

**ПРИМЕНЕНИЕ СТЕКЛОТКАНИ ПОЛОТНЯНОГО ПЕРЕПЛЕТЕНИЯ
В КОМПОЗИЦИОННОМ МАТЕРИАЛЕ
ДЛЯ УСИЛЕНИЯ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

**THE USE OF FIBERGLASS IN A COMPOSITE MATERIAL
FOR GAINING WOODEN STRUCTURES**

*Н.В. ЛИНЬКОВ
N.V. LINKOV*

(Национальный исследовательский Московский государственный
строительный университет)
(National Research Moscow State University of Civil Engineering)
E-mail: Nicklinkov@gmail.com

Для усиления деревянных конструкций на кафедре металлических и деревянных конструкций НИУ МГСУ применяют композиционные материалы (КМ), формирование которых осуществляется непосредственно на контактных поверхностях деревянных элементов. Для композиционного материала, включающего эпоксидную матрицу на основе смолы ЭД-20 и армированного стеклотканью Т-13 полотняного переплетения, определены прочностные и упругие характеристики, в том числе предел прочности и модуль упругости при сжатии, растяжении, поперечном изгибе и скалывании. Проведена статистическая обработка и выполнено сравнение полученных характеристик в направлениях главных осей КМ, сравнение с соответствующими показателями конструкционной древесины. Представлены результаты численных исследований работы КМ-соединений в программе ABAQUS.

To gain wooden structures at the Department of Metal and Wood Structures of the Moscow State University of Architecture and Civil Engineering, composite materials (CM) are used, the formation of which is carried out directly on the contact surfaces of wooden elements. For CM including an epoxy matrix based on ED-20 resin and T-13 reinforced with fiberglass cell, strength and elastic characteristics are determined, incl. ultimate strength and modulus of elasticity under compression, stretching, transverse bending and shearing. Statistical processing and comparison of the obtained characteristics in the directions of the main axes of the CM have been carried out, compared with the corresponding parameters of the structural timber. The results of numerical studies of the operation of KM compounds in the ABAQUS program are considered.

Ключевые слова: композиционный материал, стеклоткань, соединения деревянных конструкций, растяжение, сжатие, изгиб, скалывание, модуль упругости, усиление деревянных конструкций.

Keywords: composite material, fiberglass, joints of wooden structures, stretching, compression, bending, shearing, modulus of elasticity, strengthening of wooden structures.

Несущие деревянные конструкции, в том числе в объектах исторической застройки, выполнены из массивных деревянных элементов [1...3], [7], поверхности которых обладают естественной кривизной и выраженными неровностями. Для усиления таких конструкций невозможно эффективно применять готовые листовые и ленточные армированные пластики, обычно применяемые в практике усиления деревянных элементов [10...14]. На кафедре металлических и деревянных конструкций НИУ МГСУ предлагают формировать композиционный материал (КМ) непосредственно на подготовленной поверхности существующих деревянных конструкций [4...9]. При этом по мере отверждения эпоксидной матрицы одновременно с формированием композиционного материала происходит образование адгезионных связей между композиционным материалом и поверхностью деревянных элементов.

Требования к композиционному материалу для усиления и восстановления существующих деревянных конструкций определены задачами его применения, в том числе: 1) возможность формирования КМ на неровной поверхности существующих деревянных конструкций; 2) обеспечение адгезии с поверхностью деревянного элемента; 3) прочностные и упругие характеристики КМ должны быть не ниже соответствующих показателей конструкционной древесины.

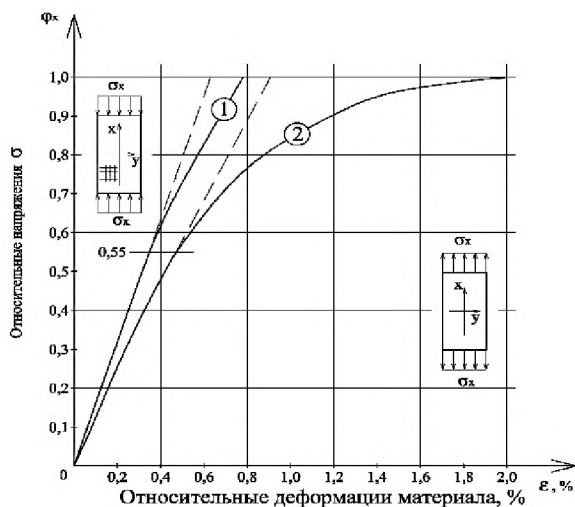


Рис. 1

Указанному перечню требований соответствует композиционный материал, выполняемый на основе стеклоткани Т-13 по ГОСТ 19170–2001 с ортогональной ячейкой полотняного переплетения и матрицы на основе эпоксидной смолы ЭД-20. Данный композиционный материал следует получать из расчетного количества слоев стеклоткани, пропитанной эпоксидным связующим, послойной выкладкой на контактных поверхностях деревянных элементов одновременно с формированием КМ-соединения.

Для определения физико-механических характеристик КМ были проведены испытания образцов материала статической нагрузкой. Установлены основные прочностные и упругие характеристики КМ, соответствующие работе композиционного материала в соединении, в том числе предел прочности при сжатии, растяжении, поперечном изгибе и скалывании; модуль упругости при сжатии, растяжении и поперечном изгибе; коэффициенты Пуассона.

Для сравнения механических характеристик композиционного материала с конструкционной древесиной сосны при влажности древесины $W=12\%$ построены приведенные диаграммы работы КМ на сжатие (1) и растяжение (2) (рис. 1), где по оси абсцисс отложены относительные деформации материала ε , %, по оси ординат – относительные напряжения φ , выраженные в долях от предела прочности КМ.

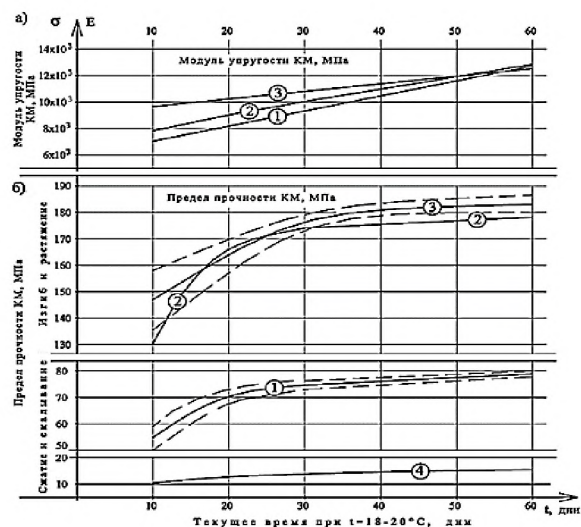


Рис. 2

По результатам испытаний образцов также оценивали влияние набора прочности эпоксидной матрицей в процессе отверждения при температуре 18...20°C на прочностные и упругие характеристики КМ. Для этого испытания одинаковых образцов проводили через 10, 20, 30 и 60 суток после изготовления.

Результаты испытаний образцов композиционного материала с учетом направления армирования представлены в табл. 1; кинетика набора прочности композиционного материала для основных видов напряженного состояния – на рис. 2, где а – модуль упругости КМ; б – предел прочности КМ: 1 – сжатие, 2 – растяжение, 3 – изгиб, 4 – скалывание.

Таблица 1

Вид НДС	Показатель	Количество образцов, шт	Среднее, при времени отверждения эпоксидной матрицы, сут.				
			10	20	30	60	
Сжатие	$\sigma_{X\text{ пч}}$, МПа	11	58,83	72,62	75,87	78,96	
	$\sigma_{Y\text{ пч}}$, МПа	9	49,98	67,49	73,46	77,81	
	$(\sigma_{X\text{ пч}} - \sigma_{Y\text{ пч}})$, МПа, % от $\sigma_{X\text{ пч}}$			8,85	5,13	2,41	1,15
				15	7	3	1
	E_x , МПа	11	7741	8794	9984	12977	
	E_y , МПа	9	6359	7989	8958	12443	
$(E_x - E_y)$, МПа, % от E_y			1382	805	1026	71	
			18	9	9	1	
Растяжение	$\sigma_{X\text{ пч}}$, МПа	7	140,15	173,00	180,74	188,1	
	$\sigma_{Y\text{ пч}}$, МПа	7	121,09	159,66	168,37	173,6	
	$(\sigma_{X\text{ пч}} - \sigma_{Y\text{ пч}})$, МПа, % от $\sigma_{X\text{ пч}}$			19	13	12	15
				14	8	7	8
	E_x , МПа	7	8645	9631	10461	13252	
	E_y , МПа	7	7036	8646	9799	12260	
$(E_x - E_y)$, МПа, % от E_y			1608	985	662	992	
			19	10	6	7	
Изгиб	$\sigma_{X\text{ пч}}$, МПа	15	158,42	172,45	179,7	182,31	
	$\sigma_{Y\text{ пч}}$, МПа	12	135,22	160,45	172,9	174,74	
	$(\sigma_{X\text{ пч}} - \sigma_{Y\text{ пч}})$, МПа, % от $\sigma_{X\text{ пч}}$			23,20	12,01	6,76	7,57
				15	7	4	4
	E_x , МПа	15	10739	11690	12086	12999	
	E_y , МПа	12	8662	10372	11181	11787	
$(E_x - E_y)$, МПа, % от E_y			2077	1318	905	1212	
			19	11	7	9	
Скалывание	$\tau_{X\text{ пч}}$, МПа	12	10,43	13,45	14,36	15,54	
	$\tau_{Y\text{ пч}}$, МПа	11	10,04	13,32	14,3	15,5	
	$(\tau_{X\text{ пч}} - \tau_{Y\text{ пч}})$, МПа, % от $\sigma_{X\text{ пч}}$			0,39	0,13	0,06	0,04
			4	1	0,4	0,2	

Из графиков на рис. 2 видим, что прочностные и деформационные характеристики увеличиваются во времени, что характерно для эпоксидной матрицы. В течение первых 10 суток композиционный материал набирает прочность – на сжатие 50...58 МПа, на растяжение 120...140 МПа, на изгиб 135...158 МПа – достаточную для безопасной работы в соединениях деревянных конструкций. Прочность на сжатие, растяжение и изгиб, прочность на скалыва-

ние стабилизируются в течение 35...40 суток отверждения эпоксидной матрицы.

Из табл. 1 следует, что с увеличением срока отверждения эпоксидной матрицы уменьшается разница между однородными характеристиками композиционного материала в направлениях X и Y – от 15...19% на уровне 10 суток до 1...4% на уровне 60 суток отверждения КМ.

В табл. 2 представлены результаты статистической обработки объединенных проч-

ностных и деформационных характеристик при возрасте матрицы 60 суток для каждого

из исследуемых видов напряженного состояния композиционного материала.

Таблица 2

№	Вид НДС	Показатели статистической обработки	Предел прочности $\sigma_{пч}$	Модуль упругости E
1	Сжатие	Количество образцов n, шт.	20	20
2		Среднее арифметическое M, МПа	78,44	12737
3		Среднее квадратичное отклонение S, МПа	8,89	1914
4		Вариационный коэффициент V, %	11,3	15,0
1	Растяжение	Количество образцов n, шт.	14	14
2		Среднее арифметическое M, МПа	181,4	12785
3		Среднее квадратичное отклонение S, МПа	21,84	809,9
4		Вариационный коэффициент V, %	12,1	6,33
1	Изгиб	Количество образцов n, шт.	27	27
2		Среднее арифметическое M, МПа	178,9	12460
3		Среднее квадратичное отклонение S, МПа	14,27	1897
4		Вариационный коэффициент V, %	8	15,2
1	Скалывание	Количество образцов n, шт.	23	-
2		Среднее арифметическое M, МПа	14,85	-
3		Среднее квадратичное отклонение S, МПа	1,94	-
4		Вариационный коэффициент V, %	13,06	-

Приняв за допустимый минимум нормативные сопротивления чистой древесины сосны, сравним с этими величинами мини-

мально возможные прочностные характеристики КМ по каждому виду напряженного состояния. Результаты представлены в табл. 3.

Таблица 3

№ п/п	Вид напряженного состояния	Материал				Сравнение σ_{min} и R_H
		композиционный			древесина	
		M, МПа	3S, МПа	σ_{min} , МПа		
1	Сжатие	78,44	26,67	51,77	R_H , МПа	$\sigma_{min} > R_H$ в 1,57 раза
2	Растяжение	181,4	65,52	115,88	60	$\sigma_{min} > R_H$ в 1,93 раза
3	Изгиб	178,9	42,81	136,09	57	$\sigma_{min} > R_H$ в 2,39 раза
4	Скалывание	14,85	5,82	9,03	4,56	$\sigma_{min} > R_H$ в 1,98 раза

Из табл. 3 следует, что статистически установленные минимально возможные прочностные показатели композиционного материала больше соответствующих нормативных сопротивлений чистой древесины в 1,57...2,39 раза.

На основании полученных характеристик выполнено численное моделирование работы соединения композиционного материала с древесиной в программном комплексе ABAQUS. Напряженно-деформированное состояние композиционного материала в образце на уровне расчетной несущей способности соединения представлено на рис. 3 (расчет КМ соединения в программном комплексе ABAQUS: а – нор-

мально возможные напряжения, МПа; б – деформации по оси Z, мм).

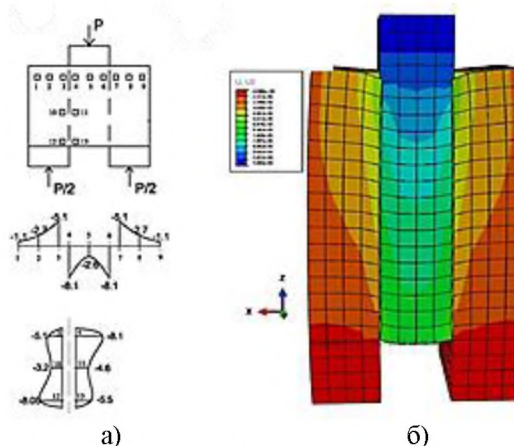


Рис. 3

При нагрузке на образец, соответствующей расчетной несущей способности соединения, максимальные сжимающие напряжения, возникающие вдоль шва сплачивания образца, составляют: $\sigma_{\text{КМ,расч}} = 6,3...7,9 \text{ МПа} < \sigma_{\text{min}} = 51,7 \text{ МПа}$, а расчетные деформации соединения составят $D = 0,04...0,06 \text{ мм}$.

ВЫВОДЫ

1. Предложен композиционный материал, который можно формировать непосредственно на поверхности деревянных элементов и применять для усиления деревянных конструкций.

2. Определены расчетные характеристики – временные сопротивления и модули упругости композиционного материала на сжатие, растяжение, изгиб и скалывание.

3. Рассмотрена кинетика прочностных и деформационных характеристик композиционного материала. Установлено, что в течение 10 суток композиционный материал набирает прочность, достаточную для безопасной работы в соединениях деревянных конструкций. Прочность на сжатие, растяжение и изгиб, прочность на скалывание стабилизируются в течение 35...40 суток отверждения эпоксидной матрицы.

4. На основе статистического анализа установлено, что минимально возможные показатели прочности композиционного материала больше соответствующих нормативных сопротивлений чистой древесины в 1,57...2,39 раза.

5. Выполненные численными методами в программном комплексе ABAQUS расчеты показали, что расчетные напряжения в композиционном материале соединения на уровне расчетной несущей способности соединения в 5...8 раз меньше фактических прочностных характеристик композиционного материала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Турковский С.Б., Погорельцев А.А., Преображенская И.П. Клееные деревянные конструкции с узлами на клеенных стержнях в современном строительстве (система ЦНИИСК) / Под общ. ред.

С.Б.Турковского. – М.: РИФ "Стройматериалы", 2013.

2. Преображенская И.П., Погорельцев А.А., Турковский С.Б. Разработка проекта и строительство склада хлористого калия с каркасом из сборных деревянных рам пролетом 63 м // Строительные материалы. – 2003, № 5. С. 14...15.

3. Линьков В.И. Конструкции на основе деревянных элементов составного сечения с соединениями на наклонных металлических стержнях без применения клея // Промышленное и гражданское строительство. – М.: ООО "Изд-во ПГС", 2012. № 11. С.29...31.

4. Линьков Н.В. Несущая способность деревянных балок составного сечения на соединении "КМ-Вкладыш" // Вестник МГСУ. – 2011, № 1, т.2. С.161...167.

5. Филимонов Э.В., Линьков Н.В. Моделирование средствами ПК SCAD соединения деревянных элементов композиционным материалом на основе эпоксидной матрицы и стеклоткани // Вестник МГСУ. – 2009, № 1. Спецвыпуск. С. 50...53.

6. Линьков Н.В. Определение параметров соединения "КМ-обклейка" для деревянных элементов составного сечения // Промышленное и гражданское строительство. – 2014, № 9. С. 47...50.

7. Рощина С.И., Лисятников М.С., Грибанов А.С., Глебова Т.О. Расчет и усиление предельно-напряженных приопорных зон высоких деревоклеевых балочных конструкций // Лесотехнический журнал. – 2015, №1. С. 187...197.

8. Линьков Н.В. К вопросу о применении композиционных материалов на тканевой основе в деревянных конструкциях составного сечения // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2017, № 3. С. 103...108.

9. Линьков Н.В. Расчет деревянных балок составного сечения на соединениях с применением композиционного материала по теории составных стержней А.Р.Ржаницына // Промышленное и гражданское строительство. – 2013, № 4. С. 18...20.

10. Yang Y.L., Liu J.W. Flexural behavior of wood beams strengthened with HFRP // Construction and Building Materials. – V.43, 2013. P. 118...124.

11. Sobczak L., Lang R.W. Polypropylene composites with natural fibers and wood - general mechanical property profiles // Composites Science and Technology. – V. 72, 2012. P. 550...557.

12. Sonti S., Superfesky M.C. Static response of wood crossties reinforced with composite // International SAMPE Symposium and Exhibition. – V. 41, 1996. P. 1291...1303.

13. Anegunta S. Evaluation of mechanical properties of glass fiber wrapped CCA-treated wood coupons // International SAMPE Symposium and Exhibition. – V. 46, 2001. P. 1331...1340.

14. Tabarsa T., Shakeri A. Evaluation of physical and mechanical properties of Paulownia wood core and fiberglass surfaces sandwich panel // 8th International Conference on Composite Science and Technology. – V.471-472. P.85...90.

REFERENCES

1. Turkovskij S.B., Pogorelcev A.A., Preobrazhenskaya I.P. Kleenye derevyannye konstrukcii s uzlamy na vkleennyh sterzhnyah v sovremennom stroitelstve (sistema CNIISK) / Pod obsh. red. S.B.Turkovskogo. – M.: RIF "Strojmaterialy", 2013.
2. Preobrazhenskaya I.P., Pogorelcev A.A., Turkovskij S.B. Razrabotka proekta i stroitelstvo sklada hloristogo kaliya s karkasom iz sbornyh derevyannyh ram proletom 63 m // Stroitelnye materialy. – 2003, №5. S.14...15.
3. Linkov V.I. Konstrukcii na osnove derevyannyh elementov sostavnogo secheniya s soedineniyami na naklonnyh metallicheskih sterzhnyah bez primeneniya kleya // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitelstvo. – M.: OOO "Izd-vo PGS", 2012. № 11. S.29...31.
4. Linkov N.V. Nesushaya sposobnost derevyannyh balok sostavnogo secheniya na soedinenii "KM-Vkladish" // Vestnik MGSU. – 2011, № 1, t.2. S.161...167.
5. Filimonov E.V., Linkov N.V. Modelirovanie sredstvami PK SCAD soedineniya derevyannyh elementov kompozicionnym materialom na osnove epoksidnoj matricy i steklotkani // Vestnik MGSU. – 2009, № 1. Spetsvypusk. S. 50...53.
6. Linkov N.V. Opredelenie parametrov soedineniya "KM-obklejka" dlya derevyannyh elementov sostavnogo secheniya // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitelstvo. – 2014, № 9. S. 47...50.
7. Roshina S.I., Lisyatnikov M.S., Gribanov A.S., Glebova T.O. Raschet i usilenie predelno-napryazhennyh priopornyh zon vysokih derevokleennyh balochnyh konstrukcij // Lesotekhnicheskij zhurnal. – 2015, №1. S.187...197.
8. Linkov N.V. K voprosu o primenении kompozicionnyh materialov na tkanevoj osnove v derevyannyh konstrukciyah sostavnogo secheniya // Izv. vuzov. Tehnologiya tekstilnoj promyshlennosti. – 2017, № 3. S. 103...108.
9. Linkov N.V. Raschet derevyannyh balok sostavnogo secheniya na soedineniyah s primeneniem kompozicionnogo materiala po teorii sostavnyh sterzhnej A.R.Rzhanicyna // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitelstvo. – 2013, № 4. S. 18...20.
10. Yang Y.L., Liu J.W. Flexural behavior of wood beams strengthened with HFRP // Construction and Building Materials. – V.43, 2013. P. 118...124.
11. Sobczak L., Lang R.W. Polypropylene composites with natural fibers and wood - general mechanical property profiles // Composites Science and Technology. – V. 72, 2012. P. 550...557.
12. Sonti S., Superfesky M.C. Static response of wood crossties reinforced with composite // International SAMPE Symposium and Exhibition. – V. 41, 1996. P. 1291...1303.
13. Anegunta S. Evaluation of mechanical properties of glass fiber wrapped CCA-treated wood coupons // International SAMPE Symposium and Exhibition. – V. 46, 2001. P. 1331...1340.
14. Tabarsa T., Shakeri A. Evaluation of physical and mechanical properties of Paulownia wood core and fiberglass surfaces sandwich panel // 8th International Conference on Composite Science and Technology. – V.471-472. P.85...90.

Рекомендована кафедрой металлических и деревянных конструкций. Поступила 16.04.18.