

УДК 624.011.2

Клееные деревянные и деревофанерные конструкции для покрытий спортивных сооружений

Кириленко В.Ф., к.т.н., Пинчук Е.А.

Национальная академия природоохранного и курортного строительства,
Украина

Анотація. В роботі розглянуті питання розрахунку і проектування площинних дощаноклеєних та деревофанерних балкових і рамних конструкцій змінного перерізу по довжині, які застосовуються в покриттях спортивних споруд малих прогонів. Для визначення напруженого стану і розрахунку запропонований як аналітичний метод з використанням рівнянь рівноваги, так і чисельний, заснований на методі кінцевих елементів із використанням програмного комплексу «Ліра».

Аннотация. В работе рассматриваются вопросы расчёта и проектирования плоскостных дощатоклеёных и деревофанерных балочных и рамных конструкций переменного сечения по длине, применяющихся в покрытиях спортивных сооружений малых пролётов. Для определения напряжённого состояния и расчёта предложены как методы с использованием уравнений равновесия, так и численные, основанные на методе конечного элемента с использованием программного комплекса «Лира».

Abstract. The paper deals with the calculation and design plane and derevofanernykh glulam beam and frame structures with variable cross section in length, used in coatings of sports facilities small spans. To determine the stress state and calculation suggested as methods using the equilibrium equations, and numerical based on the finite element method using the software «Lyra».

Ключевые слова: дощатоклеёные конструкции, деревофанерные, переменная высота, напряжения.

Состояние вопроса и постановка задачи. Клееные деревянные конструкции эффективно используются в зданиях и сооружениях общественного назначения. В спортивных сооружениях это крытые катки, залы многоцелевого назначения, плавательные бассейны, легкоатлетические манежи, крытые стадионы, спортзалы в учебных заведениях и др. [1, 2]. Покрытия зданий небольших (до 25 м) пролётов выполняют в виде дощатоклеёных и деревофанерных балок, для больших пролётов применяют дощатоклеёные арки и гнутоклеёные рамы. Рациональное распределение материала достигается проектированием элементов переменного сечения по длине, и это обстоятельство соответствующим образом должно учитываться расчётом. Кроме двускатных дощатоклеёных балок в покрытиях спортивных сооружений малых пролётов могут быть эффективны двухшарнирные и трёхшарнирные треугольные арки переменного сечения с затяжками, трёхшарнирные рамы из прямолинейных

элементов и рамы с V-образными стойками или рамы с подкосами. Перечисленные дощатоклееные конструкции требуют не только относительно большого расхода древесины, но и специализированных заводов по их производству.

В условиях Украины, располагающей одним заводом клееных деревянных конструкций в г. Коростышев Житомирской обл. и не имеющей промышленных запасов древесины, весьма перспективными являются тонкостенные несущие конструкции на основе древесины и фанеры, обладающие сравнительно простой технологией изготовления с использованием стандартного деревообрабатывающего оборудования и рациональностью применяемых сечений [1, 3, 4]. В последнее время в России в качестве несущих элементов зданий ригельно-стоечного и рамно-арочного каркаса предложен клеефанерный элемент переменного сечения, получивший название «унифицированного клеефанерного элемента» (УКФ-элемента) [5, 6].

При проектировании и расчёте деревофанерных клееных конструкций переменной высоты в виде односкатных и двускатных балок, трёхшарнирных рам и арок появляется необходимость в учёте изменения высоты сечения по длине, в частности для двускатных деревофанерных балок сечение с максимальными усилиями в поясах находится таким же образом, как и в дощато-гвоздевых балках с перекрестной стенкой на гвоздях, т.е. без учета стенки в восприятии изгибающего момента. Кроме того, переменность сечения деревофанерных балок учитывается при нахождении прогибов. Что же касается определения напряжений, то в существующих нормах и справочных пособиях их вычисление производится так же, как и для элементов с параллельными продольными гранями.

В настоящей работе поставлена задача обобщения разработанных нами ранее вопросов определения напряжённого состояния элементов переменной высоты как прямоугольного, так и двутаврового (коробчатого) сечения, сопоставления значений напряжений с вычисленными без учёта изменения сечения и выработки предложений по учёту переменности в существующих методах расчёта деревофанерных конструкций.

Обоснование линейного распределения напряжений в балках с малыми уклонами. Для элементов узкого прямоугольного сечения с линейно изменяющейся высотой в виде симметричных клиньев в теории упругости имеются классические решения для определения всех компонент напряжения в случаях загрузки сосредоточенной силой или моментом, приложенных в вершине. Для несимметричных клиньев имеются решения при загрузке равномерно распределённой нагрузкой и нагрузкой, распределённой по линейному закону. Все эти решения показывают, что обычно при углах при вершине клиньев до 15° – 20° максимальная разница в опре-

делении нормальных напряжений по линейной зависимости составляет меньше 5% .

Для двутавровых элементов отсутствуют аналитические методы теории упругости, однако получившие в последнее время большое распространение программные комплексы, основанные на методе конечного элемента (МКЭ), позволяют проводить численные эксперименты и на их основе устанавливать имеющиеся закономерности.

С целью оценки влияния изменения сечения двутаврового клина, нагруженного сосредоточенной силой или моментом, с помощью программного комплекса «Лира» вычислялись нормальные напряжения при углах при вершине $2\alpha = 20^\circ, 30^\circ$ и 40° . Длина клина составляет 1000 мм, размеры поясов 63x30 мм и толщина фанерной стенки 3 мм. Ввиду небольшой разницы между модулем упругости фанеры ($E_{\phi} = 1,2E = 1,2 \cdot 8500 = 10200$ МПа) и модулем упругости древесины поясов ($E_{dp} = 10000$ МПа) двутавровый клин рассматривался как однородная система. Для реализации МКЭ клин разбивался на объемные конечные элементы типа 36 с размерами от 2,5 до 5 мм в зависимости от угла при вершине. Положение рассматриваемого сечения выбиралось таким образом, чтобы отношение высоты пояса h_n к высоте сечения h было примерно равным 0,1, что имеет место в реальных деревофанерных балках. Количество КЭ по оси сечения составляло от 62 при угле $2\alpha = 40^\circ$ до 105 при $2\alpha = 20^\circ$.

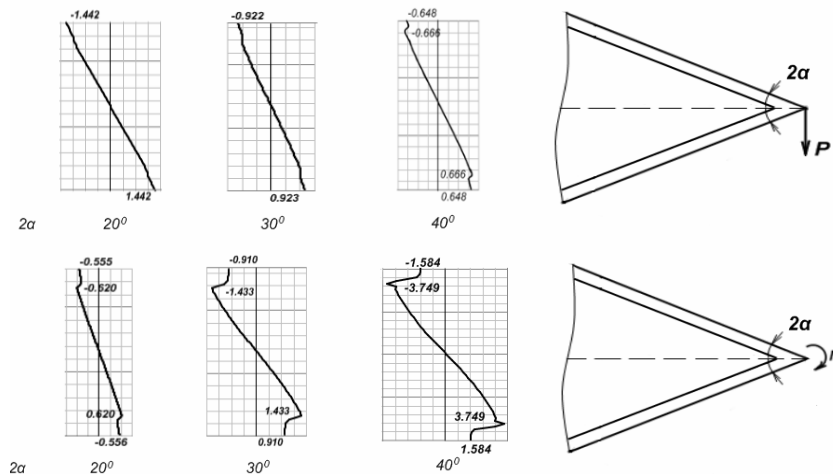


Рис. 1. Эпюры нормальных напряжений в двутавровом клине

На рис. 1 показаны эпюры нормальных напряжений σ_x в рассматриваемых сечениях при различных углах 2α для нагружения сосредоточенной

силой $P = 7,98$ кН или сосредоточенным моментом, величина которого равнялась 241,4 кНсм при угле $2\alpha = 20^\circ$; 428,4 кНсм при $2\alpha = 30^\circ$ и 957 кНсм при угле $2\alpha = 40^\circ$.

Сопоставление этих значений с вычисленными по элементарной формуле $\sigma = My/I$ показывает, что при углах 2α до 20° можно принять линейный закон распределения, ошибка для максимальных напряжений в поясах при этом будет незначительной. Это даёт возможность использовать линейную зависимость в аналитических подходах при определении других компонент напряжений σ_y и τ_{xy} .

Определение касательных напряжений в стенках двутавровых (коробчатых) балок. Для определения касательных напряжений предложен аналитический метод, основанный на использовании уравнений равновесия бесконечно малого по длине балки элемента, вырезанного на расстоянии y от нейтральной оси элемента. Применяя скользящую систему координат путём рассмотрения симметричных и несимметричных балок получено общее выражение для касательных напряжений, пригодное как для прямоугольных, так и двутавровых (коробчатых) сечений [7, 8]:

$$\tau = \frac{QS}{bI} + \frac{M}{bI} \left(\frac{dS}{dx} + \frac{1}{2} by \frac{dh}{dx} \right) - \frac{MS}{bI^2} \frac{dI}{dx}, \quad (1)$$

где все обозначения общеприняты, а dS/dx , dI/dx , dh/dx – соответствующие производные функций статического момента, момента инерции и высоты сечения. Для симметричных балок второе слагаемое в скобках отсутствует. В этом выражении для стенки двутаврового (коробчатого) сечения

$$S = \frac{1}{2} \left\{ b_n h_n (h - h_n) + \delta \left[\left(\frac{h - 2h_n}{2} \right)^2 - y^2 \right] \right\};$$

$$\frac{dS}{dx} = \frac{1}{2} \left[b_n h_n + \frac{\delta}{2} (h - 2h_n) \right] \frac{dh}{dx};$$

$$I = 2 \left[\frac{b_n h_n^3}{12} + b_n h_n \left(\frac{h - h_n}{2} \right)^2 \right] + \frac{\delta (h - 2h_n)^3}{12};$$

$$\frac{dI}{dx} = \left[b_n h_n (h - h_n) + \frac{\delta}{4} (h - 2h_n)^2 \right] \frac{dh}{dx},$$

где b_n , h_n – размеры пояса; δ – толщина стенки.

Для балок с продольной осью симметрии и линейно изменяющейся высотой $dh/dx = 2tg\alpha$, для балок с нижней горизонтальной гранью $dh/dx = tg\alpha$ (α – угол наклона грани).

В качестве примера исследовалось распределение скалывающих напряжений в стенке двускатной балки коробчатого сечения пролетом 11,7 м с уклоном верхней грани 1:10, рассмотренной в [9]. В указанном примере высота балки на опоре $h_{on} = 90$ см, высота среднего сечения $h_{cp} = 148$ см. Пояса балки выполнены из четырёх вертикальных слоёв досок сечением 33×160 мм ($b_n = 4 \cdot 33 + 20 = 152$ мм; $h_n = 160$ мм), стенки – из клееной берёзовой фанеры марки ФСФ толщиной по 10 мм ($\delta_\phi = 20$ мм). Предельная расчетная нагрузка на балку $q = 16,62$ кН/м.

Касательные напряжения в стенке согласно (1) вычислялись в трёх сечениях, расположенных на расстоянии $l/8$; $l/4$; $3l/8$ от опоры. Результаты расчетов сведены в табл. 1.

Таблица 1

Определение напряжений в деревофанерной балке коробчатого сечения с уклоном верхней грани 1:10

Сечение	№ точек	Усилия		Геометрические характеристики			Напряжения		
		M , кНм	Q , кН	I , см ⁴	$\frac{dI}{dx}$, см ³	$\frac{dS}{dx}$, см ²	S , см ³	$\frac{QS}{\delta_\phi I}$, кН/см ²	τ , кН/см ²
1/8	1	124,2	72,97	1 043300	2376	15,42	10847	0,379	0,345
	2						12187	0,426	0,353
	3						10847	0,379	0,303
1/4	1	213,3	48,62	1 445000	2850	16,15	12671	0,213	0,180
	2						14616	0,246	0,152
	3						12671	0,213	0,116
3l/8	1	266,5	24,31	1 873600	3299	16,82	14324	0,093	0,068
	2						16915	0,110	0,018
	3						14324	0,093	-0,002

На рис. 2 показаны эпюры касательных напряжений по высоте стенки между поясами, построенные согласно (1) в кН/см².

Определение напряжений в коробчатой балке с помощью МКЭ. С целью оценки аналитического метода определения касательных напряжений в стенке и вычисления всех компонент напряжений σ_x , σ_y , τ_{xy} по высоте указанных ранее сечений был применён программный комплекс «Лира». Балка была разбита на 51692 объемных КЭ типа 36 с размерами

основной сетки по поясам 4x4x22 мм и 4x4x10 мм по стенке. Равномерно распределённая нагрузка распределялась на группу верхних контурных узлов и составила $q = 0.071 \times 9 \times 26 = 16,62$ кН/м (где 0,071 кН – сила в узле; 9 – число узлов по ширине сечения; 26 – число узлов на 1 пог. м. длины балки). Жесткостные характеристики конечных элементов стенок и поясов принимались одинаковыми: модуль упругости $E = 10000$ МПа; коэффициент Пуассона $\nu = 0,02$; плотность $\rho = 5$ кН/м³.

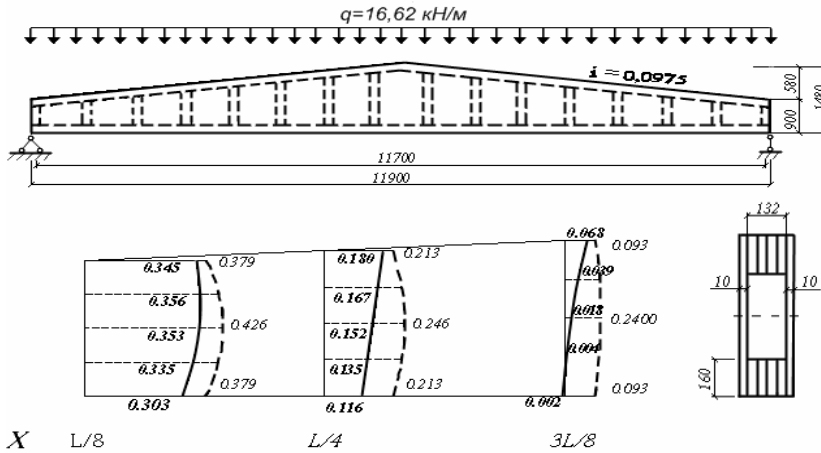


Рис. 2. Конструкция балки и эпюры касательных напряжений по высоте стенки деревофанерной балки:

--- по формуле Журавского; — по зависимости (1)

На рис. 3-5 представлены эпюры напряжений в фанерных стенках балки для поперечных сечений, расположенных на расстоянии $l/8$; $l/4$; $3l/8$ от опоры.

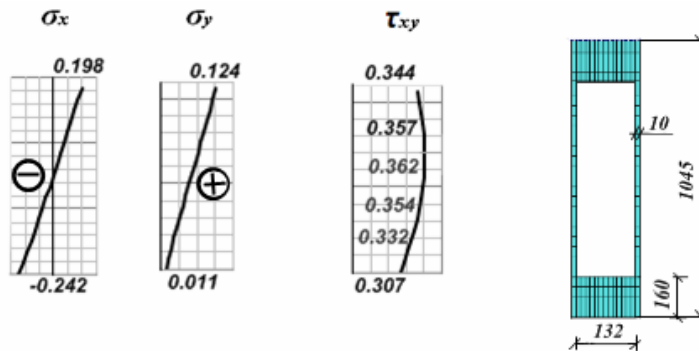


Рис. 3. Эпюры напряжений в поперечном сечении $l/8$.

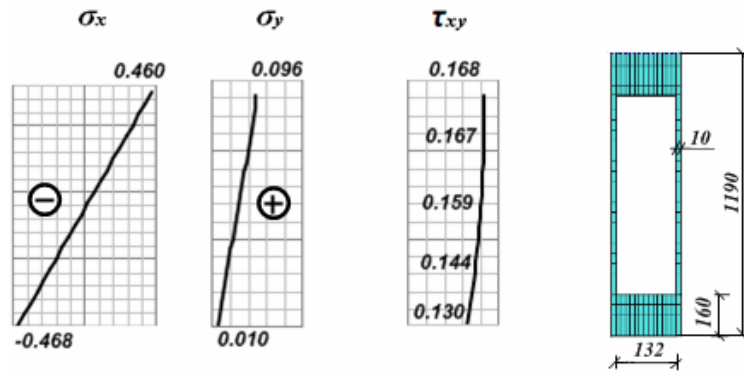


Рис. 4. Епюры напряжений в поперечном сечении $l/4$.

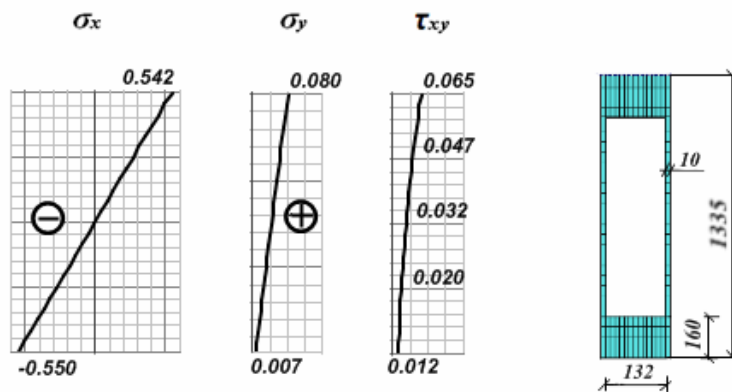


Рис. 5. Епюры напряжений в поперечном сечении $3l/8$.

Обсуждение полученных результатов. Распределение нормальных напряжений σ_x по высоте фанерных стенок носит линейный характер, однако их значения на уровне внутренних кромок поясов, вычисленные с помощью МКЭ и по элементарной формуле, различны

- в сечении на расстоянии $l/8$ соответственно 0,242 и 0,432 кН/см²;
- в сечении на расстоянии $l/4$ соответственно 0,468 и 0,642 кН/см²;
- в сечении на расстоянии $3l/8$ соответственно 0,550 и 0,722 кН/см².

Расхождение по отношению к элементарному решению вблизи опоры составляет 44 % и уменьшается при продвижении к середине балки до 24 %. Такую разницу для коробчатых (двутавровых) балок можно объяснить приближенностью методов сопротивления материалов, что в свою очередь было также отмечено при исследовании напряжений в приопорных зонах деревофанерных балок постоянной высоты [10].

Результаты определения касательных напряжений в стенках балки, полученные различными методами, сведены в табл. 2. Здесь точки 1 и 3 взяты на уровне внутренних кромок соответственно верхнего и нижнего поясов, а точка 2 лежит на нейтральной линии сечения.

Таблица 2

Касательные напряжения в стенке коробчатой балки

Сечение	№ точек	Напряжения τ_{xy} , кН/см ²		
		Численное решение (ПК «Лира»)	Аналитическое решение	
			по формуле Журавского	по формуле (1)
1/8	1	0,344	0,379	0,345
	2	0,362	0,426	0,353
	3	0,307	0,379	0,303
1/4	1	0,168	0,213	0,180
	2	0,159	0,246	0,152
	3	0,130	0,213	0,116
3/8	1	0,065	0,093	0,068
	2	0,032	0,110	0,018
	3	0,012	0,093	-0,002

Как следует из табличных данных, результаты определения напряжений с помощью МКЭ и вычисленных аналитически весьма близки в сечениях вблизи опор и в четверти пролёта, расхождение в точках 2 и 3 сечения 3/8 можно объяснить малостью значений напряжений, что влияет на точность при вычислении по формуле (1). Касательные напряжения по высоте сечения распределяются несимметрично, а их величина для приопорного сечения на 10 % – 25 % меньше вычисленной по формуле Журавского. При продвижении к середине балки эта разница, как и характер распределения значительно отличается, что объясняется преобладающим влиянием изгибающих моментов.

Применение МКЭ позволило выяснить характер распределения напряжений σ_y , действующих поперёк оси балки. Закон их распределения в стенках приближается к линейному, а их максимальные значения не превышают величины $0,25q / \delta_{cm}$, что объясняется разгружающим действием верхних поясов.

Выводы

Переменность высоты дощатоклееных и деревофанерных элементов является дополнительным резервом снижения материалоемкости конструкций, однако влияет на распределение касательных напряжений и напряжений, действующих поперёк оси элемента.

Для двускатных балок некоторое снижение касательных напряжений в фанерных стенках является дополнительным резервом их прочности и местной устойчивости.

Стенки деревофанерных балок и пояса находятся в сложном напряженном состоянии, что требует несколько иных критериев прочности и расчёта.

Литература

- [1] Эффективное использование древесины и древесных материалов в современном строительстве // Тез. докл. Всесоюзного совещания (г. Архангельск, 18-20 июня 1980) / Центральное и Архангельское обл. правление НТО Стройиндустрии, М., 1980. – 431 с.
- [2] Васильев С.Н. Клееная древесина в проектировании // Современные металлические и деревянные конструкции: Сб. тр. Международного симпозиума, 18 – 20 июня 2009 / БелНИИС – НТЦ. – Брест, 2009. – С. 29 – 42.
- [3] Серов Е.Н. Резерв повышения эффективности конструкционного использования клееной древесины // Расширение применения деревянных клееных конструкций в строительстве: Материалы Всесоюзной научно-практ. конф. / ЦНИИСК им. Кучеренко. – М., 1983. – С. 54 – 62.
- [4] Кириленко В.Ф., Махновский В.Л. Применение фанеры в несущих и ограждающих конструкциях // Тез. докл. II Международной конф. «Материалы для строительства» / ПГАСА. – Днепропетровск, 1993. – С. 148 – 149.
- [5] Дмитриев П.А., Шмидт А.Б. Атлас строительных конструкций из клееной древесины и водостойкой фанеры. – М.: Изд-во АСВ, 2002. – 292 с.
- [6] Шмидт А.Б. Унифицированные клефанерные элементы (УКФ – элементы) как несущие конструкции покрытий зданий и сооружений // ИВУЗ. Строительство и архитектура. – № 1. – 1998. – С. 18 – 21.
- [7] Кириленко В.Ф., Пинчук Е.А. Скальвающие напряжения в деревянных балках переменной высоты // Науковий вісник будівництва. – Вип. 54. – Харків: ХДТУБА, ХОТВ АБУ, 2009. – С. 179 – 185.
- [8] Кириленко В.Ф., Кузенков М.Ю., Пинчук Е.А. Напряжения в деревофанерных балках постоянного и переменного сечения // Motrol: Motoryzacja i Energetyka Rolnictwa. - vol. 11B. – Simferopol – Lublin, 2009. – С. 196 – 211.
- [9] Индустриальные деревянные конструкции. Примеры проектирования: Уч. пособие / под ред. Ю.В. Слишкохова. – М.: Стройиздат, 1991. – 256 с.
- [10] Кириленко В.Ф., Кузенков М.Ю. Напряжения в приопорных зонах деревофанерных балок // Ресурсоeкономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Зб. наук. праць / НУВГП. – Вип. 19. – Рівне, 2009. – С. 159 – 164.

Надійшла до редколегії 25.06.2010 р.