

## СТРОИТЕЛЬСТВО. АРХИТЕКТУРА

УДК 624.011.02

*С. С. Гомон, Т. А. Сасовский*

### РАБОТА ИЗГИБАЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ КЛЕЕННОЙ ДРЕВЕСИНЫ ПРИ МАЛОЦИКЛОВЫХ НАГРУЗКАХ

UDC 624.011.02

*S. S. Gomon, T. A. Sasovsky*

### WORK OF FLEXURAL ELEMENTS MADE OF LAMINATED WOOD AT LOW-CYCLE LOADS

#### **Аннотация**

Изложены методика и результаты натурных экспериментальных исследований балок из клеенной древесины при однократных статических и малоцикловых нагрузках, а также проанализированы и обобщены результаты испытаний.

#### **Ключевые слова:**

балки из клеенной древесины, деформативность, несущая способность.

#### **Abstract**

The technique and the results of full-scale experimental studies of laminated wood beams at single static and low-cycle loads are presented, and the test results are analyzed and generalized.

#### **Key words:**

laminated wood beam, deformability, load-bearing capacity.

#### **Введение**

Количество качественной древесины в мире с каждым годом уменьшается, и разумно в этой ситуации – безотходное использование сырья и повышение качества изделий при помощи современных технологий переработки и склеивания. Клеенная древесина есть перспективный строительный материал, который можно назвать материалом нынешнего и будущего, поскольку древесина – это единственный материал, который периодически возобновляется природой и является наиболее экологически чистым. Долговечность работы

клеенной древесины зависит от качества материалов и изготовления, уровня напряженно-деформированного состояния и условий эксплуатации. Поэтому проблема исследования состояния древесины под нагрузкой в сжатых, растянутых, изгибаемых конструкциях с построением полной диаграммы деформирования материала в этих конструкциях и установления напряженного состояния от начала загрузки до полного разрушения в последние годы приобретает все больший интерес ученых в связи с постепенным переходом стран постсоветского пространства к внедрению рас-

четных деформационных моделей расчета строительных конструкций.

### Основная часть

Для проведения испытаний дощато-клеенных деревянных балок при действии малоцикловых нагрузок в лаборатории кафедры промышленного, граж-

данского строительства и инженерных сооружений Национального университета водного хозяйства и природопользования (Украина) была усовершенствована испытательная установка, которая удовлетворяла всем условиям проведения экспериментальных исследований (рис. 1).

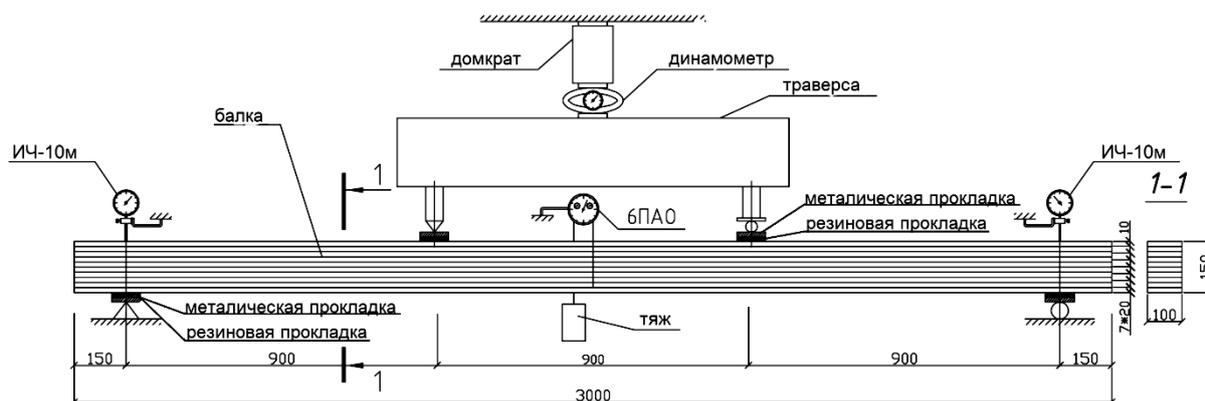


Рис. 1. Схема испытательной установки

Задачей экспериментальных испытаний дощато-клеенных деревянных балок было изучение следующих вопросов:

- определение несущей способности балок при действии статических и малоцикловых нагрузок;
- исследование напряженно-деформированного состояния и характера разрушения дощато-клеенных деревянных балок.

Объект исследования: балки дощато-клеенные прямоугольного сечения.

Предмет исследований: закономерности напряженно-деформированного состояния балок из клеенной древесины под нагрузкой.

Для реализации поставленной цели и указанных задач было предусмотрено изготовление опытных образцов: однопролетных балок из клеенной древесины из сосны второго сорта. Подготовка и сушка древесины для изготовления образцов проводились в течение одного года в условиях природной среды при влажности 60...70 % и темпера-

туре 18...21 °С с доведением до необходимой проектной влажности древесины 10 % в термокамере. Возраст древесины, из которой были сделаны заготовки, – 90...110 лет. Дощато-клеенные деревянные балки изготовлены в заводских условиях из строганых досок толщиной 25 мм, склеенных по пласту между собой при помощи резорцинового клея. Длина образцов составляет 3 м. Размеры поперечного сечения балок 100 × 150 мм.

Балки при испытании устанавливались на одну шарнирно-подвижную и одну шарнирно-неподвижную опоры. Сверху находилась траверса с базой 900 мм. Усилия, которые действовали на балку, создавались с помощью гидравлического домкрата ДГ-10, расположенного между балкой и траверсой. Домкрат подключался к насосной станции. Усилия в нем определялись по показаниям манометра насосной станции. Для обеспечения требуемой точности эксперимента шкала прессовой уста-

новки при испытаниях составляла 100 кН и не превышала ожидаемую величину разрушающего усилия более чем в 1,5...2 раза. Размер степени роста усилия при нагрузке образцов принят не более 0,08 разрушающего усилия. С целью равномерного распределения по площади опирания напряжений смятия древесины поперек волокон в зоне передачи усилия от домкрата на балку были установлены стальные пластины шириной 140 мм и длиной 300 мм на резиновых прокладках толщиной 20 мм (см. рис. 1).

Прогиб балки при нагрузке опре-

делялся разницей между деформациями перемещений посередине пролета и на опорах. Измерения перемещений балки проводились прогибомерами, которые были установлены посередине пролета (6ПАО), и индикаторами часового типа на опорах (ИЧ-10м).

Для измерения деформаций древесины по высоте балки на боковых поверхностях были наклеены электротензорезисторы, а на нижней и верхней гранях балок по всей длине зоны чистого изгиба вдоль волокон древесины – тензодатчики (рис. 2).

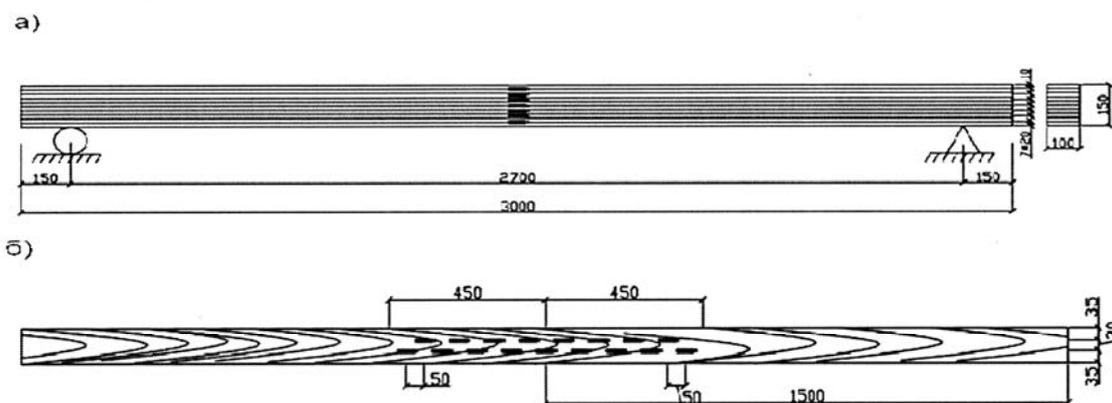


Рис. 2. Схема расположения тензодатчиков на опытных образцах: а – боковая сторона балки; б – сторона приложения нагрузки

При наклеивании тензорезисторов применялся клей БФ-2. Во всех случаях были использованы тензорезисторы с базой 50 мм. При испытании дощато-клеенных балок с помощью измерителя деформаций СИИТ-3М производилось снятие показателей тензорезисторов.

Средняя разрушающая нагрузка определялась по трем образцам-близнецам при приложении одноразовой статической нагрузки. После этих испытаний установлены следующие режимы приложения малоциклового нагружения опытных образцов:  $(0,2...0,4)M_p$  – для балок БДК-4, БДК-5, БДК-6;  $(0,2...0,6)M_p$  – для балок БДК-7, БДК-8, БДК-9;  $(0,2...0,8)M_p$  – для балок

БДК-10, БДК-11. Нагрузка прикладывалась ступенями на первом, втором, пятом, десятом, двадцатом, пятидесятом циклах и через каждые последующие пятьдесят циклов вплоть до разрушения.

Результаты испытания балок из клееной древесины представлены в табл. 1.

Основными показателями, которые фиксировались при испытании дощато-клеенных балок, были деформативность древесины в наиболее удалённых слоях от нейтральной линии сжатой и растянутой зон, несущая способность и количество циклов приложения нагрузок, которые выдержал образец при определенном режиме работы.

Образцы БДК-4, БДК-5 и БДК-6 после приложения 50-ти циклов повторных нагрузок, на основе остановки прироста деформаций в сжатой и растянутой зонах элемента и прироста прогибов, были разгружены до  $M = 0$  и на

51 цикле доведены до разрушения статической нагрузкой. На рис. 3 показано, как происходило деформирование наиболее отдаленных слоев древесины сжатой и растянутой зон балки при действии повторных загрузок.

Табл. 1. Сводная таблица испытания балок

| Тип балки | Нагрузка  | Потеря несущей способности   |
|-----------|---|--|
| БДК-1     | Однократная   | При 28,8 кН·м  |
| БДК-2     | Однократная   | При 27 кН·м  |
| БДК-3     | Однократная   | При 27,9 кН·м  |
| БДК-4     | Повторная, $(0,2...0,4)M_p$ от разрушающего момента | Не потеряла несущую способность после приложения расчетного числа повторных загрузок. Разрушена статической нагрузкой на 51 цикле при 27,65 кН·м                                   |
| БДК-5     | Повторная, $(0,2...0,4)M_p$ от разрушающего момента | Не потеряла несущую способность после приложения расчетного числа повторных загрузок. Разрушена статической нагрузкой на 51 цикле при 27,88 кН·м                                   |
| БДК-6     | Повторные, $(0,2...0,4)M_p$ от разрушающего момента | Не потеряла несущую способность после приложения расчетного числа повторных загрузок. Разрушена статической нагрузкой на 51 цикле при 27,17 кН·м                                   |
| БДК-7     | Повторная, $(0,2...0,6)M_p$ от разрушающего момента | Разрушилась на 241 цикле   |
| БДК-8     | Повторная, $(0,2...0,6)M_p$ от разрушающего момента | Разрушилась на 201 цикле   |
| БДК-9     | Повторная, $(0,2...0,6)M_p$ от разрушающего момента | Не потеряла несущую способность после приложения расчетного числа повторных загрузок. Разрушена статической нагрузкой на 501 цикле при 23,12 кН·м (86,6 % от разрушающей нагрузки) |
| БДК-10    | Повторная, $(0,2...0,8)M_p$ от разрушающего момента | Разрушилась на 10 цикле  |
| БДК-11    | Повторная, $(0,2...0,8)M_p$ от разрушающего момента | Разрушилась на 11 цикле  |

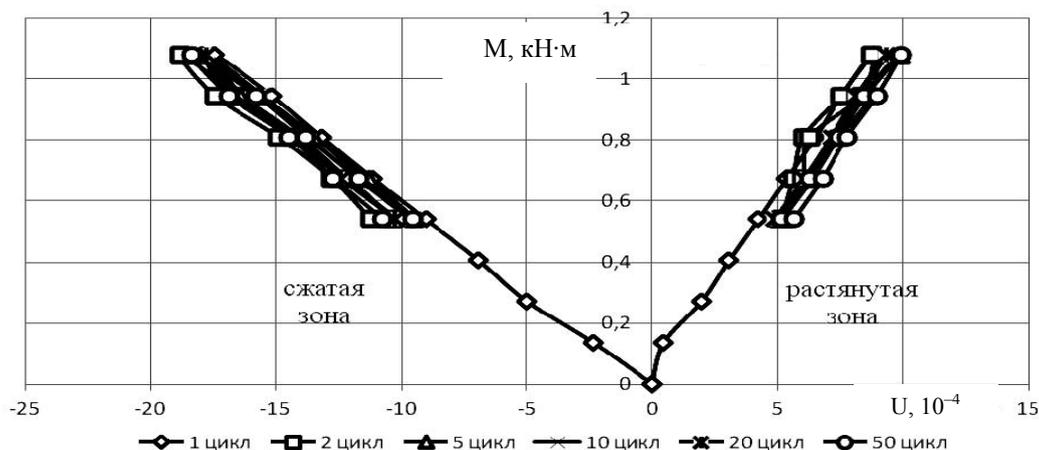


Рис. 3. Диаграмма деформирования наиболее удаленных слоев древесины сжатой и растянутой зон балки марки БДК-5

Относительные деформации в сжатой зоне после приложения 50-ти циклов малоцикловой нагрузки увеличились на 5 %, в растянутой – на 7 %.

Образцы БДК-7, БДК-8 и БДК-9 испытывались при повторных нагрузках уровней (0,2...0,6) от разрушающего момента  $M_p$ . Они работали в диапазоне значений значительных нагрузок. Прирост момента для этих балок на каждой из ступеней приложения нагрузки был  $\Delta M_p = 0,26 \text{ кН} \cdot \text{м}$  на каждом цикле загрузки–разгрузки. Образец БДК-7 потерял несущую способность с достижением предельных деформаций на 241 цик-

ле загрузки и разрушился под нагрузкой 3,6 кН. Балка БДК-8 потеряла несущую способность на 201 цикле. Балка БДК-9 отработала расчетное число – 500 циклов загрузки, не потеряла несущей способности, после чего была разгружена до  $M = 0$  и на 501 цикле разрушена статической нагрузкой. Относительные деформации в сжатой зоне после приложения 500 циклов малоцикловой нагрузки увеличились на 14 %, а в растянутой – на 17 %. График деформирования наиболее удаленных слоев древесины сжатой и растянутой зон балки БДК-9 представлен на рис. 4.

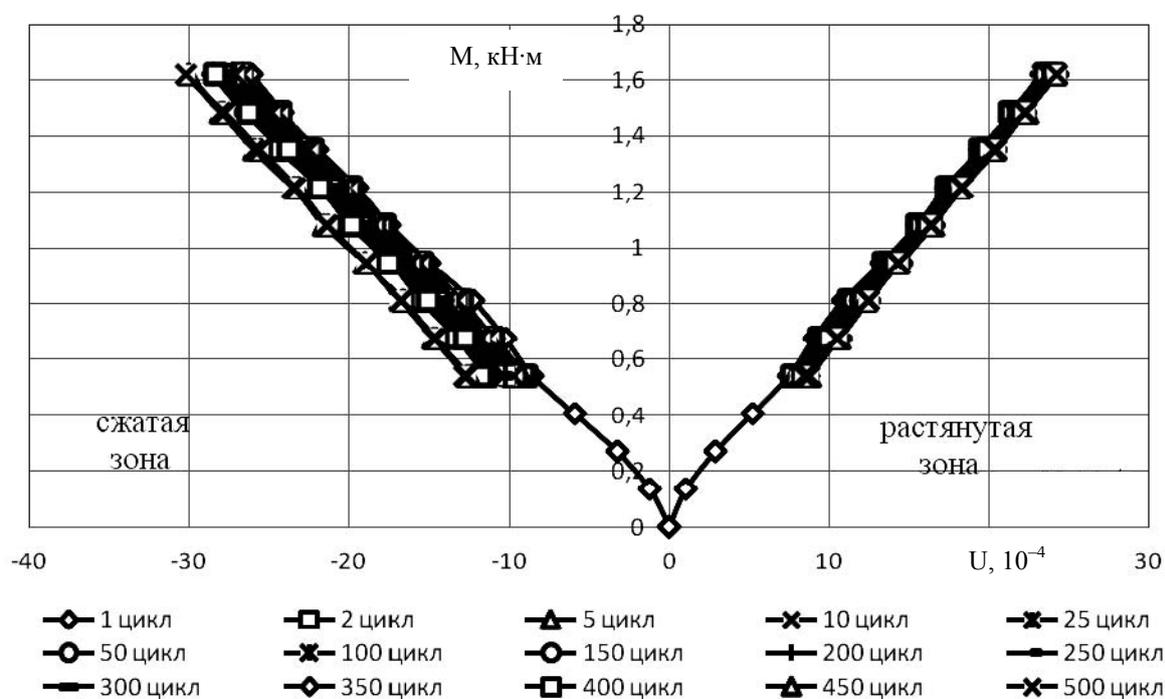


Рис. 4. Диаграмма деформирования наиболее удаленных слоев древесины сжатой и растянутой зон балки БДК-9

Образцы БДК-10 и БДК-11 испытывались при повторных нагрузках уровней (0,2...0,8) от разрушающего момента  $M_p$ . Некоторые образцы работали в диапазоне значений нагрузок, которые создавали режим работы от  $0,2M_p = 0,54 \text{ кН} \cdot \text{м}$  до  $0,8M_p = 2,16 \text{ кН} \cdot \text{м}$ , при приросте момента на каждой ступени приложения нагрузки  $\Delta M_p = 0,26 \text{ кН} \cdot \text{м}$  на каждом

цикле загрузки–разгрузки. Образец БДК-10 потерял несущую способность с достижением предельных деформаций на 10 цикле загрузки под нагрузкой 16,32 кН·м; образец БДК-11 – на 11 цикле загрузки под нагрузкой 15,67 кН·м.

Относительные деформации в сжатой зоне после приложения 11-ти циклов малоцикловой нагрузки увели-

чились на 7 %, а в растянутой – на 9 %. На рис. 5 можно увидеть, как происходило деформирование наиболее удалённых от нейтральной линии слоев

древесины сжатой и растянутой зон балки БДК-11 при действии повторных нагрузок.

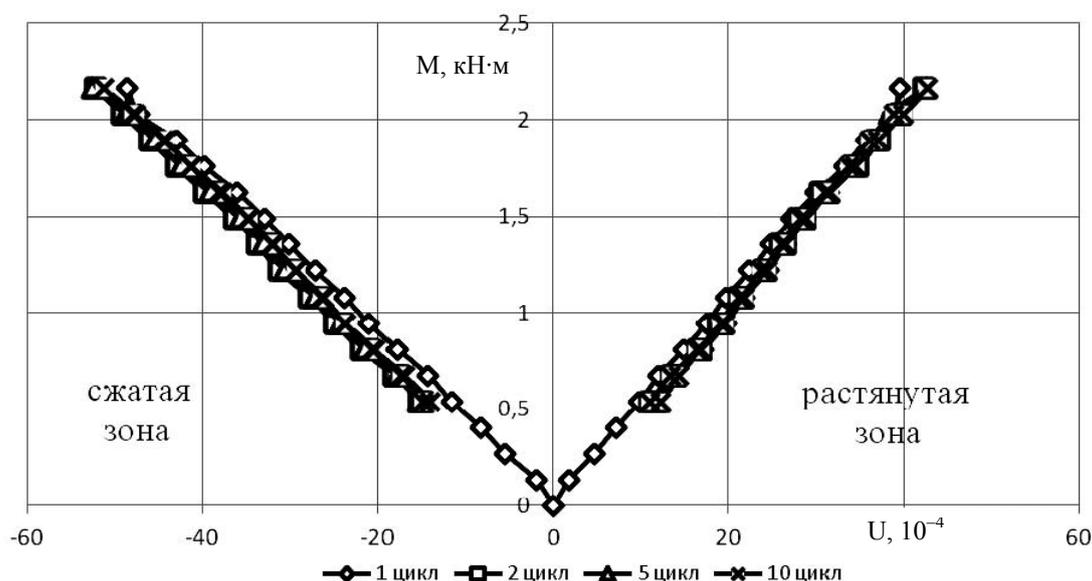


Рис. 5. Диаграмма деформирования наиболее удалённых слоев древесины сжатой и растянутой зон балки БДК-11

Экспериментальные исследования показали, что в балках из цельной древесины [1] и во всех балках из клееной древесины, начиная с начальной ступени первого цикла загрузки, наблюдалось смещение нейтральной линии в сторону растянутой зоны элемента (рис. 6 и 7). Данный процесс продолжается и при работе деревянных элементов при действии повторных нагрузок (см. рис. 6 и 7). Для этого явления есть несколько причин:

- при одних и тех же напряжениях деформации древесины при растяжении вдоль волокон меньше деформаций сжатия;
- прочность древесины осевому растяжению вдоль волокон почти в 2 раза больше прочности осевому сжатию;
- под действием повторных нагрузок происходит накопление пластических деформаций в древесине и они больше в сжатой зоне балки (см. рис. 4 и 5).

Вследствие действия повторных нагрузок наибольшее смещение наблюдалось на верхнем уровне второго цикла загрузки, и в дальнейшем, на следующих 5...20 циклах приложения нагрузки, происходит постоянное постепенное смещение нейтральной линии в сторону растянутой зоны. Площадь растянутой зоны, например, на втором цикле, в балке БДК-5 уменьшилась до 47,85 %, в балке БДК-11 – до 44,69 %. В зависимости от режимов работы сжатой и растянутой зон балки, при повторных нагрузках на 5...20 циклах, древесина приспосабливается к малоцикловой работе, и за счёт эластических деформаций происходит некоторое возвращение площади растянутой зоны до режима работы первого цикла (см. рис. 6 и 7).

На рис. 8 и 9 и в табл. 2 и 3 приведены диаграммы циклового изменения прогибов посередине балок марок БДК-5 и БДК-8 соответственно.

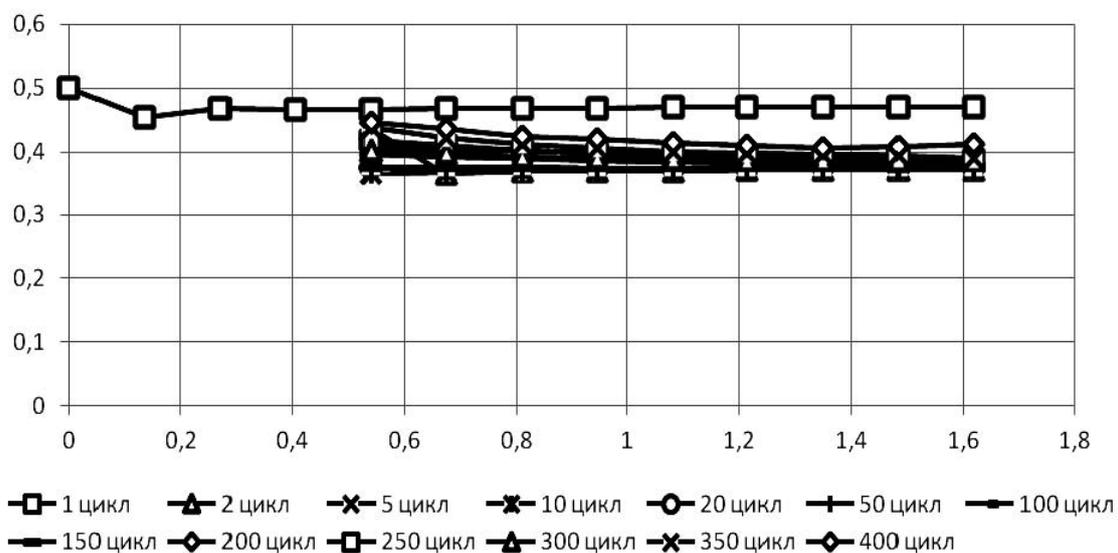


Рис. 6. Диаграмма циклового изменения положения нейтральной линии балки марки БДК-8

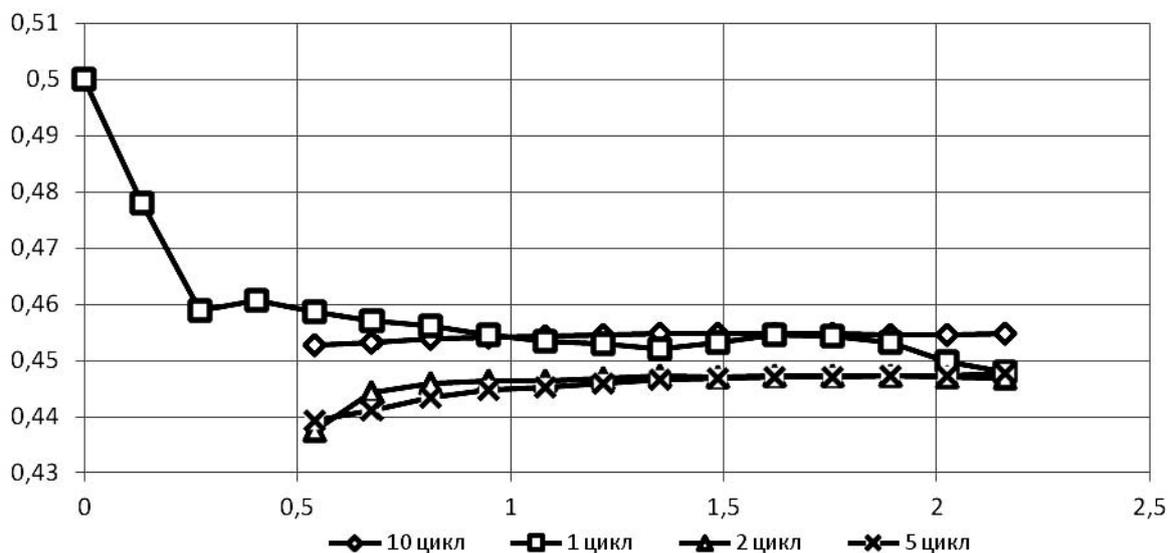


Рис. 7. Диаграмма циклового изменения положения нейтральной линии балки марки БДК-11

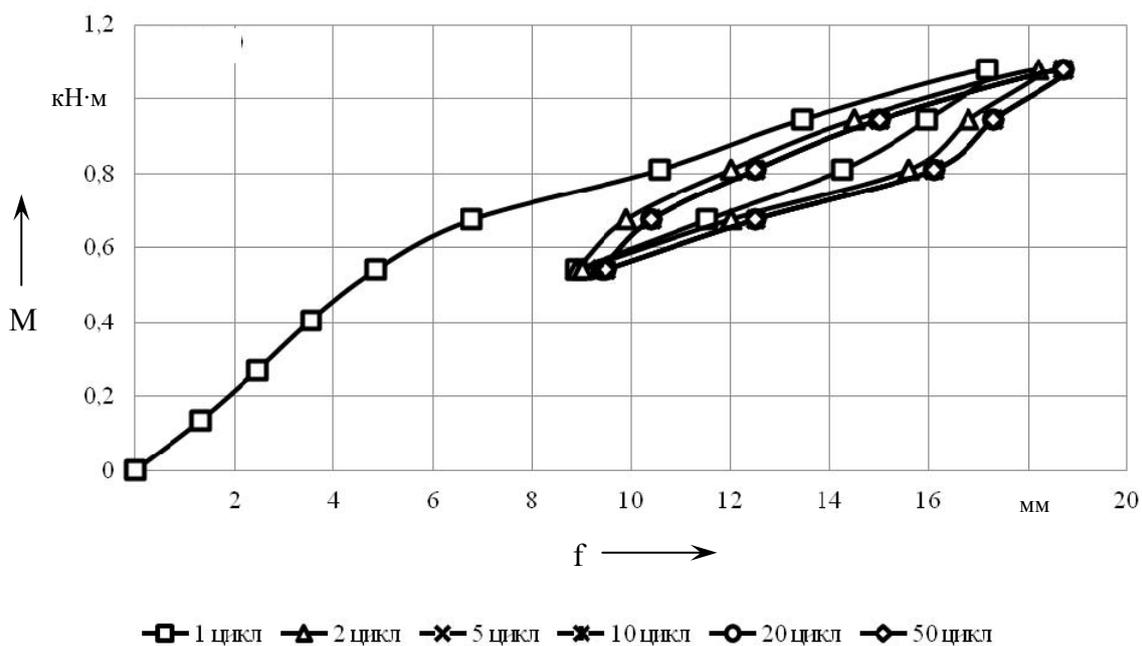


Рис. 8. График циклового изменения прогиба балки марки БДК-5

Табл. 2. Цикловое изменение прогиба балки марки БДК-5

| Цикл               | 1...2 | 2...5 | 5...10 | 10...20 | 20...50 |
|--------------------|-------|-------|--------|---------|---------|
| Прирост прогиба, % | 6     | 1,3   | 0,58   | 0,23    | 0,12    |

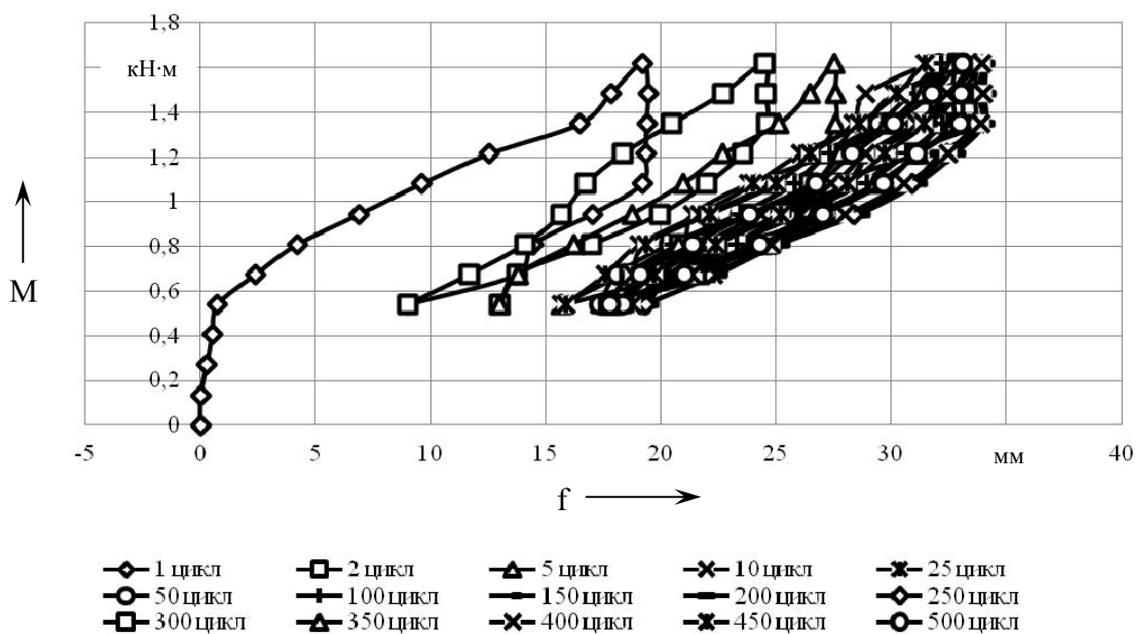


Рис. 9. График циклового изменения прогиба балки марки БДК-8

Табл. 3. Цикловое изменение прогиба балки марки БДК-8

| Цикл               | 1...2 | 1...5 | 1...10 | 1...25 | 1...50 | 1...100 | 1...150 |
|--------------------|-------|-------|--------|--------|--------|---------|---------|
| Прирост прогиба, % | 27,4  | 43,2  | 66,1   | 66,9   | 66,9   | 67,2    | 77,1    |

Продолжение табл. 3

| Цикл               | 1...200 | 1...250 | 1...300 | 1...350 | 1...400 | 1...450 | 1...500 |
|--------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Прирост прогиба, % | 76,4    | 74,9    | 70,9    | 69,9    | 66,4    | 63,7    | 62,1    |

В балке марки БДК-5 на верхнем уровне ( $M_n = 0,4M_p$ ) первого цикла загрузки прогиб посередине элемента в зоне чистого изгиба был  $f_{\text{сис},1}^{\text{max}} = 1,71$  см, на втором – достиг уровня  $f_{\text{сис},2}^{\text{max}} = 1,82$  см, на пятом –  $f_{\text{сис},5}^{\text{max}} = 1,84$  см и прирост прогиба составил 6 и 1,3 % соответственно. Начиная с пятого цикла произошла стабилизация прироста прогибов: так, на десятом цикле отмеченный прогиб стал  $f_{\text{сис},10}^{\text{max}} = 1,85$  см, на двадцатом –  $f_{\text{сис},20}^{\text{max}} = 1,86$  см, на пятидесятом –  $f_{\text{сис},50}^{\text{max}} = 1,87$  см. Прирост прогиба от пятого к десятому циклу составил 0,58 %, от десятого к двадцатому – 0,23 %, а от двадцатого к пятидесятому – 0,12 %.

На нижнем уровне нагружения  $\eta_M = 0,2$  прогиб в балке из клееной древесины марки БДК-5 на первом цикле был  $f_{\text{сис},1}^{\text{min}} = 0,485$  см, на втором – возрос на 81 %, а на двадцатом и пятидесятом –  $f_{\text{сис},20}^{\text{min}} = 0,938$  см и  $f_{\text{сис},50}^{\text{min}} = 0,95$  см. Прирост прогиба между циклами составил 5 и 8 % соответственно. Таким образом, в балке марки БДК-5 как на нижнем, так и на верхнем уровне цикловой нагрузки начиная с пятого цикла происходит затухание прироста прогиба.

На верхнем уровне  $\eta_M = 0,6$  наибольший прогиб в балке марки БДК-8 на первом цикле нагружения составил  $f_{\text{сис},1}^{\text{max}} = 1,922$  см, на втором –  $f_{\text{сис},2}^{\text{max}} = 2,449$  см, а на пятом –  $f_{\text{сис},5}^{\text{max}} = 2,754$  см. На втором цикле про-

гиб возрос на 27,4 %, на пятом – на 43,3 % по сравнению с первым, а прирост составил 15,9 %. Увеличение прогиба на верхнем уровне происходило до 150 цикла приложения повторных нагрузок, при этом он достиг максимума  $f_{\text{сис},150}^{\text{max}} = 3,401$  см и возрос на 77,1 %. Прирост между 5 и 150 циклами был 23 %. После сто пятидесятого цикла приложения нагрузки прирост прогиба практически не наблюдался. Прогиб на 500 цикле составил  $f_{\text{сис},500}^{\text{max}} = 3,308$  см.

При нагружении на нижнем уровне при  $M_n = 0,2M_p$  прогиб середины балки марки БДК-8 на первом цикле был  $f_{\text{сис},1}^{\text{min}} = 0,074$  см. На втором цикле прогиб возрос к  $f_{\text{сис},2}^{\text{min}} = 0,899$  см, на пятом –  $f_{\text{сис},5}^{\text{min}} = 1,301$  см и на двадцать пятом –  $f_{\text{сис},25}^{\text{min}} = 1,585$  см. Начиная со сто пятидесятого цикла, на котором  $f_{\text{сис},150}^{\text{min}} = 1,903$  см, прогиб практически больше не увеличивался. В этой же балке на верхнем уровне первого цикла при  $\eta_M = 0,6$  наибольший прогиб в середине пролета составил  $f_{\text{сис},1}^{\text{max}} = 1,922$  см, на втором –  $f_{\text{сис},2}^{\text{max}} = 2,449$  см, на пятом –  $f_{\text{сис},5}^{\text{max}} = 2,754$  см. Увеличение прогиба на верхнем уровне происходило до 150 цикла приложения повторных нагрузок, при этом он достиг максимума  $f_{\text{сис},150}^{\text{max}} = 3,401$  см и, таким образом, возрос на 77,1 %. Прирост между 5 и 150 циклами составил 23 %. После 150 цикла малоциклового нагружения на-

блюдалась стабилизация, а затем и уменьшение прогиба. Прогиб на 500 цикле был  $f_{\text{сус},500}^{\text{max}} = 3,308$  см и уменьшился на 2 %.

### **Выводы**

1. В результате предложенной методики исследований был установлен характер деформирования сжатой и растянутой зон изгибаемых элементов из

клеенной древесины при действии статических и повторных нагрузок.

2. Установлено влияние повторных нагрузок на несущую способность балок из клеенной древесины.

3. Построены диаграммы деформирования наиболее удаленных слоев древесины сжатой и растянутой зон балок.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Гомон, С. С.** Напружено-деформований стан нормальних перерізів за роботи деревини на поперечний згин з урахуванням повної діаграми деформування матеріалу / С. С. Гомон // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. – Рівне : НУВГП, 2011. – Вип. 22. – С. 266–271.

*Статья сдана в редакцию 12 октября 2015 года*

**Святослав Степанович Гомон**, канд. техн. наук, проф., Национальный университет водного хозяйства и природопользования. Тел.: +380-679-15-86-50.

**Тарас Анатольевич Сасовский**, аспирант, Национальный университет водного хозяйства и природопользования. E-mail: tarik\_work777@mail.ru.

**Svyatoslav Stepanovich Gomon**, PhD (Engineering), Prof., National University of Water Management and Nature Resources Use. Phone: +380-679-15-86-50.

**Taras Anatolyevich Sasovsky**, PhD student, National University of Water Management and Nature Resources Use. E-mail: tarik\_work777@mail.ru.