соединения брусков позволяет повысить несущую способность их по сравнению с балкой, где эти оси совпадают. Проведенные экспериментальные работы поставили ряд задач для дальнейших исследований, а именно:

- изучение влияния шага расстановки МЗП по длине балки на ее несущую способность и деформативность;

-проведение натурных испытаний балок на действие кратковременных и длительных нагрузок.

### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Шишкин, В.Е. Конструкции из дерева и пластмасс / В.Е. Шишкин – М.: Стройиздат, 1966. - 331с.
2. Зотова, И.М. Жесткость 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.
3. 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.
4. Вольф система. Техника со знаком качества. Проспект компании SystembauWolf.
5. 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.
6. 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.
7. Сморгачев, А.А. Исследование работы составных стержней на дискретных связях / А.А. Сморгачев, А.С. Шевелев // Промышленное и гражданское строительство. – 2009. – N1.- С.16-17.
8. Особенности применения и расчета металлозубчатых пластин. MiTek Россия. Технология для деревянных конструкций [Электронный ресурс]. – 2011. – Режим доступа <http://www/mitek.ru/zubchatyeplastiny/plastiny/primenenie-MZP.html> - Дата доступа 15.09.2014.
9. Жук, В.В. Исследование соединений деревянных конструкций на металлических зубчатых пластинах при действии кратковременных нагрузок / В.В. Жук, Д.В. Мелюх // Теория и практика исследований и проектирования в строительстве с применением систем автоматизированного проектирования (САПР): сб. ст. междунар. науч. – техн. конф., Брест, 30-31 марта 2017 года / БрГТУ; редкол. С.М.Семенюк [и др]. – Брест: БрГТУ, 2017. – С.47-50.
10. СП 64.13330.2011. Деревянные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-25-80. Введ.05.20.2011. – М.: Минрегион России. 2010. – 86с.