

**К ВОПРОСУ О ПРИМЕНЕНИИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ
НА ТКАНЕВОЙ ОСНОВЕ
В ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЯХ СОСТАВНОГО СЕЧЕНИЯ**

**TO THE QUESTION OF USING FABRIC BASE COMPOSITE MATERIALS
IN COMPOUND SECTION WOODEN STRUCTURES**

*Н.В. ЛИНЬКОВ
N.V. LINKOV*

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

Композиционный материал на основе технического текстиля и эпоксидной матрицы в соединении "КМ-обклейка" формируется на боковых поверхностях деревянных элементов и по физико-механическим характеристикам композита хорошо сочетается с конструкционной древесиной. Рассмотрены результаты испытаний составных деревянных балок-моделей, в которых изменяли толщину композиционного материала в соединении "КМ-обклейка" и схему приложения нагрузки. Установлены границы эффективного изменения толщины композиционного материала в соединении "КМ-обклейка". Определены коэффициенты условия работы K_w и K_s , учитывающие снижение несущей способности деревянной конструкции за счет податливости соединения "КМ-обклейка".

Composite material based on technical textiles and epoxy matrix in "CM-taping" connection is formed on the lateral surfaces of wooden elements. Physical and mechanical characteristics of the composite material fits well with structural timber. The test results are considered based on difference of composite material thickness and loading scheme. The boundaries of effective thickness change are established. The coefficients of working conditions K_w and K_s are determined which take into account the reduction of bearing capacity because of connection's suppleness.

Ключевые слова: композиционный материал на основе эпоксидной матрицы и технического текстиля, деревянные элементы составного сечения, податливость связей сдвига, соединение "КМ-обклейка", коэффициенты условия работы, несущая способность составных деревянных элементов.

Keywords: composite material based on epoxy matrix with reinforcement by technical textiles, composite sectioned wooden beams, shifting deflections, connection "CM-taping", factors of working conditions, load bearing capacity of composite sectioned wooden beams.

Для создания деревянных составных элементов необходимы эффективные соединения, обеспечивающие совместную работу отдельных ветвей, формирующих составное сечение [1...4]. Для деревянных конструкций внедряются соединения с применением композиционных материалов, формируемых на поверхности деревянных элементов составного сечения в процессе их изготовления [12], [13]. Основой таких материалов и соединений, получивших название "КМ-обклейка" [5], [6], является матрица в виде эпоксидного синтетического связующего, армированная тканевыми материалами различного плетения. Также могут использоваться готовые конструкционные пластики в виде лент, полос или листов, которые приклеивают на подготовленные деревянные поверхности. Указанные материалы по своим физико-механическим характеристикам близки к характеристикам древесины [11], что позволяет создавать эффективно работающие соединения, обладающие незначительной деформативностью и стабильностью адгезионных связей между композитом и контактной поверхностью деревянных элементов [7], [8], [10], [14]. Несущая способность составных деревянных элементов снижается по сравнению с элементами цельного сечения [9], что в расчетах по первой и второй группам предельных состояний учитывается коэффициентами условия работы K_w и $K_{ж}$ соответственно.

Цель настоящей работы – экспериментальное определение коэффициентов условия работы K_w и $K_{ж}$ для расчета деревянных элементов составного сечения в зависимости от толщины композиционного материала и податливости соединения "КМ-обклейка".

Для оценки несущей способности соединения "КМ-обклейка" и для оценки влияния податливости КМ-соединения на несущую способность и прогибы составного деревянного элемента при различной толщине композиционного материала в деревянных элементах составного сечения были изготовлены шесть балок-моделей составного сечения из двух брусков разме-

рами $2 \times 20(h) \times 40 \times 1000$ мм. Соединение "КМ-обклейка" выполняли в 1, 2 и 3 слоя композиционного материала, что составило 2, 2,5, 4 и 6% от жесткости условно-цельного сечения создаваемого деревянного элемента. Композиционный материал располагали в опорных зонах балок на участках протяженностью $1/3L$ и $1/4L$. При испытаниях нагрузку на конструкцию прикладывали в виде двух сосредоточенных сил в $1/3L$ и $1/4L$ соответственно (рис. 1 – конструкция и схема нагружения балок-моделей на соединениях "КМ-обклейка").

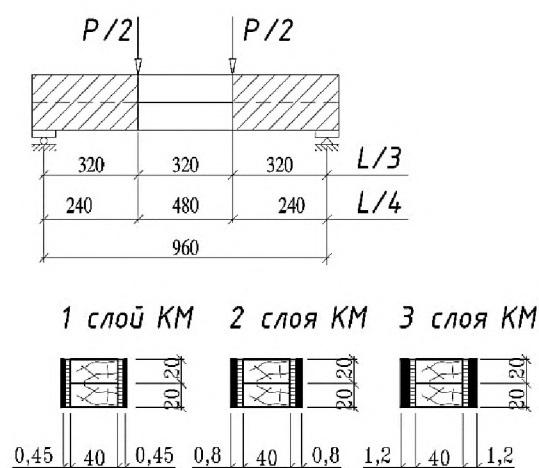


Рис. 1

Работу соединения "КМ-обклейка" при поперечном изгибе деревянных элементов составного сечения исследовали при двух схемах нагружения и трех значениях жесткости композиционного материала в КМ-соединении для каждой схемы нагружения.

При испытаниях определяли прогибы в середине пролета и нормальные напряжения в зоне чистого изгиба конструкций. Разрушение конструкций при КМ-обклейке в 1 слой происходило в результате среза композиционного материала по шву сплачивания, при КМ-обклейке в 3 слоя – в результате разрушения древесины нижнего бруска по растянутой зоне на участке чистого изгиба. При КМ-обклейке в 2 слоя разрушение носило смешанный характер, сопровождалось нарушением адгезионных связей между композиционным материалом обклейки и контактной боковой по-

верхностью деревянного элемента с последующим разрушением деревянных элементов по растянутой зоне.

Для оценки несущей способности деревянных конструкций и КМ-соединений были определены фактические характеристики материалов: модуль упругости композиционного материала $E_{KM}=14000$ МПа, модуль упругости древесины $E_{др}=14000$ МПа, временное сопротивление древесины изгибу $R_{вр.и} = 41$ МПа. Определяли жесткость деревянных балок условно-цельного сечения размерами $b \times h = 40 \times 40$ мм, $E_{др}I_{бр} = 29,867 \cdot 10^8$ Н·мм². Жесткость КМ-обклейки на боковых поверхностях соединяемых элементов составила для КМ-обклейки в 1 слой при толщине композиционного материала $t_{KM}=0,45$ мм – $E_{KM}I_{KM1}=0,672 \cdot 10^8$ Н·мм² $=0,0225 E_{др}I_{бр}$ (2,25% от $E_{др}I_{бр}$), для КМ-обклейки в 2 слоя при толщине композиционного материала $t_{KM}=0,8$ мм – $E_{KM}I_{KM2}=1,195 \cdot 10^8$ Н·мм² $=0,04 E_{др}I_{бр}$ (4% от $E_{др}I_{бр}$), для КМ-обклейки в 3 слоя при толщине композиционного материала $t_{KM}=1,2$ мм – $E_{KM}I_{KM3}=1,79 \cdot 10^8$ Н·мм² $=0,06 E_{др}I_{бр}$ (6% от $E_{др}I_{бр}$).

Податливость связей сдвига снижает несущую способность составных деревянных элементов. Если соединение, обеспечивающее совместную работу отдельных стержней составного сечения, обладает податливостью, по сравнению с конструкцией цельного сечения, происходит снижение несущей способности составной деревянной конструкции. Податливость связей сдвига вызывает перераспределение напряжений в стержнях составного элемента и снижает несущую способность конструкций.

Коэффициенты K_w и $K_{ж}$ определены на основании экспериментальных данных в виде отношения расчетных и фактических параметров напряженно-деформированного состояния элементов условно-цельного и составного сечения: по первой группе предельных состояний $K_w = \sigma_{расч.ц} / \sigma_{факт} \leq 1$, по второй группе предельных состояний $K_{ж} = f_{расч.ц} / f_{факт} \leq 1$, где $\sigma_{факт} = E_{др}\epsilon$ – фактические нормальные напряжения в зоне чистого изгиба балок, ϵ – относительные деформации, вычисленные по показаниям тензометрических датчиков, $f_{факт}$ – фактические прогибы балок в середине пролета.

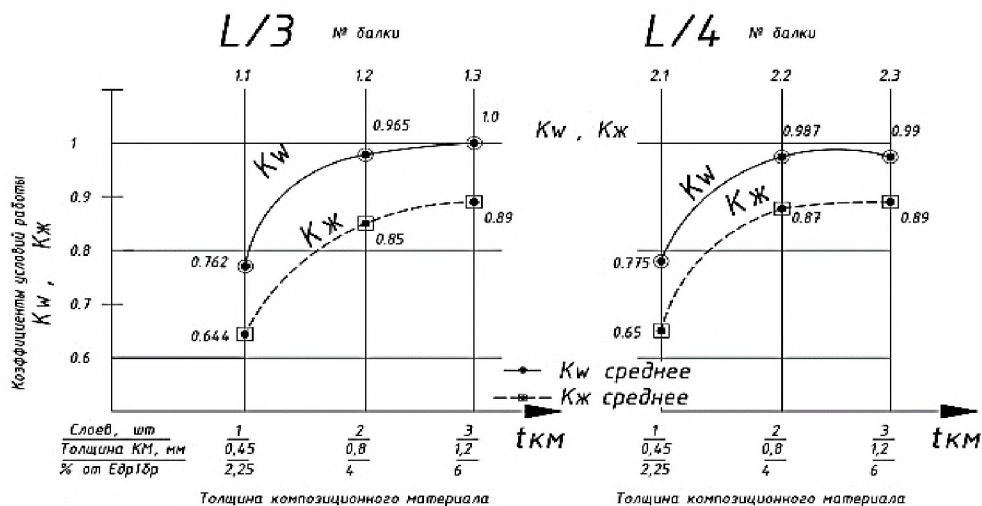


Рис. 2

Определение коэффициентов K_w и $K_{ж}$ выполняли в пределах упругой работы конструкций на следующих уровнях нагружения: при достижении в зоне чистого изгиба конструкций напряжений, соответствующих расчетному сопротивлению древесины изгибу: $\sigma_{факт} = R_{и} = 13$ МПа;

при достижении в середине пролета прогибов: $f_{факт} = 1/200 L$; при достижении конструкциями верхней границы области упругой работы, что соответствует нагрузке на балку: $N=N_{I-II}$. На всех указанных уровнях нагружения определяли фактические и расчетные напряжения в зоне

чистого изгиба $\sigma_{\text{факт}}$ и $\sigma_{\text{расч.ц}}$, фактические и расчетные прогибы в середине пролета конструкций $f_{\text{факт}}$ и $f_{\text{расч.ц}}$, на основании которых определяли коэффициенты K_w и $K_{ж}$. Результаты испытаний и вычислений представлены на графиках на рис. 2 (влияние толщины КМ-обклейки на

величину коэффициентов условия работы составных деревянных элементов K_w и $K_{ж}$) и в табл. 1 (определение коэффициентов K_w и $K_{ж}$ по результатам испытаний деревянных балок составного сечения на соединении "КМ- обклейка").

Т а б л и ц а 1

Наименование	Единица измерения	Схема нагружения					
		L/3			L/4		
		толщина КМ-обклейки в соединении, слоев					
		1	2	3	1	2	3
N при $\sigma=13$ МПа	Н	700	888	992	998	1192	1270
$\sigma_{\text{факт}}$	кН/см ²	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3025	1,3
$\sigma_{\text{расч.ц}}$	кН/см ²	0,953	1,232	1,421	1,005	1,334	1,279
$\sigma_{\text{расч.ц}}/\sigma_{\text{факт}}$		0,733	0,948	1,093	0,773	1,024	0,984
K_w		0,733	0,948	1	0,773	1	0,984
$f_{\text{факт}}$	мм	5,09	4,74	5,16	5,64	5,49	5,428
$f_{\text{расч.ц}}$	мм	3,163	4,06	4,627	3,568	4,863	4,742
$K_{ж}=f_{\text{расч.ц}}/f_{\text{факт}}$		0,621	0,857	0,897	0,633	0,886	0,874
N при $f=1/200L$	Н	642	891	912	839	1033	1110
$\sigma_{\text{факт}}$	кН/см ²	1,215	1,304	1,194	1,2043	1,152	1,146
$\sigma_{\text{расч.ц}}$	кН/см ²	0,876	1,236	1,306	0,85	1,157	1,118
$\sigma_{\text{расч.ц}}/\sigma_{\text{факт}}$		0,721	0,948	1,094	0,706	1,004	0,976
K_w		0,721	0,948	1	0,706	1	0,976
$f_{\text{факт}}=1/200L$	мм	4,75	4,75	4,75	4,75	4,85	4,75
$f_{\text{расч.ц}}$	мм	2,91	4,08	4,254	3,003	4,23	4,188
$K_{ж}=f_{\text{расч.ц}}/f_{\text{факт}}$		0,613	0,859	0,896	0,632	0,872	0,882
N_{I-II}	Н	2100	2700	3300	2400	3000	3600
$\sigma_{\text{факт}}$	кН/см ²	3,445	3,619	4,558	2,859	3,092	3,610
$\sigma_{\text{расч.ц}}$	кН/см ²	2,867	3,746	4,726	2,417	3,357	3,625
$\sigma_{\text{расч.ц}}/\sigma_{\text{факт}}$		0,832	1,035	1,037	0,845	1,086	1,004
K_w		0,832	1	1	0,845	1	1
$f_{\text{факт}}$	мм	13,60	14,60	17,55	12,53	13,36	15,33
$f_{\text{расч.ц}}$	мм	9,49	12,34	15,39	8,58	11,24	13,46
$K_{ж}=f_{\text{расч.ц}}/f_{\text{факт}}$		0,698	0,845	0,877	0,685	0,841	0,878

Из табл. 1 следует, что коэффициенты K_w и $K_{ж}$ составили в среднем для принятых схем нагружения балок при соединении "КМ-обклейка" в 1 слой $K_w=0,768$, $K_{ж}=0,647$, при соединении "КМ-обклейка" в 2 слоя: $K_w=0,983$, $K_{ж}=0,860$, при соединении "КМ-обклейка" в 3: слоя $K_w=0,993$, $K_{ж}=0,886$. Полученные значения коэффициентов K_w показывают, что увеличение толщины и соответственно жесткости обклейки в 1,78 раза от 0,0225 $E_{др}I_{бр}$ (2,25% от $E_{др}I_{бр}$) до 0,04 $E_{др}I_{бр}$ (4% от $E_{др}I_{бр}$) повышает эффективность совместной работы брусев составного сечения из условия действия нормальных напряжений (1-я группа предельных состояний) в 1,28 раза, по критерию прогибов в середине пролета (2-я группа предельных состояний) в 1,33 раза.

Дальнейшее увеличение толщины композиционного материала в соединении "КМ-обклейка" еще в 1,5 раза – до 0,06 $E_{др}I_{бр}$ (6% от $E_{др}I_{бр}$) – повышает эффективность совместной работы брусев незначительно – на 1 и 3% соответственно. Эффективная жесткость композиционного материала может составлять не более 6% от жесткости создаваемого деревянного элемента составного сечения 0,06 $E_{др}I_{бр}$.

Получены аналитические зависимости, отражающие влияние жесткости композиционного материала соединения "КМ-обклейка" на несущую способность балок по 1 и 2-й группам предельных состояний. Зависимости, отражающие эффективность совместной работы брусев при изменении толщины и соответственно жесткости ком-

позиционного материала, представлены в виде полинома второй степени и определены по методу наименьших квадратов:

$$K_w = -0,0128I^2 + 0,188I + 0,3376,$$

$$K_{ж} = -0,0225I^2 + 0,2513I + 0,1925,$$

где I – жесткость КМ-обклейки в % от жесткости создаваемого деревянного элемента в диапазоне 2...6%.

В табл. 2 представлена несущая способность деревянных балок составного сечения на соединениях "КМ-обклейка", кН/м.

Т а б л и ц а 2

№ п/п	Параметры составных балок			Коэффициенты K_w			Коэффициенты $K_{ж}$		
	пролет	размеры составного сечения		при жесткости КМ-обклейки в % от жесткости деревянного элемента $E_{др} I_{бр}$					
		L, м	h, мм	b, мм	2	4	6	2	4
				0,66	0,88	1,00	0,60	0,74	0,84
1	6	400	200	11,6	15,6	17,7	9,2	11,3	12,7
2	7,5	500	200						
3	9	600	200						

ВЫВОДЫ

1. Соединение "КМ-обклейка" на основе эпоксидной матрицы и стеклоткани, в котором формирование композиционного материала производится на боковых поверхностях соединяемых деревянных элементов, обладает достаточной эффективностью при обеспечении совместной работы брусев и может применяться для создания деревянных конструкций составного сечения.

2. Для соединения "КМ-обклейка" экспериментально установлены значения коэффициентов условия работы K_w и $K_{ж}$, которые учитывают снижение несущей способности составных конструкций за счет податливости связей сдвига и при обеспеченной несущей способности соединения "КМ-обклейка" составляют $K_w=0,77...0,98$ и $K_{ж}=0,65...0,86$ – в зависимости от назначаемой жесткости композиционного материала обклейки $E_{км} I_{км}$, которая может составить от 2,25 до 6% от жесткости $E_{др} I_{бр}$ создаваемого деревянного элемента составного сечения.

3. Установлены аналитические зависимости, позволяющие определить значения коэффициентов K_w и $K_{ж}$ для деревянных элементов составного сечения на соединении "КМ-обклейка" при жесткости композиционного материала от 2 до 6% от жесткости создаваемого деревянного элемента.

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. – 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. Спецвыпуск. – 2009, №1. 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. Роцина С.И., Лисятников М.С., Грибанов А.С., Глебова Т.О. Расчет и усиление предельнонапряженных приопорных зон высоких деревоклееных балочных конструкций // Лесотехнический журнал. – 2015, №1, С. 187...197.

8. Линьков Н.В., Филимонов Э.В. Прочность и деформативность композиционного материала на основе эпоксидной матрицы и стеклоткани // Вестник МГСУ. – 2010, №1. С. 235...243.

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. – Vol.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*. – Vol. 72, 2012. P. 550...557.

12. Sont S., Superfeský M.C. Static response of wood crossties reinforced with composite // *International SAMPE Symposium and Exhibition*. – Vol. 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*. – Vol. 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*. – Vol.471...472. P.85...90.

REFERENCES

1. Turkovskij S.B., Pogorel'cev A.A., Preobrazhenskaja I.P. Kleenye derevjannye konstrukcii s uzlamy na vkleennyh sterzhnjah v sovremennom stroitel'stve (sistema CNIISK) / Pod obshh. red. S.B.Turkovskogo. – M.: RIF "Strojmaterialy", 2013.

2. Preobrazhenskaja I.P., Pogorel'cev A.A., Turkovskij S.B. Razrabotka proekta i stroitel'stvo sklada hloristogo kalija s karkasom iz sbornyh derevjannyh ram proletom 63 m // *Stroitel'nye materialy*. – 2003, №5. S. 14...15.

3. Lin'kov V.I. Konstrukcii na osnove derevjannyh jelementov sostavnogo sechenija s soedinenijami na naklonnyh metallicheskih sterzhnjah bez primeneniya kleja // *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. – 2012, № 11. S. 29...31.

4. Lin'kov N.V. Nesushhaja sposobnost' derevjannyh balok sostavnogo sechenija na soedinenii "KM-Vkladysh" // *Vestnik MGSU*. – 2011, № 1, t.2. S.161...167.

5. Filimonov Je.V., Lin'kov N.V. Modelirovanie sredstvami PK SCAD soedinenija derevjannyh jelementov kompozicionnym materialom na osnove jepoksidnoj matricy i steklotkani // *Vestnik MGSU. Specvyпуск*. – 2009, №1. S. 50...53.

6. Lin'kov N.V. Opredelenie parametrov soedinenija "KM-obklejka" dlja derevjannyh jelementov sostavnogo sechenija // *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. – 2014, № 9. S. 47...50.

7. Roshhina S.I., Lisjatnikov M.S., Gribanov A.S., Glebova T.O. Raschet i usilenie predel'no-naprjazhennyh priopornyh zon vysokih derevokleenyh balochnyh konstrukcij // *Lesotekhnicheskij zhurnal*. – 2015, №1, S. 187...197.

8. Lin'kov N.V., Filimonov Je.V. Prochnost' i deformativnost' kompozicionnogo materiala na osnove jepoksidnoj matricy i steklotkani // *Vestnik MGSU*. – 2010, №1. S. 235...243.

9. Lin'kov N.V. Raschet derevjannyh balok sostavnogo sechenija na soedinenijah s primeneniem kompozicionnogo materiala po teorii sostavnyh sterzhnej A.R.Rzhanicy na // *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. – 2013, №4. S. 18...20.

10. Yang Y.L., Liu J.W. Flexural behavior of wood beams strengthened with HFRP // *Construction and Building Materials*. – Vol.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*. – Vol. 72, 2012. P. 550...557.

12. Sont S., Superfeský M.C. Static response of wood crossties reinforced with composite // *International SAMPE Symposium and Exhibition*. – Vol. 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*. – Vol. 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*. – Vol.471...472. P.85...90.

Рекомендована кафедрой металлических и деревянных конструкций. Поступила 28.04.17.