

УДК 624.011.2

*КОПАНИЦА ДМИТРИЙ ГЕОРГИЕВИЧ, докт. техн. наук, профессор,
kopanitsa@mail.ru*

*ЛОСКУТОВА ДИАНА ВЛАДИМИРОВНА, канд. техн. наук, доцент,
di-81@mail.ru*

*ДАНИЛЬСОН АРТЕМ ИВАНОВИЧ, магистрант,
Danilson_ai@mail.ru*

*Томский государственный архитектурно-строительный университет,
634003, г. Томск, пл. Соляная, 2*

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ КЛЕЕНОЙ БАЛКИ ИЗ ДРЕВЕСИНЫ, УСИЛЕННОЙ УГЛЕРОДНЫМ ВОЛОКНОМ, С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЦИФРОВОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ VIC3D

В статье приведены результаты экспериментальных исследований клеодощатой балки на статический изгиб. Балка армирована углеродной лентой, расположенной в двух нижних межламельных слоях. Испытания проведены на гидравлическом прессе. Для измерения деформаций и перемещений в режиме онлайн использована цифровая оптическая система Vic3D, работающая на принципе корреляции цифровых стереоскопических изображений. Определение линейных и сдвиговых деформаций проведено с частотой 1 Гц. Полученные картины распределения деформаций видимой поверхности балки отражают стадии упругого и упругопластического деформирования. Показана возможность использования цифровой оптической системы Vic3D для определения деформаций и схем разрушения клееной балки из древесины.

Ключевые слова: экспериментальные исследования; статическая нагрузка; армированная клеодощатая балка; углеродная лента; деформации; оптическая система Vic3D; изгиб.

*DMITRII G. KOPANITSA, DSc, Professor,
kopanitsa@mail.ru*

*DIANA V. LOSKUTOVA, PhD, A/Professor,
di-81@mail.ru*

*ARTEM I. DANILSON, Undergraduate Student,
Danilson_ai@mail.ru*

*Tomsk State University of Architecture and Building,
2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia*

CARBON FIBER REINFORCED LAMINATED TIMBER BEAMS STUDIED USING VIC-3D DIGITAL OPTICAL SYSTEM

The paper presents results of experimental research carried out into the static bending of reinforced laminated beam. The beam is reinforced with carbon tape placed in the two interlamellar bottom layers. Tests were carried out on a hydraulic press. Deformations and displacements online measurements are provided by the VIC-3D digital optical system based

on the principle of correlation between digital stereoscopic images. Linear and shear strains are determined with the frequency of 1 Hz. The obtained images of the stress distribution of the visible beam surface reflect the stage of elastic and elastoplastic deformation. The possibility of using the VIC-3D digital optical system for determination and destruction of laminated beams is shown in this paper.

Keywords: experimental research; static load; reinforced laminated beam, carbon tape; deformation; VIC-3D digital optical system; bending.

Использование в практике строительства клееных балок из древесины позволяет создать надежные конструктивные решения конструкций покрытия с большими пролетами. Современными клеодощатыми балками перекрывают пролеты до 30 м.

Для увеличения несущей способности и снижения деформативности клееных деревянных конструкций может быть использовано их армирование с применением современных композитных материалов. Экспериментальные исследования балок из древесины выполняются в течение длительного времени. Известны работы Л.М. Ковальчука [1], М.И. Делова [3], В.В. Фурсова [4]. Испытания клееных балок из древесины на действие статического изгиба и динамической нагрузки проведены С.В. Деордиевым [2]. Изучение работы армированных балок из древесины описано в работе С.И. Рощина [5]. Исследование деревянных балок, армированных полимеркомпозитной арматурой, проведены А.Б. Антаковым [6] и др.

Рассмотрим результаты экспериментальных исследований балки из клееной древесины, армированной тканью из углеродного волокна на действие статической нагрузки.

Использование углеволокна в качестве армирующего материала позволяет органично расположить его между ламелями клееной балки. На рис. 1 показана конструкция клеодощатой балки, армированной двумя углеродными волокнами.

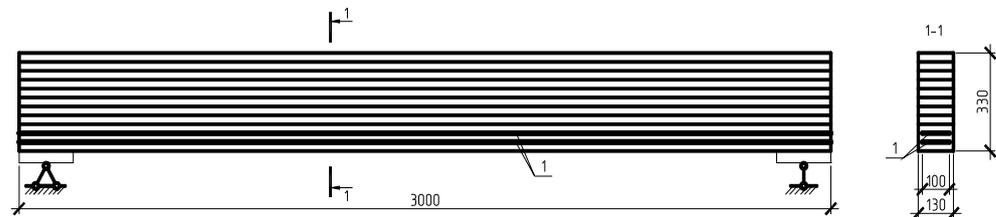


Рис. 1. Балка, армированная углеродным волокном FibARMTape 230/300

Определяющую роль в обеспечении прочности и деформативности клеодощатых балок играет клей. Прочность клеевого шва при сдвиге образцов, изготовленных из испытанных балок, составила не менее 14 МПа. Прочность клея хорошо согласуется с прочностью древесины.

В качестве армирующего элемента принята углеродная лента с показателями: прочность на растяжение – 4,3 ГПа; модуль упругости ленты – 245 ГПа; удлинение на разрыв волокна – 1,8 %. Углеродная ткань FibARMTape 230/300

имеет расчетную толщину 0,128 мм и ширину полотна 300 мм. По данным производителя прочность ткани на растяжение – 3,602 ГПа.

Для визуальной оценки изменения деформаций клеешошатовой балки усиленной углеродным волокном, при статическом изгибе использована цифровая оптическая система Vic3D, работа которой основана на принципе корреляции цифровых стереоскопических изображений. В основе метода лежит алгоритм отслеживания перемещений совокупности соседних пикселей, позволяющий определить значения перемещений и деформаций исследуемой поверхности. Применение двух цифровых видеокамер позволяет получать стереоскопические изображения поверхности образца и определять соответствующие деформации и перемещения.

На рис. 2 показана схема испытаний усиленной углеродными лентами клеешошатовой балки. Учитывая симметрию конструкции, отражающий слой должен быть нанесен только на правую половину балки.

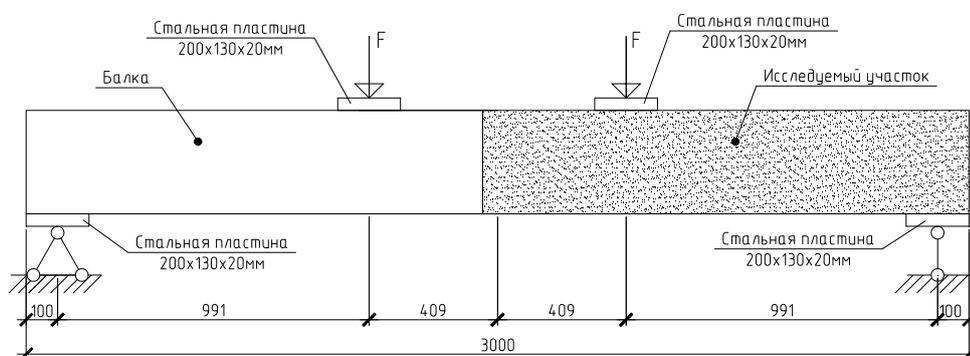


Рис. 2. Схема испытания балки

Испытания проведены на гидравлическом прессе с электронным регулированием скорости и величины нагрузки. Общий вид испытаний показан на рис. 3.



Рис. 3. Общий вид испытаний балки на поперечный изгиб

В процессе проведения эксперимента отсчеты снимались измерительным комплексом Vis3D с частотой 1 Гц. Нагрузка на этапе увеличивалась в течение 2 мин. Время выдержки определялось временем стабилизации деформаций древесины, определяемым показаниями датчика перемещений пресса. Увеличение нагрузки на этапе испытаний проводилось по 20 кН в диапазоне от 0 до 210 кН.

Использование системы Vis3D позволило определить значения линейных и сдвиговых относительных деформаций поверхности балки и ее перемещений. По результатам испытаний построена диаграмма работы балки в осях нагрузка-перемещение, показанная на рис. 4.

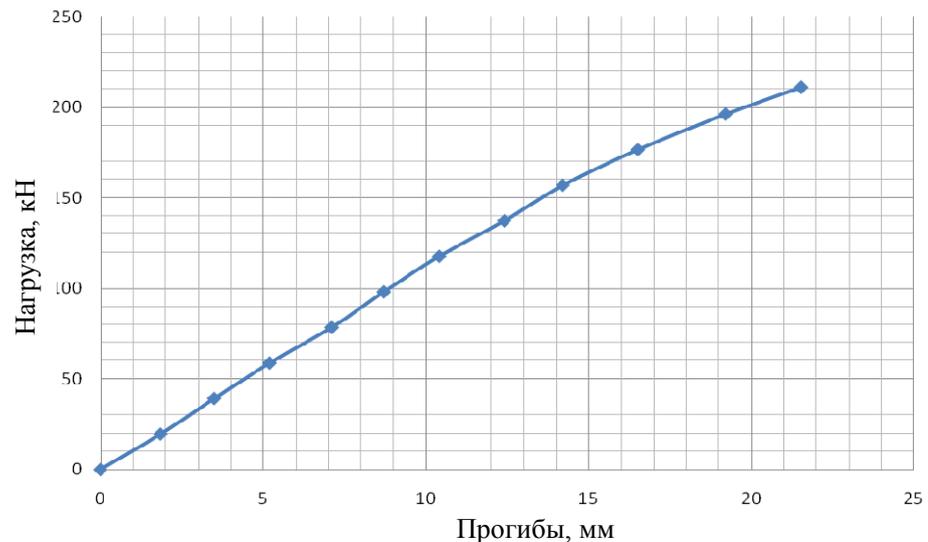
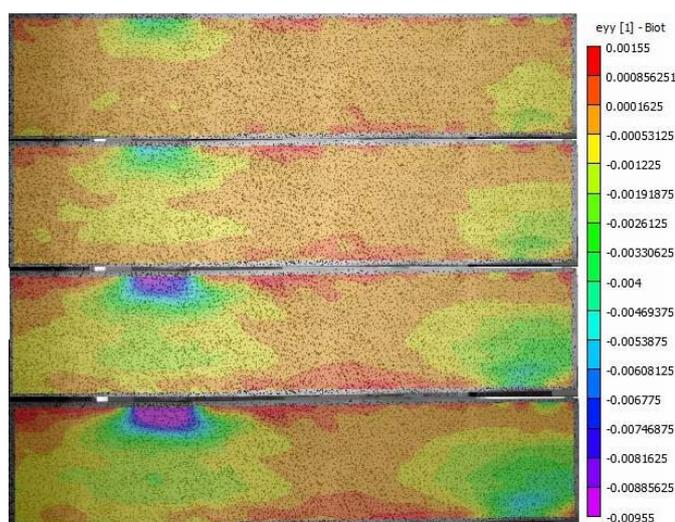


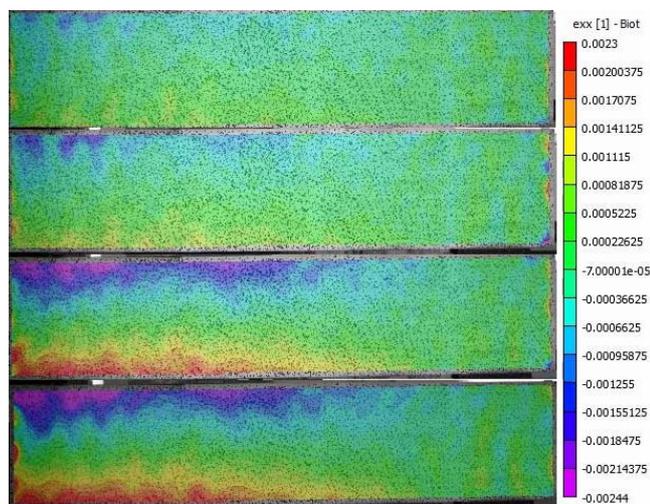
Рис. 4. Диаграмма работы клееной балки, усиленной углеродным волокном при статическом изгибе

Измерения показали, что пропорциональные деформации балки развивались в диапазоне нагрузок от 0 до 160 кН. Соответствующие изменения деформаций поверхности по направлению вертикальной оси $Y-Y$ при действии нагрузки 50, 80, 160 и 200 кН показаны на рис. 5. Развитие деформаций смятия на опорах и под штампами, передающими нагрузку от траверсы, происходило по высоте балки с увеличением от 0,3 до 1,0 %, с ярко выраженной зоной смятия под штампом, на глубину, равную половине его ширины.

С увеличением нагрузки область сжатия от штампа распространилась на четверть длины балки, в то время как зона сжатия древесины в опорной части балки имела в два раза меньшую площадь. В окрестности верхней и нижней граней балки наблюдались возрастающие с увеличением нагрузки деформации растяжения. Зоны с растягивающими вертикальными деформациями образовались на плоскости между сжатыми областями деформаций.

Рис. 5. Вертикальные деформации поверхности балки e_{yy}

Картина развития продольных деформаций на поверхности балки, демонстрирующая нелинейный характер их развития, отражена на рис. 6. С увеличением нагрузки до 160 кН в зоне чистого изгиба деформации в сжатой и растянутой зонах достигли значений 0,2 %.

Рис. 6. Деформации балки в продольном направлении e_{xx}

С увеличением нагрузки до 200 кН растягивающие деформации развились в зоне чистого изгиба практически на всю высоту балки. В сжатом состоянии осталось около 15 % сечения. Обращает на себя внимание фрагмен-

тарное распределение растягивающих деформаций по высоте в средней части балки.

Появление и развитие деформаций сдвига показано на рис. 7. С увеличением нагрузки на поверхности балки проявляются цвета, отражающие развитие деформаций сдвига. С увеличением нагрузки от 50 до 80 кН происходит формирование цветных контуров в зоне между опорой и штампом, отражающих появление сдвиговых деформаций на всей поверхности балки. При этом в зоне чистого изгиба деформации сдвига образовались в нижней части сечения, составляющей около 15 % от высоты сечения. Увеличение нагрузки до 160 кН вызвало появление зоны сдвига в окрестности штампа со значением деформаций около 0,19 %. С увеличением нагрузки до 200 кН деформации сдвига достигли значений 0,2 % и распространились под углом, близким к 20°, от верхней грани вниз на четверть высоты балки и разделились на две ветви, одна из которых ушла вниз на всю высоту сечения под углом 15° к вертикали. Другая прошла практически параллельно продольной оси балки, изменила траекторию в сторону опоры, не доходя до нее расстояния, равного высоте балки.

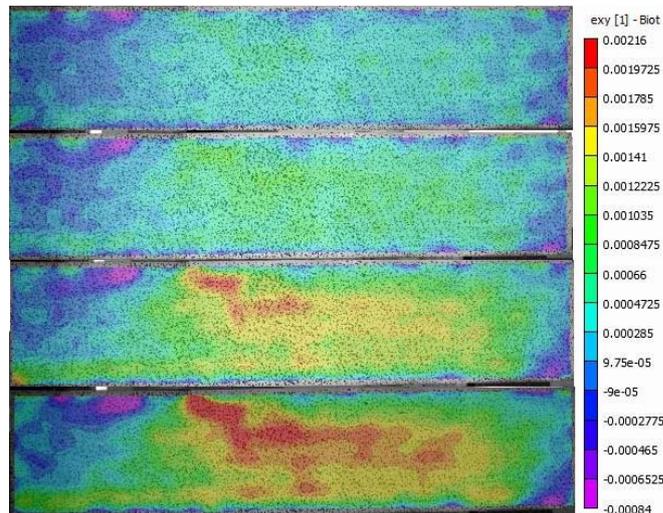


Рис. 7. Деформации сдвига в балке e_{xy}

Картина распределения сдвиговых деформаций по поверхности балки имеет сложное очертание с фрагментарным появлением сдвиговых деформаций, достигающих значений до 0,25 %.

Увеличение нагрузки до 210 кН привело к разрушению балки, как показано на рис. 8. Разрушение нижней ламели в растянутой зоне произошло по зубчато-шиповому соединению.

После образования нормальной трещины и разрушения стыка в нижней ламели произошло развитие трещины в сторону правой опоры с отслоением ламели на длине, равной трети пролета балки. Развитие трещины в сторону левой опоры произошло под углом с перерезыванием второй ламели.

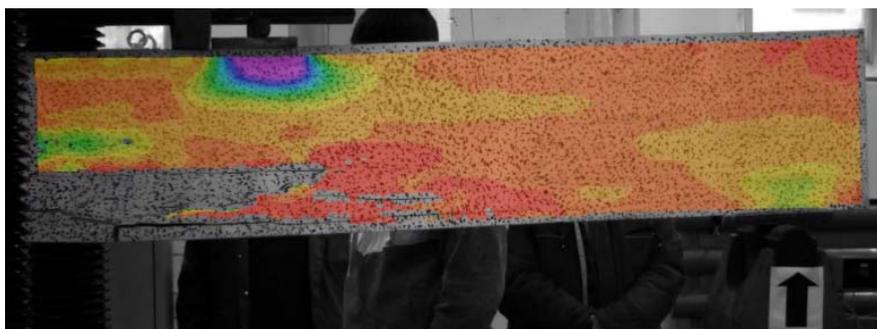


Рис. 8. Картина разрушения клееной балки

Помимо отслоения нижней ламели произошел сдвиг в четырех межламельных плоскостях на длине, равной трети пролета балки.

Выводы

Экспериментальные исследования клееной балки, армированной углеродным волокном, с использованием цифровой оптической системы Vis3D показали возможность измерения 3D деформаций и перемещений конструкции во всем диапазоне прочностных свойств древесины, включая разрушение.

Разрушение балки началось с появления нормальной трещины в нижней растянутой ламели по зубчато-шиповому соединению и развития сдвиговых трещин по высоте балки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ковальчук, Л.М. Прочность клееных балок со слоями составного сечения / Л.М. Ковальчук, К.А. Преображенская, Ю.Ю. Славик // Изв. вузов. Строительство и архитектура. – 1982. – № 5. – С. 1–5.
2. Квасников, Е.Н. О напряженном состоянии древесины при изгибе / Е.Н. Квасников / Инженерные конструкции: XXX научная конференция. – Л. : ЛИСИ, 1972. – С. 106–114.
3. Делова, М.И. Деформирование изгибаемых клееных деревянных элементов при статическом нагружении: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01. – Курск : Курский ГТУ, 1997. – 21 с.
4. Фурсов, В.В. Экспериментальное исследование натуральных балок из клееной древесины / В.В. Фурсов, М. Пурызданха // Сб. научных трудов УИСК им. В.М. Шимановского. – 2013. – № 12. – С. 71–77.
5. Антаков, А.Б. Экспериментальные исследования изгибаемых элементов с полимеркомпозитной арматурой / А.Б. Антаков, И.А. Антаков // Изв. КГАСУ. – 2014. – № 3. – С. 7–13.
6. Рощина, С.И. Армирование – эффективное средство повышения надежности и долговечности деревянных конструкций / С.И. Рощина // Лесной журнал. – 2008. – № 2. – С. 71–74.

REFERENCES

1. Koval'chuk L.M., Preobrazhenskaja K.A., Slavik Ju.Ju. Prochnost' kleenyh balok so slojami sostavnogo sechenija [Laminated beam strength with sectional layers]. *News of Higher Educational Institutions. Construction and Architecture*. 1982. No. 5. Pp. 1–5.(rus)
2. Kvasnikov E.H. O naprjazhennom sostojanii drevesiny pri izgibe. [Flexural stress state]. *Proc. 30th Sci. Conf. 'Engineering Structures'*. Leningrad : LISI Publ., 1972. Pp. 106–114.(rus)
3. Delova M.I. Deformirovanie izgibaemyh kleenyh derevjannyh jelementov pri staticheskom nagruzenii: Avtoref. dis. kand. tehn. Nauk [Deformation of bending laminated elements at static load. PhD abstract]. Kursk : GTU Publ., 1997. No. 21. P. 1. (rus)
4. Fursov V.V., Purjazdanhah M. Jeksperimental'noe issledovanie naturnyh balok ih kleenoi drevesiny [Experimental research of laminated beams]. *Shimanovskii UISK Proceedings*. 2013. No. 12. Pp. 71–77.(rus)
5. Antakov A.B., Antakov I.A. Jeksperimental'nye issledovanija izgibaemyh jelementov s polimerkompozitnoj armaturoj [Experimental research of bending polymer-reinforced elements]. KGASU Publ., 2014. No. 3. Pp. 7–13.(rus)
6. Roshhina S.I. Armirovanie – jeffektivnoe sredstvo povyshenija nadezhnosti i dolgovechnosti derevjannyh konstrukcij [Reinforcement as effective improvement of safety and durability of timber structures]. *Lesnoj Zhurnal*. 2008. No. 2. Pp.71–74.(rus)