

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ЖЕСТКОСТИ ДЛЯ РАСЧЕТА ДЕРЕВЯННЫХ СОСТАВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ, УСИЛЕННЫХ УГЛЕРОДВОЛОКОННОЙ ЗАМКНУТОЙ ОБОЙМОЙ

Ладных И.А., Згировский А.И.

Применение композитных материалов в различных отраслях промышленности – одно из самых важных и приоритетных направлений научных исследований Республики Беларусь на 2016-2020 гг.

Анализ современных решений применения композитных материалов в области строительных конструкций показал, что существующие различные способы усиления деревянных конструкций имеют существенные недостатки [1,2,3]. Поэтому авторами статьи предлагается рассмотреть способ усиления деревянных конструкций с применением замкнутых углерод-волоконных обоев на эпоксидной матрице.

Этот тип соединения деревянных составных элементов и усиления можно отнести к податливому, поэтому предлагается использовать коэффициент жесткости, который получен в результате испытаний двухсрезных образцов с углеродволоконной замкнутой обоей на эпоксидной матрице (рисунок 1) по формуле (1).

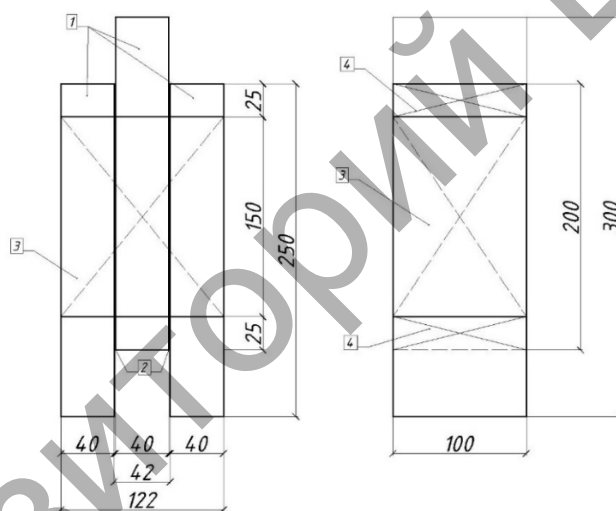


Рисунок 1 – Конструкция и размеры двухсреznego образца с углеродволоконной замкнутой обоей на эпоксидной матрице. 1 — деревянные элементы 40x100x250 мм; 2 — шов сплачивания  $t = 1$  мм; 3 — зона обклейки в соединении; 4 — временные связи, удаляются после полимеризации эпоксидной матрицы

$$\varepsilon = \frac{T_c \cdot m}{\delta_c} \quad (1)$$

где  $T_c$  – сдвигающее усилие, приходящееся на одну связь, кН;  $m$  – число связей, приходящееся на единицу длины шва;  $\delta_c$  – деформации взаимного сдвига смежных волокон двух соседних стержней, соединенных связями сдвига, мм.

Для подтверждения возможности использования коэффициента жесткости в расчетах был проведен ряд теоретических, численных и экспериментальных исследований. Для этого в качестве образцов были выбраны деревянные составные элементы с углеродволоконными замкнутыми обоеями на эпоксидной матрице с разными коэффициентом армирования, шириной и шагом замкнутых обоев. При этом рассматривалось несколько контрольных точек

нагрузки: контрольный прогиб при разном соотношении изгибающего момента и продольной силы и разрушение углеродволоконных обоев на эпоксидной матрице при соотношении изгибающего момента к продольной силе 0.3.

Экспериментальные натурные исследования выполнялись на натуральных образцах с приложением сжато-изгибаемой нагрузки на деревянные составные элементы с углеродволоконными замкнутыми обоймами на эпоксидной матрице.

Теоретические исследования представляли собой изучение существующих теорий составных стержней, выбор двух основных теорий А.Р. Ржаницына и П.Ф. Плешкова и расчет по ним. При численных исследованиях анализировалось напряженно-деформированное состояние образцов.

В результате теоретических, численных и натуральных исследований было установлено, что разница значений по прогибам и сдвигающим усилиям между различными типами образцов составила не более 5 % (таблица 1 и 2). Это подтверждает правомерность применения теории составных стержней А.Р. Ржаницына и П.Ф. Плешкова [5,6] для оценки напряженно-деформированного состояния деревянных составных элементов с углеродволоконной замкнутой обоймой на эпоксидной матрице. При этом разрушение всех образцов происходило только по углеродволоконной замкнутой обойме. Кроме того, результаты теоретических исследований подтверждают правильность и корректность разработанного метода испытаний двухсрезных образцов с углеродволоконной лентой на эпоксидной матрице для определения коэффициента жесткости. При этом численные исследования также достаточно хорошо коррелируются с результатами расчета по теориям составных стержней А.Р. Ржаницына и П.Ф. Плешкова. Расхождение между экспериментальными и численными результатами по деформациям составляет до 3,0%, при этом робастное среднее экспериментальное значение меньше, чем деформации, полученные по численным исследованиям. Разница между значениями сдвигающих усилий составляет до 11,2%.

Таблица 1 – Результаты теоретических, численных и натуральных исследований

Тип «конструкции»	Соотношение нагрузки	Деформации образца, мм				
		Робастное среднее значение деформаций, мм	Численная модель, мм	ТСС А.Р.Ржаницына	ТСС П.Ф. Плешкова	Брус цельного сечения
конструкция 1	0.3	18.08	18.43	18.35	18.04	14.66
	0.5	17.32	17.52	17.66	17.46	13.95
	0.7	17.11	17.18	17.46	17.73	14.08
	1.0	17.60	17.61	18.03	17.83	14.09
конструкция 2	0.3	16.44	16.56	16.75	16.81	14.66
	0.5	16.73	16.92	16.86	16.31	13.95
	0.7	16.41	16.68	16.32	16.58	14.08
	1.0	16.48	16.28	16.25	16.69	14.09
конструкция 3	0.3	16.45	16.56	16.75	16.81	14.66
	0.5	16.21	16.92	16.86	16.31	13.95
	0.7	16.18	16.68	16.32	16.58	14.08
	1.0	16.27	16.28	16.25	16.69	14.09

Таблица 2 – Результаты теоретических, численных и натуральных исследований

Тип «конструкции»	Соотношение нагрузки	Сдвигающее усилие, кН			
		Робастное среднее значение сдвигающего усилия, кН	Численная модель	ТСС А.Р.Ржаницына	ТСС П.Ф. Плешкова
конструкция 1	0.3	19.80	22.40	21.94	22.52
	0.5	21.86	23.40	22.20	23.35
	0.7	23.78	24.35	24.02	24.27
	1.0	23.86	24.98	24.52	24.85
конструкция 2	0.3	23.37	24.15	23.85	23.97
	0.5	24.45	25.05	24.65	24.72
	0.7	25.18	25.98	25.42	25.65
	1.0	25.90	26.38	26.12	26.24
конструкция 3	0.3	23.72	24.18	23.85	23.97
	0.5	24.33	25.05	24.65	24.72
	0.7	25.31	25.98	25.42	25.65
	1.0	25.99	26.38	26.12	26.24

На втором этапе анализировались результаты величины разрушающей нагрузки и соответствующие им деформаций, сдвигающим усилиям, представленные в таблице 3. Критерием разрушения при теоретическом моделировании было предполагаемое значение разрушающей нагрузки, при котором определялась величина прогибов деревянного составного элемента и сдвигающее усилие.

Расхождение по величине разрушающей нагрузки составляет 5,4-15,6%, при этом результаты экспериментальных данных выше, чем численного исследования. Это объясняется тем, что при численном и теоретическом моделировании критерием разрушения было достижение в углеродволоконной замкнутой обойме на эпоксидной матрице деформаций взаимного смещения брусков 0,85 мм, но в результате натуральных исследований было установлено, что разрушение может произойти и при достижении взаимного смещения брусков и величины 0,92 мм. Разница между прогибами и сдвигающими усилиями находится в пределах от 5,0 до 12,3 %. Таким образом, результаты теоретических, численных и экспериментальных исследований достаточно хорошо коррелируются между собой. Это показывает, что теории составных стержней А.Р. Ржаницына и П.Ф. Плешкова возможно применять для расчета деревянных составных элементов с углеродволоконной замкнутой обоймой при определении коэффициента жесткости. На основании экспериментально теоретических исследований было подтверждена возможность использования теорий составных стержней А.Р. Ржаницына и П.Ф. Плешкова.

Таблица 3 – Результаты испытаний при соотношении нагрузки 0.3

Тип «конструкции»	Наименование показателя	Результаты исследований				Тип разрушения
		Робастное среднее значение	Численная модель, мм	ТСС А.Р.Ржаницына	ТСС П.Ф. Плешкова	
конструкция 1	М, кНхм	3,165	2,994	3,155	3,155	Разрушение «УВ-обоймы»
	N, кН	0,954	0,866	0,947	0,947	
	прогиб, мм	21,49	22,080	22,32	22,24	
	Сдвигающее усилие, кН	31,14	28,555	27,450	26,795	
конструкция 2	М, кНхм	3,685	3,294	3,677	3,677	Разрушение «УВ-обоймы»
	N, кН	1,109	0,958	1,103	1,103	
	прогиб, мм	24,32	23,031	25,40	26,45	
	Сдвигающее усилие, кН	32,42	34,913	31,12	30,852	
конструкция 3	М, кНхм	3,684	3,334	3,677	3,677	Разрушение «УВ-обоймы»
	N, кН	1,107	1,010	1,103	1,103	
	прогиб, мм	24,14	23,031	25,40	26,45	
	Сдвигающее усилие, кН	32,39	34,913	31,12	30,852	

Авторами статьи предлагается следующий метод расчета углеродволоконных замкнутых обойм на эпоксидной матрице. Первоначально необходимо в лабораторных условиях определить коэффициент жесткости на двухсрезах образцах с углеродволоконной замкнутой обоймой с эпоксидной матрицей. На втором этапе произвести расчет прогиба элемента с учетом коэффициента жесткости по формуле теории составных стержней П.Ф. Плешкова, так как она менее трудоемка. При этом при назначении коэффициента армирования необходимо учитывать минимально требуемую длину из условия среза.

Учитывая, что данный метод достаточно трудоёмкий и требует наличия лаборатории для испытания образцов, авторами статьи был проведен анализ численных моделей и произведен расчет по теориям составных стержней А.Р. Ржаницына и предложены коэффициенты  $k_w$  и  $k_i$ , представленные в таблицах 4-9.

Таблица 4 – Коэффициент  $k_w$  для элементов длиной 3 м

Число слоев в элементе	$k_{арм}$				
	0.25	0.3	0.5	0.7	1
2	0.88	0.92	0.94	0.95	0.96
3	0.78	0.80	0.82	0.84	0.86
10	0.70	0.74	0.76	0.78	0.80

Таблица 5 – Коэффициент  $k_w$  для элементов длиной 4 м

Число слоев в элементе	$k_{арм}$				
	0.25	0.3	0.5	0.7	1
2	0.90	0.92	0.94	0.95	0.96
3	0.84	0.86	0.88	0.90	0.92
10	0.76	0.78	0.80	0.82	0.84

Таблица 6 – Коэффициент  $k_w$  для элементов длиной 6 м и более

Число слоев в элементе	$k_{арм}$				
	0.25	0.3	0.5	0.7	1
2	0.92	0.93	0.94	0.95	0.96
3	0.88	0.92	0.94	0.95	0.96
10	0.80	0.82	0.84	0.86	0.88

Таблица 7 – Коэффициент  $k_i$  для элементов длиной 3 м

Число слоев в элементе	$k_{арм}$				
	0.25	0.3	0.5	0.7	1
2	0.78	0.82	0.84	0.88	0.9
3	0.52	0.55	0.56	0.59	0.6
10	0.35	0.36	0.37	0.38	0.39

Таблица 8 – Коэффициент  $k_i$  для элементов длиной 4 м

Число слоев в элементе	$k_{арм}$				
	0.25	0.3	0.5	0.7	1
2	0.80	0.84	0.86	0.89	0.93
3	0.55	0.58	0.60	0.62	0.64
10	0.40	0.42	0.44	0.46	0.48

Таблица 9 – Коэффициент  $k_i$  для элементов длиной 6 м и более

Число слоев в элементе	$k_{арм}$				
	0.25	0.3	0.5	0.7	1
2	0.81	0.85	0.87	0.89	0.93
3	0.56	0.58	0.60	0.62	0.64
10	0.41	0.42	0.44	0.46	0.48

В заключение следует отметить, что проведен обширный анализ исследований и технической литературы, в результате которого были определены основные тенденции развития применения композитных материалов в деревянном строительстве. Авторами предложен но-

вый способ соединения и усиления деревянных составных элементов. Проведены экспериментальные исследования, в результате которых предложена методика оценки углеродволоконных замкнутых обоем на эпоксидной матрице. Определены коэффициенты податливости для углеродволоконных замкнутых обоем для расчета деревянных элементов составного сечения с применением композитных соединений по методике ТНПА /7,9/. При этом требуются дальнейшие исследования углеродволоконных замкнутых обоем на эпоксидной матрице: влияние количества слоев углеродволоконной ленты; провести калибровку численной модели; влияние толщины и количества слоев древесины на податливость соединения. Результаты диссертационной работы могут использоваться в научно-исследовательских и проектных организациях при проектировании углеродволоконных замкнутых обоем на эпоксидной матрице.

#### Список источников

1. Калугин А. В. Деревянные конструкции. Учеб. пособие (конспект лекций). – М.: Издательство АСВ, 2003. – 224 с.
2. Линьков Н.В. Соединение деревянных конструкций композиционным материалом на основе эпоксидной матрицы и стеклоткани. – М.:МГСУ, 2012. – 196 с.
3. 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.
4. Коченов В. М. Экспериментально-теоретические исследования деревянных конструкций: по материалам лаборатории деревянных конструкций / В.М. Коченов. – М.: Главная редакция строительной литературы, 1938. – 239 с.
5. Плешков, П.Ф. Теория расчета деревянных составных стержней / П.Ф. Плешков. — М.: Гос. изд. лит. по стр-ву и арх., 1952. – 195 с.
6. Ржаницын А. Р. Теория составных стержней строительных конструкций. – М. Стройиздат, 1948. – 192 с.
7. ТКП 45-5.05-146-2009. Деревянные конструкции. Строительные нормы проектирования. – Мн: Минстройархитектуры, 2010. – 72 с.
8. ТКП EN 1990-2011. Еврокод. Основы проектирования строительных конструкций. – Мн: Минстройархитектуры, 2012. – 96 с.
9. ТКП EN 1995-1-1-2009. Еврокод 5. Проектирование деревянных конструкций. Часть 1-1. Общие правила и правила для зданий. – Мн: Минстройархитектуры, 2010. – 110 с.