

Список цитированных источников

1. Нагрузки и воздействия: СНиП 2.01.07-85 / Госстрой СССР. – Москва : ЦИТП Госстроя СССР, 1986.
2. Прогны и перемещения: дополнения. Раздел 10 / Госстрой СССР. – Москва : ЦИТП Госстроя СССР, 1989.
3. Стальные конструкции: СНиП II-23-81* / Госстрой СССР. – Москва : ЦИТП Госстроя СССР, 1991.
4. Реконструкция комплекса объектов стадиона «Динамо» в г. Минске: комплекты чертежей 13.056.02.10,11,12,13-КМ.

УДК 694.1

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ДЕРЕВЯННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ, УСИЛЕННЫХ УГЛЕРОДВОЛОКОННОЙ ОБОЙМОЙ

Ладных И.

Annotation: *The article is devoted to a new method of wooden compressed-bent elements' strengthening using a "carbon fiber clip". The report also considers possible numerical model in Ansys Workbench to calculate this wooden elements with a "carbon fiber clip". The author of the article suggests to compare the results of a numerical and analytical solutions and full-scale test.*

Аннотация: *В данной статье рассматривается новый метод усиления деревянных сжато-изгибаемых элементов при помощи «углеродволоконной обоймы». Также предлагается вариант численного моделирования в Ansys Workbench для определения напряженно-деформированного состояния деревянного сжато-изогнутого элемента. Представлены сравнительные результаты численного, аналитического решения, а также результаты натурного эксперимента.*

Введение. Основная тенденция последнего десятилетия в области строительства – это не только проектирование новых конструкций, но и усиление уже существующих. Например, для усиления деревянных конструкций существуют различные схемы и методы усиления. Однако для усиления уникальных конструкций и конструкций, подверженных воздействию химически агрессивных сред, этого недостаточно. Автором статьи предлагается рассмотреть новый тип усиления деревянных сжато-изгибаемых элементов при помощи наноматериалов – углерод-волоконной ленты на эпоксидной матрице, представленный на рисунке 1.

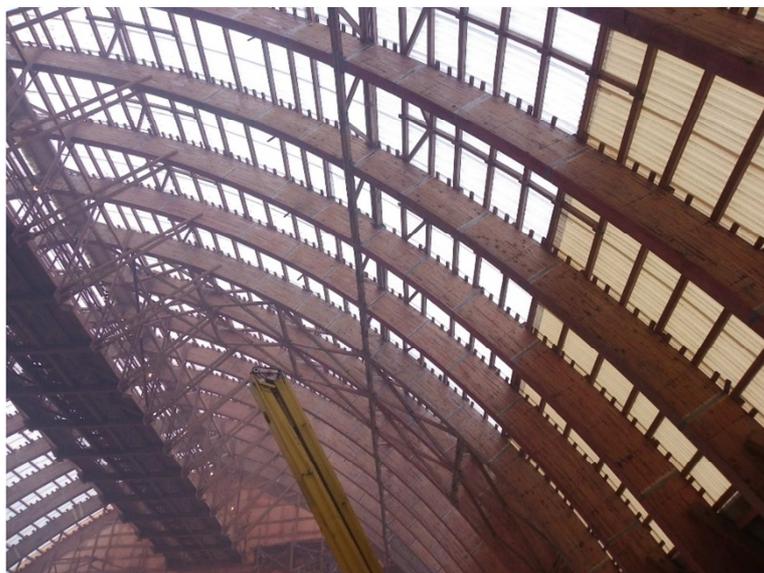


Рисунок 1 – Усиление сжато-изгибаемых деревянных элементов при помощи «УВ-обоймы»

Цель данной работы – создание модели в Ansys Workbench для определения напряженно-деформированного состояния деревянного сжато-изогнутого элемента с «углеродволоконной обоймой» (далее – «УВ-обоймой») и сравнительный анализ с экспериментальными и теоретическими данными.

Обзор существующих исследований по данной проблеме. На сегодняшний день существуют различные методы усиления деревянных изгибаемых балок с использованием композитных материалов [1, 2]. В частности, следует выделить работы российских ученых Н. В. Линькова [3], Д. Г. Копаница [4], а также среди западных ученых Томаша Новака [5]. Каждый из этих ученых изучал напряженно-деформированное состояние композитных усиливающих элементов и предложил свой подход к их расчету. Основным недостатком этих работ является применимость предлагаемых методов усиления только к изгибаемым балкам и для единичных уникальных исторических конструкций.

Методы исследования. В настоящее время для анализа напряженно-деформированного состояния как конструкции в целом, так и отдельных элементов применяются методы численного прогнозирования. Поэтому автором статьи предлагается рассмотреть модель сжато-изогнутого деревянного элемента с «УВ-обоймой», разработанного в Ansys Workbench.

Для объективной оценки напряженно-деформированного состояния деревянных сжато-изогнутых образцов с «УВ-обойм» были проведены численные исследования в Ansys Workbench в модуле Static Structural. Моделирование выполнялось по следующим этапам: создание трехмерной модели, состоящей из деревянных элементов и композитных «УВ-обойм»; задание физико-механических характеристик элементов; задание условий контакта древесины между собой и между «УВ-обоймой»; разбиение модели на конечные элементы; задание силовых факторов.

Создание твердотельной трехмерной модели заключается в создании геометрических моделей двух элементов: деревянного бруса и «УВ-обойм» с различным шагом.

При задании физико-механических характеристик деревянного бруса необходимо учитывать тот факт, что древесина как материал является ортогонально анизотропным. Для этого в Ansys Workbench описание поведение массива деревянного элемента выполнялось с использованием модели материала Orthotropic Elasticity, при этом все значения характеристик заполнялись в соответствии с матрицей податливости (1) [6], общий вид которой приведен ниже:

$$[D^{-1}] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_y} & \frac{-\nu_{zy}}{E_y} & \frac{-\nu_{xy}}{E_y} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{yz}}{E_z} & \frac{1}{E_z} & \frac{-\nu_{xz}}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{yx}}{E_x} & \frac{-\nu_{zx}}{E_x} & \frac{1}{E_x} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{yz}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{zx}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{yx}} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где E – модуль упругости;
 G – модуль сдвига;
 ν – коэффициент Пуассона.

Первый индекс при ν указывает направление поперечной деформации ϵ , второй – направление вызвавшего ее напряжения σ . Индексы при G соответствуют направлениям осей симметрии, между которыми происходит изменение прямого угла. Индекс x – направление вдоль волокон древесины, z – тангенциальное направление поперек волокон, y – радиальное направление поперек волокон.

Параметры материалов: древесины и углеродволоконной ленты с эпоксидной матрицей для численного моделирования приняты на основе испытания древесины, а также данных, представленных в нормативной и справочной литературе [6]. Основные характеристики углеродволоконной ленты и древесины представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристики материалов, принятые при моделировании

	Модуль упругости, МПа			Коэффициент Пуассона		
	E_x	E_y	E_z	ν_{xy}	ν_{xz}	ν_{yz}
Древесина	12000	540	540	0,37	0,42	0,47
УВ-обойма	100000	4000	4000	0,3	0,3	0,03

В качестве основы были взяты два бруса длиной 2800 мм с размерами поперечного сечения 40x100 мм. С каждого торца были установлены подкладки размером 100x100 мм. «УВ-обойм» были приняты шириной 150 мм и шагом 512,5 мм. Общий вид представлен на рисунке 2.

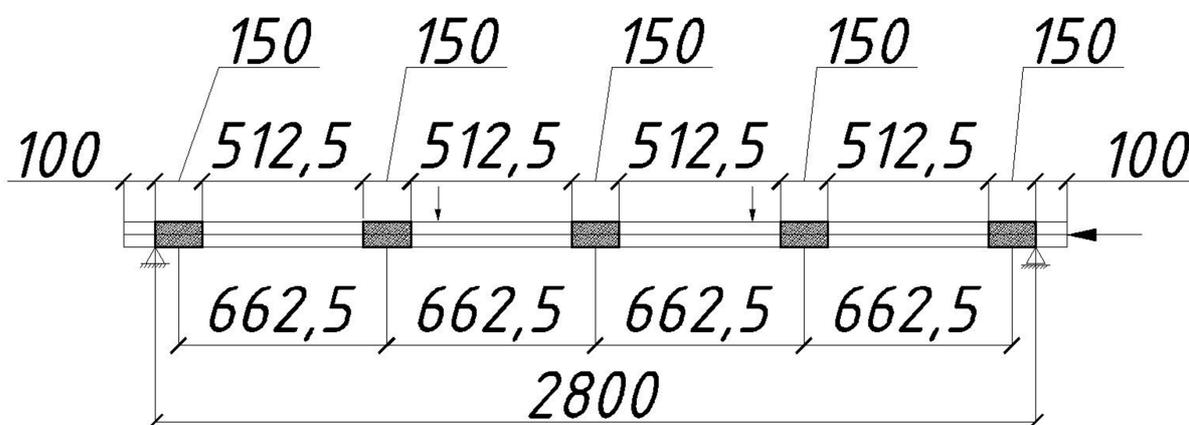


Рисунок 2 – Общий вид модели деревянного элемента с «УВ-обоймой»

Контакт между двумя брусами был задан Frictional, равным 0.1, а между «УВ-обоймой» и брусами – Bonded. В модели были зафиксированы 2 подставки Fixed Support. Нагрузка задавалась векторно, прикладывалась на расстоянии 1 м от опоры. Рассматривались три основных состояния деревянного сжато-изогнутого элемента с «УВ-обоймой» и сравнивались с цельным брусом эквивалентного поперечного сечения. Значения нагрузок задавались в трех разных контрольных точках: точка 1 – достижение предельно допустимого прогиба цельным брусом аналогичного сечения, точка 2 – достижение расчетного сопротивления «УВ-обоймой» и точка 3 – разрушение «УВ-обоймы». В данной статье будет рассмотрена только одна контрольная точка – предельно допустимый прогиб, равный $1/200 L = 14$ мм. Так как в дальнейшем планируется провести сравнительный анализ данных с натурным экспериментом, поэтому примем

нагрузку $N=2800$ Н, $M=790$ Н×м (это позволит фактически ее задать в условиях натурального эксперимента), и тогда прогиб для деревянного элемента цельного сечения составит 14,59 мм.

Графические результаты расчета представлены на рисунках 3 и 4.

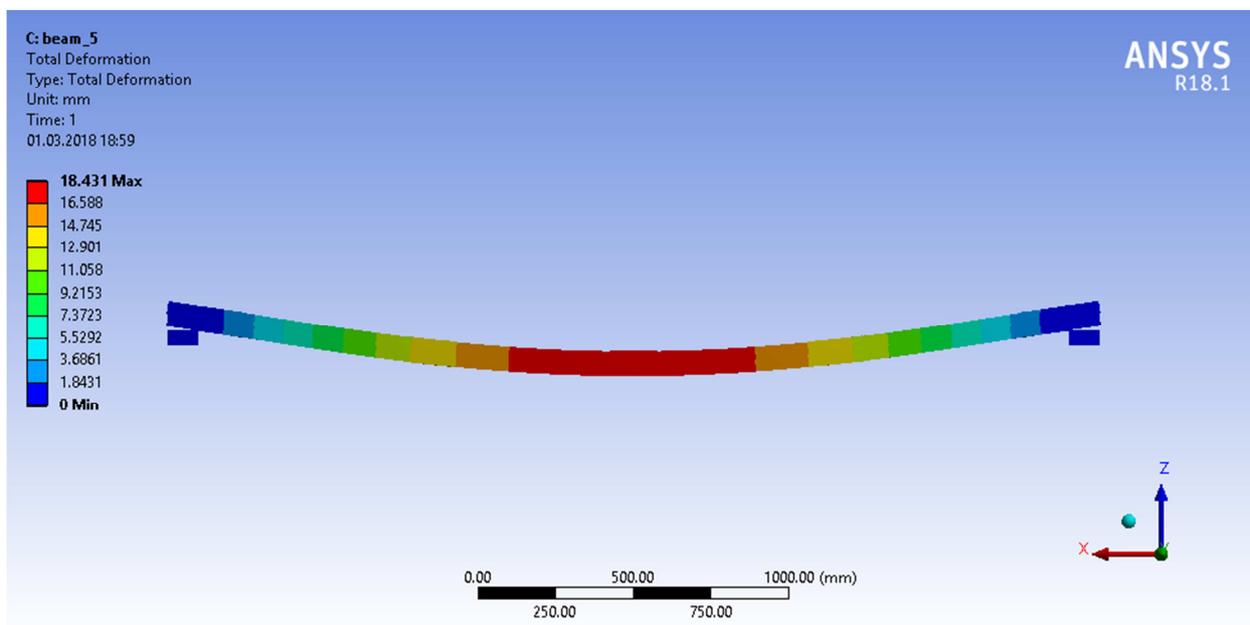


Рисунок 3 – Общие деформации (вид в осях XZ)

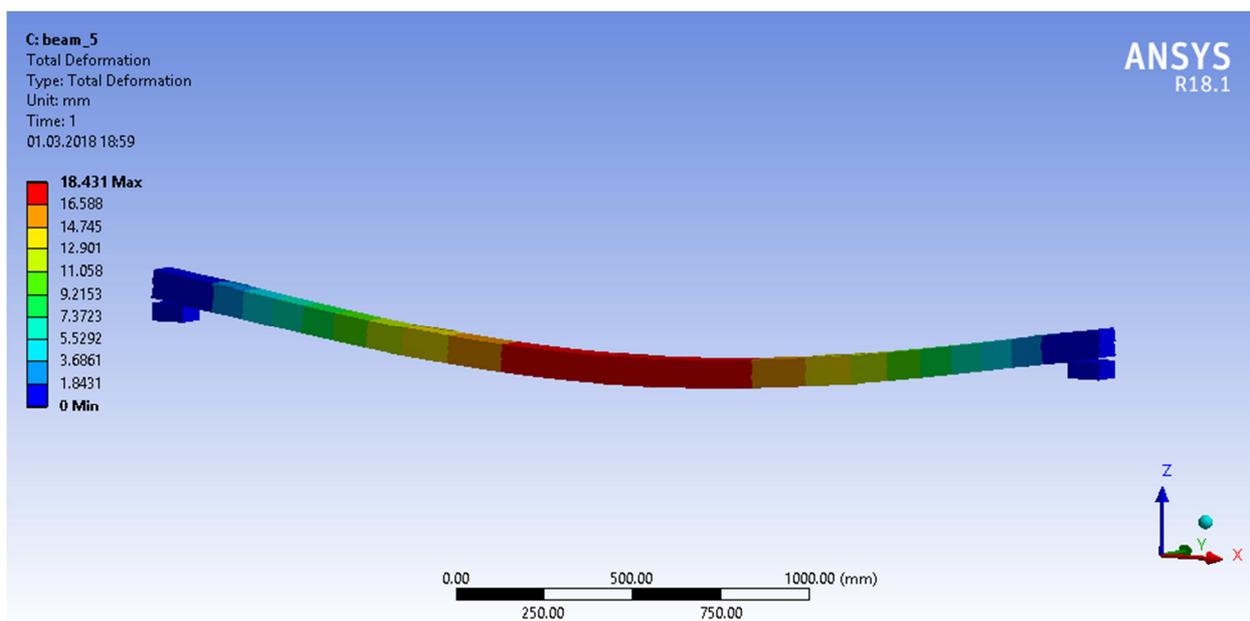


Рисунок 4 – Общие деформации (вид 3D)

Максимальные деформации модели деревянного элемента с «УВ-обоймой» составили 18,431 мм и зафиксированы в середине пролета. Минимальные деформации составили 0 мм.

Результаты и дискуссия. Рассмотренный выше деревянный сжато-изогнутый элемент с «УВ-обоймой» можно отнести к составному стержню на податливых связях, поэтому для оценки адекватности результатов предлагается сравнить численные результаты с расчетом, выполненным по теории составных стержней А. Р. Ржаницына [7]. Кроме того, был проведен натурный экспери-

мент, в результате которого также были получены деформации. В таблице 2 представлены результаты расчетов для проведения сравнительного анализа.

Таблица 2 – Экспериментальные и расчетные значения деформаций

Нагрузка	Максимальный прогиб цельного бруса, мм	Прогиб по ПК Ansys, мм	Прогиб по ТСС А. Р. Ржаницына*, мм	Экспериментальный прогиб, мм
N=2800 Н M=790 Н×м	14,59	18,43	18,35	18,23
* ТСС А. Р. Ржаницына – теория составных стержней А. Р. Ржаницына				

Из таблицы видно, что результаты моделирования оказались достаточно близкими к результатам натурных экспериментов и находятся в пределах 5 %. Рассмотрим также соотношение прогибов цельного и составного сечения, полученного по результатам моделирования, равное 0,79.

Заключение. Автором выполнено моделирование в Ansys Workbench взаимодействия деревянного сжато-изгибаемого элемента с «УВ-обоймой». Для этого были установлены параметры древесины и «УВ-обоймы» на основании экспериментальных и теоретических данных, создана геометрия, заданы граничные условия, а также выполнен расчет общих деформаций, возникающих в деревянном сжато-изогнутом элементе.

Проведен сравнительный анализ полученных данных с фактическими экспериментальными, а также теоретическими данными. Наибольший прогиб был получен в результате моделирования в Ansys Workbench – это можно объяснить тем, было учтено большее количество параметров, чем при проведении эксперимента. Но при этом следует отметить, что расхождение между экспериментальными и теоретическими данными располагается в пределах 1%. Получена хорошая сходимость расчетных и экспериментальных данных, что подтверждает правомерность применения для оценки деформативности деревянных сжато-изогнутых элементов составного сечения с «УВ-обоймой» аппарата теории составных стержней А. Р. Ржаницына.

Планируется провести дополнительное изучение сжато-изогнутых элементов с другим шагом углеродволоконных обоек, а также предложить инженерную методику расчета усиливающих «УВ-обоек» для деревянных сжато-изогнутых элементов.

Список цитированных источников

1. Ладных, И. А. Современные тенденции в области усиления деревянных конструкций / И. А. Ладных // Вестник СевКавГТИ. – 2017. – № 3(30). – С. 128–133.
2. Калугин, А. В. Деревянные конструкции: учеб. пособие (конспект лекций). – Москва : Издательство АСВ, 2003. – 224 с.
3. Линьков, Н. В. Соединение деревянных конструкций композиционным материалом на основе эпоксидной матрицы и стеклоткани. – Москва : МГСУ, 2012. – 196 с.
4. Копаница, Д. Г. Исследование деформаций клееной балки из древесины, усиленной углеродным волокном, с использованием цифровой оптической системы VIC3D / Д. Г. Копаница, Д. В. Лоскутова, А. И. Данильсон // Вестник ТГАСУ. – 2015. – № 4. – С. 135–142.
5. Jasieńko, Jerzy. Analiza pracy statycznej belek drewnianych wzmocnionych taśmami CFRP / Jerzy Jasieńko, Tomasz Nowak, Piotr Rapp // Wiadomości Konserwatorskie. – 2009. – № 26. – С. 314–324.
6. Коченов, В. М. Экспериментально-теоретические исследования деревянных конструкций: по материалам лаборатории деревянных конструкций / В. М. Коченов. – Москва : Главная редакция строительной литературы, 1938. – 239 с.
7. Ржаницын, А. Р. Теория составных стержней строительных конструкций. – Москва : Стройиздат, 1948. – 192 с.