

DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-11-27-36

**Маркина Ю.Д.**

Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет

E-mail: poluektoff@bk.ru

## КРУЧЕНИЕ НИЖНЕГО ПОЯСА ПОДКРАНОВО-ПОДСТРОПИЛЬНОЙ ФЕРМЫ

**Аннотация.** Нижний пояс подкраново-подстропильной фермы, по которому перемещается кран, изготавливается из тонкостенного коробчатого профиля. Местные сосредоточенные крановые нагрузки, приложенные к поясу с эксцентриситетом, вызывают его стесненное кручение. Методика расчета подкраново-подстропильной фермы не учитывает включение в работу нижнего пояса на кручение и горизонтальный изгиб элементов решетки. За расчетную схему пояса принимается балка, пролетом равная пролету подкраново-подстропильной фермы. В действительности поведение пояса при кручении отличается от поведения балки.

Целями работы являются оценка влияния на работу нижнего пояса при кручении элементов решетки и верхнего пояса и уточнение методики расчета нижнего пояса. Проведено исследование влияния элементов решетки на угловую податливость и крутящий момент нижнего пояса при различных соотношениях жесткостей пояса и всей подкраново-подстропильной фермы. Предложена расчетная схема пояса для расчета на кручение – балка на угловых упругих опорах в точках примыкания решетки. Принята формула для определения жесткости упругих опор. Погрешность в определении изгибающих моментов в нижнем поясе по предложенному методу относительно результатов численного расчета стержневой расчетной схемы всей подкраново-подстропильной фермы не превышает 2 %. Аналитически определены напряжения в нижнем поясе с учетом составляющей от кручения. Полученные результаты проверены численным методом с применением оболочечных конечных элементов и натурным обследованием.

**Ключевые слова:** кручение, угол поворота, угловая податливость, тонкостенное сечение, напряженно-деформированное состояние.

**Введение.** Подкраново-подстропильные фермы (ППФ) – это конструкции, совмещающие в себе функции подкрановых систем, то есть систем, поддерживающих крановые пути и обеспечивающих возможность перемещения по ним мостовых кранов, и функции подстропильных систем, поддерживающих стропильные фермы и конструкции покрытия. Продольные ППФ, используемые при перемещении мостовых кранов вдоль здания, широко распространены в промышленных зданиях металлургических предприятий. Пролеты таких конструкций могут достигать 48 м, грузоподъемность крана составляет 400 т и более, режимы работы кранов на металлургических предприятиях – 7К, 8К. Элементы ППФ изготавливаются из габаритных сварных двутавровых балок и замкнутых коробчатых профилей, обладающих значительной жесткостью, как в плоскости, так и из плоскости ППФ.

Пространственная работа ППФ обеспечивается в первую очередь мощным ездовым поясом замкнутого сечения, который способен равноценно работать на изгиб в двух плоскостях и сопротивляться деформациям закручивания. Пояс изготавливается из тонкостенного коробчатого профиля, часто несимметричного, с консолями, диафрагмами, ребрами жесткости и другими подкрепляющими элементами. Высота и ширина сечения могут превышать 3 м [1]. Аналитический расчет пояса, по которому перемещается кран,

осложняется тем, что приложенные к поясу с эксцентриситетом местные сосредоточенные крановые нагрузки, вызывают его стесненное кручение. Тонкостенные балки замкнутого профиля при кручении находятся в сложном напряженно-деформированном состоянии (НДС), в них возникают дополнительные нормальные напряжения и деформации [2]. Классическая теория расчета на кручение тонкостенных балок с замкнутым профилем была разработана А.А. Уманским [3]. Исследования НДС тонкостенных балок замкнутого профиля и различные методы анализа предложены в работах [4–8]. В статьях [9, 10] анализируется влияние сдвиговых деформаций на поведение замкнутого профиля при кручении.

При расчете на кручение и горизонтальный изгиб по действующей методике [11] нижний пояс считается нераскрепленным из плоскости ППФ. Усилия в нем от горизонтальных нагрузок и кручения определяются как для однопролетной балки, пролетом равной пролету ППФ. В действительности механизм кручения пояса ППФ отличается от балочного. Горизонтальные линейные смещения и угловые смещения пояса вовлекают в работу элементы решетки. Элементы решетки испытывают изгиб из плоскости ППФ и кручение, при этом оказывают поддерживающее влияние на ездовой пояс, уменьшают его смещение, усилия и напряжения [12]. При горизонталь-

ном изгибе перемещения нижнего пояса ППФ отличаются от перемещений балки пролетом и сечением эквивалентной нижнему в пределах 12 % [13]. При приложении к нижнему поясу крутящего момента угол поворота ездового пояса в сравнении с эквивалентной балкой может не только снижаться, но и, чаще, значительно возрастать [14].

**Целями** данной работы является оценка влияния конструктивных элементов ППФ на работу нижнего пояса при кручении, и уточнение методики его расчета с учетом вовлечения элементов решетки и верхнего пояса в пространственную работу нижнего пояса на кручение.

Для достижения поставленных целей решались следующие задачи:

1) Исследование работы нижнего пояса при кручении, выявление отличий его работы от работы балки, сечением и пролетом эквивалентной нижнему поясу. Такая балка является расчетной схемой для определения внутренних усилий в нижнем поясе по действующей методике расчета [11].

2) Разработка аналитического метода учета вовлечения элементов решетки и верхнего пояса в пространственную работу нижнего пояса на кручение, уточнение методики расчета нижнего пояса ППФ.

3) Численное исследование НДС ППФ, сравнение напряжений, полученных аналитическими вычислениями и численным методом конечных элементов.

4) Сравнение результатов исследования с результатами натурного обследования.

**Методика проведения исследований.** В качестве объекта исследования выбрана ППФ конвертерного отделения кислородно-конвертерного цеха Магнитогорского металлургического комбината. Тип конструкции – продольная ППФ, пролет – 36 м, высота – 15,44 м (рис. 1). Раскосы и стойки решетки ферм составного двутаврового сечения. Нижний пояс – неразрезная сварная балка несимметричного коробчатого сечения. Узлы сопряжения решетки с прорезными фасонками нижнего пояса выполнены на высокопрочном крепеже.

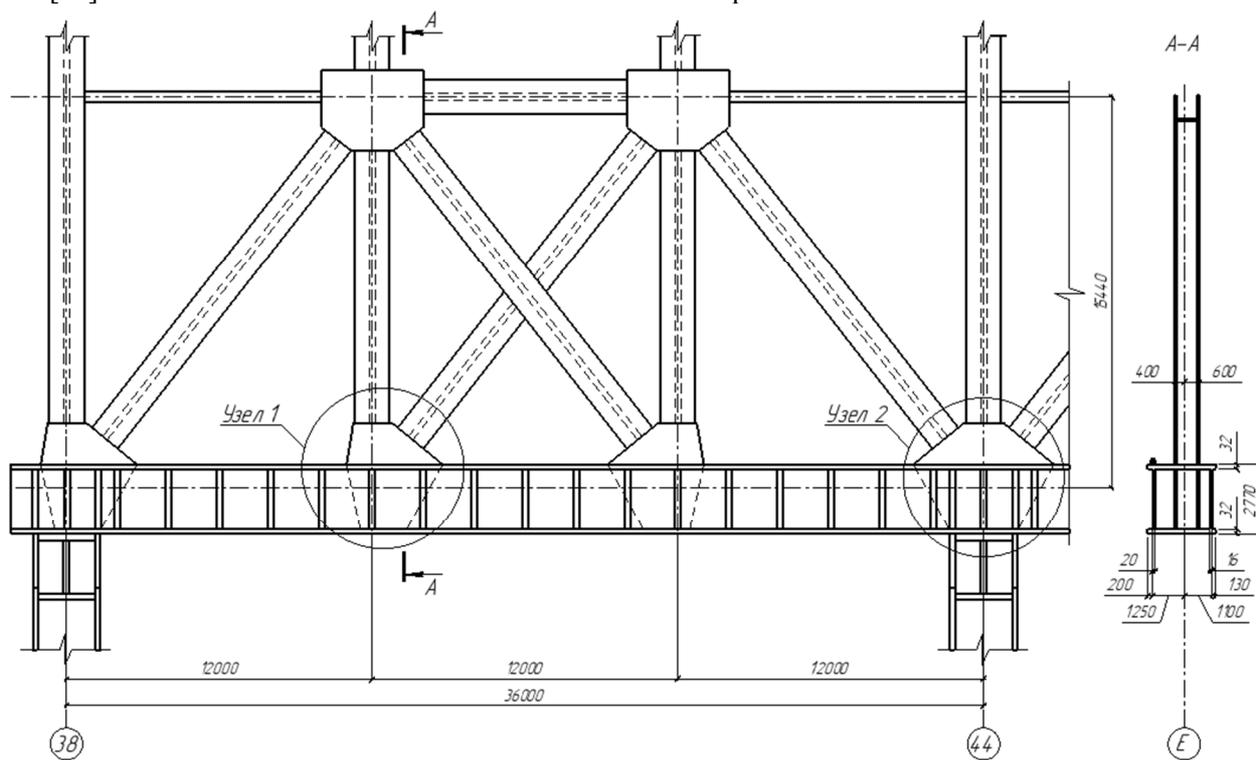


Рис. 1. ППФ конвертерного отделения ККЦ ММК

Для изучения работы нижнего пояса при кручении, выявления отличий его работы от работы балки, оценки влияния на работу пояса соотношения жесткостей нижнего пояса и всей ППФ рассмотрены 5 вариантов исследуемой ППФ с различными сечениями элементов решетки. Для каждой расчетной схемы (РС) определялись угловая податливость и максимальный крутящий момент в нижнем поясе от нагружения

крутящим моментом  $M_{кр} = 100$  кНм, приложенным в узел сопряжения элементов решетки с нижним поясом (узел 1, рис. 1). Проведено сравнение этих параметров с результатами расчета балки, сечением и пролетом эквивалентной нижнему поясу. Расчеты выполнены численным методом конечных элементов с применением стержневых элементов.

Предложен аналитический метод расчета нижнего пояса на кручение. Проведено сравнение результатов расчета податливости и максимального крутящего момента нижнего пояса при аналитическом и численном расчете для вариантов исследуемой ППФ с различными соотношениями жесткостей нижнего пояса и ППФ.

Для проверки правильности определения напряжений по аналитической методике построена пространственная модель ППФ с применением оболочечных конечных элементов, позволяющих учесть упругую податливость в соединениях, влияние подкрепляющих элементов и конструктивного решения соединения на работу

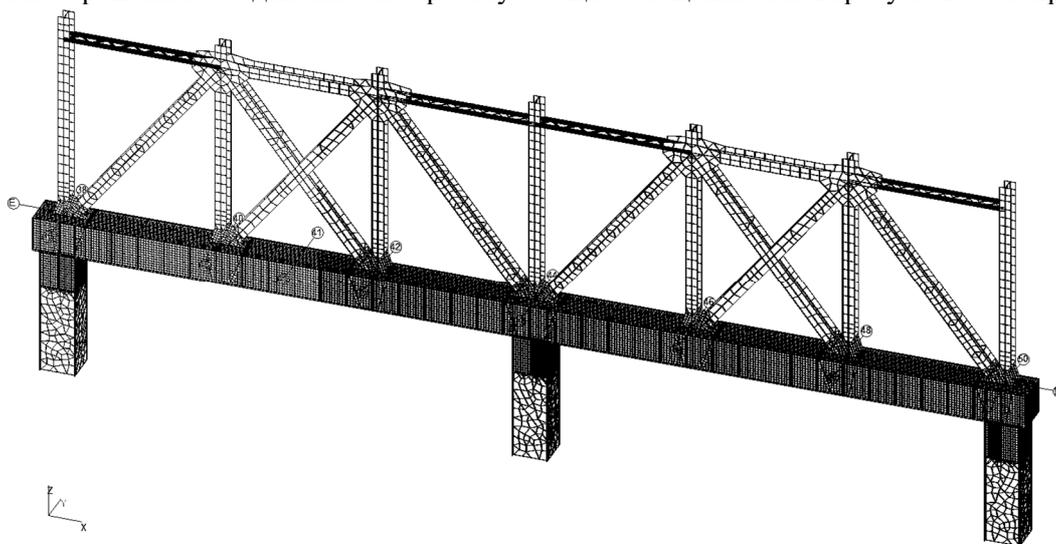


Рис. 2. Конечно-элементная модель ППФ

Все численные расчеты выполнены с помощью ПК SCAD.

Для сопоставления результатов аналитического и численного расчета с результатами натурного обследования произведен расчет на нагрузку от одного крана, расположенного в середине пролета ППФ в осях 38–44. Вес груза  $Q = 396$  т. Приближение грузовой тележки определено из условия максимально возможного – 3,2 м.

Исследования напряженно-деформированного состояния узлов примыкания к нижнему поясу элементов решетки и опорных узлов ППФ проводились тензометрическим методом в рамках натурного обследования. Основные результаты обследования приведены в монографии [17]. Объекты – ППФ, расположенные в кислородно-конвертерном цехе ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (ККЦ ММК) в прокатном цехе № 3 ОАО «Златоусовский металлургический комбинат». ККЦ ММК построен в 1989 г. и состоит из двух основных производственных помещений: конвертерного отделения и отделения непрерывной разливки стали (ОНРС). Основной каркас ККЦ смонтирован по

конструкции (рис. 2). Приняты 4-узловые оболочечные конечные элементы с 6 степенями свободы в каждом узле – тип 44. Размеры конечных элементов нижнего пояса не превышают 0,2 м [15, 16]. В основном используются четырехугольные элементы с соотношением сторон, близким к единице. Граничные условия заданы из условия опирания на верхний пояс ППФ стропильных ферм и жесткого закрепления оснований колонн. В узлах опирания стропильных ферм на верхний пояс установлены связи, препятствующие смещению в направлении оси  $Y$ , в нижних узлах колонны установлены связи, препятствующие смещению и повороту во всех направлениях.

чертежам шифра 3-Ф1535.02 км1 ЦНИИПроктстальконструкции. Металлоконструкции каркаса изготовлены на Челябинском заводе металлоконструкций и смонтированы трестом «Уралстальконструкция».

Конвертерное отделение состоит из трех пролетов. ППФ установлены по ряду «Е» (рис. 1). В качестве стропильных конструкций используются стропильные балки. Кровля холодная из профильного металлического листа. В конвертерном отделении грузоподъемность мостового крана  $Q=450/100/20$  т, вес крана 615 т, режим работы 7К.

Проведено изучение кинетики напряженно-деформированного состояния от крановой нагрузки тензометрическим методом. Измерения проводились проволоочными тензорезисторами с базой 5 мм, которые объединялись в трехкомпонентные прямоугольные тензорозетки, что позволило определить напряжения по основным направлениям. Регистрация показаний тензорезисторов осуществлялась при помощи информационно-измерительной системы СИИТ-3 в автоматическом режиме опроса и выдачи информации.

В конвертерном отделении исследования проводились в узле, расположенном по ряду «Е», ось «44». При испытании узла ППФ загрузка была осуществлена одним краном, расположенным в пролёте «Д-Е». Вес груза  $Q = 396$  т. Приближение грузовой тележки составило 3,2 м (максимально возможное). При каждом положении тележки производился трёхкратный опрос тензорезисторов.

При проведении всех испытаний снятие нулевых отчётов производилось при нахождении крана за температурным швом. Регистрацию показаний осуществляли после фиксирования положения крана в заданной точке и выдерживания нагрузки в течение 5–10 минут.

**Основная часть.** Поведение пояса ППФ при кручении отличается от поведения балки. При

кручении балки происходит поворот её сечений без смещения относительно нейтральной оси. При кручении пояса происходит поворот и горизонтальное смещение его сечения относительно нейтральной оси, сопровождаемое дополнительным поворотом. Поэтому податливость нижнего пояса может превышать податливость эквивалентной балки, при этом крутящий момент в поясе всегда будет меньше. На рисунке 3, 4 приведены результаты численного расчета угловой податливости и максимального крутящего момента нижнего пояса и эквивалентной балки при различных соотношениях жесткостей решетки и нижнего пояса. При расчете стержневой РС всей ППФ значения крутящих моментов в нижнем поясе более, чем в 2 раза ниже, чем при расчете по РС балки, пролетом равной пролету ППФ.

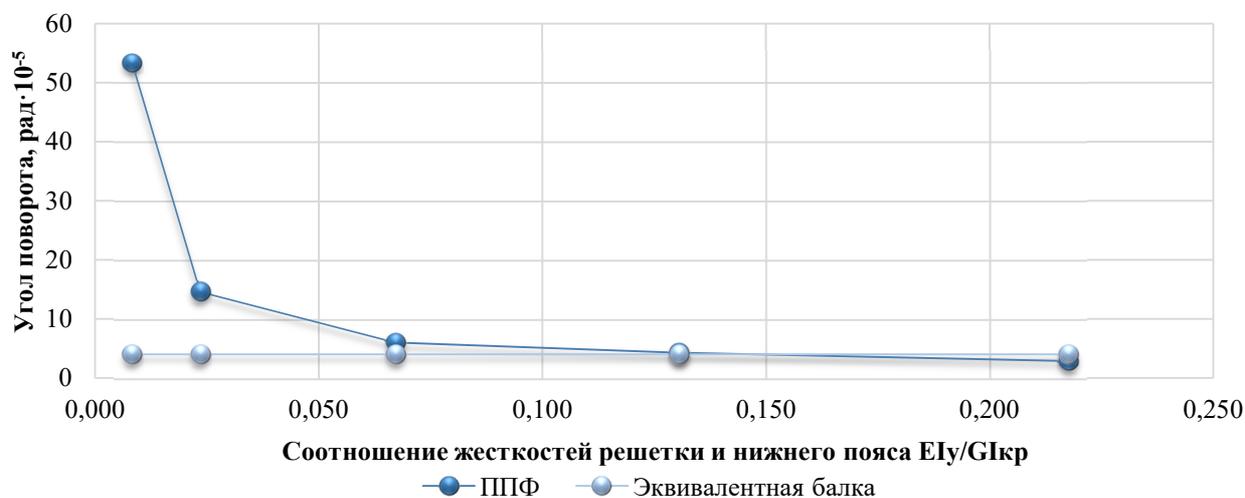


Рис. 3. Угловая податливость нижнего пояса и эквивалентной балки при различных соотношениях жесткостей решетки и нижнего пояса

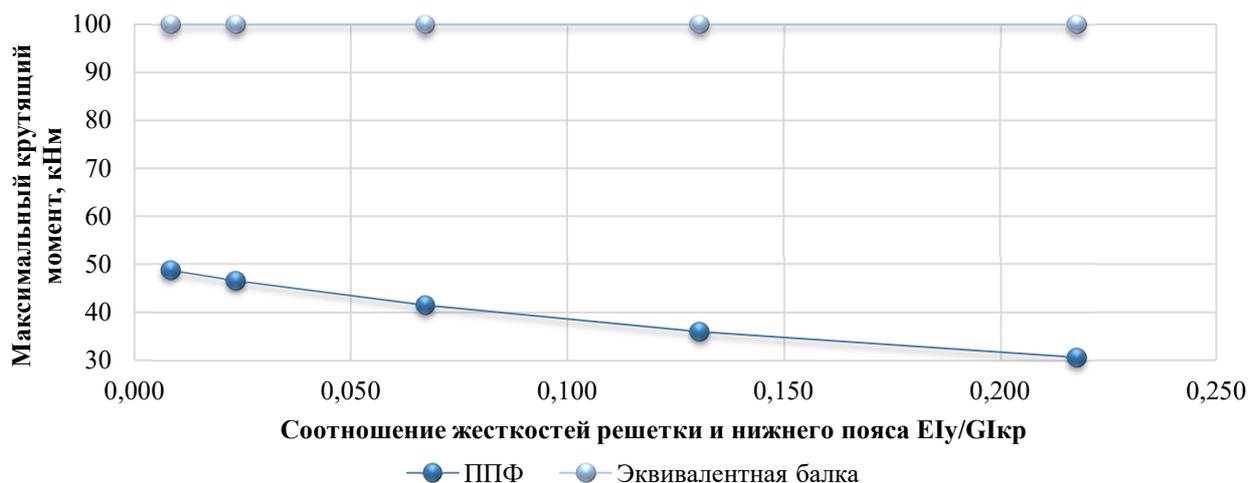


Рис. 4. Максимальный крутящий момент нижнего пояса и эквивалентной балки при различных соотношениях жесткостей решетки и нижнего пояса

С целью приближения РС нижнего пояса к реальной конструкции необходимо учитывать включение решетки в работу ППФ на кручение. Для этого принимаем в качестве РС пояса балку

с угловыми упругими опорами в местах присоединения решетки, оказывающими сопротивление повороту вокруг продольной оси (рис. 5).

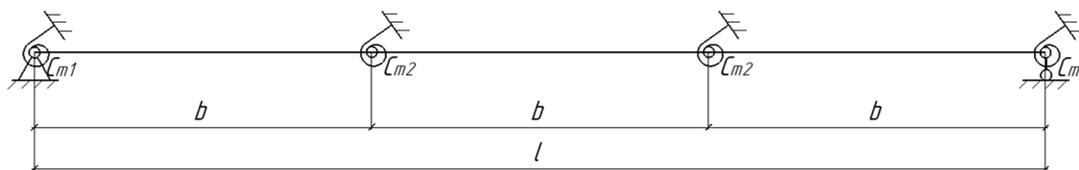


Рис. 5. РС нижнего пояса – балка на угловых упругих опорах  
 $l$  – пролет ППФ,  $b$  – длина панели

В ППФ, верхние пояса которых соединены со стропильными фермами и связями, в противодействии смещений которых участвуют и элементы кровли, соответствующие концы решетки работают как защемлённые. Тогда жесткость упругих опор, эмитирующих решетку, можно определить по формуле:

$$C_{mi} = \frac{4EI_{np,yi}}{h}, \quad (1)$$

где  $h$  – высота ППФ по осям пояса;

$I_{np,yi}$  – приведенный момент инерции элементов решетки, определяемый как сумма проекций моментов инерции всех элементов решетки, сходящихся в  $i$ -ом узле, на вертикальную ось:

$$I_{np,yi} = \sum_{j=1}^{k_i} I_{yj} \sin^2 \alpha_j, \quad (2)$$

$\alpha_j$  – угол наклона  $j$ -ого элемента решетки к вертикальной оси.

Для вычисления матрицы удельных перемещений уравнений пяти бимоментов  $B_i$  используются относительные жесткости упругих опор:

$$\overline{C}_{mi} = \frac{C_{mi}}{EI_{\omega}}, \quad (3)$$

$I_{\omega}$  – секториальный момент инерции сечения нижнего пояса.

Сравнение результатов расчета податливости и крутящего момента нижнего пояса при аналитическом и численном расчете для вариантов исследуемой ППФ с различными соотношениями жесткостей нижнего пояса и ППФ приведено на рисунке 6. Особенность деформации нижнего пояса при учете решетки заключается в том, что, когда при кручении он испытывает горизонтальный изгиб, его упругая ось превращается в кривую с различными знаками кривизны на разных участках, а, следовательно, и с различными углами закручивания. Несмотря на большую погрешность в определении податливости (10–26 %), результаты определения крутящего момента сходятся (погрешность 0,3–1,9 %).

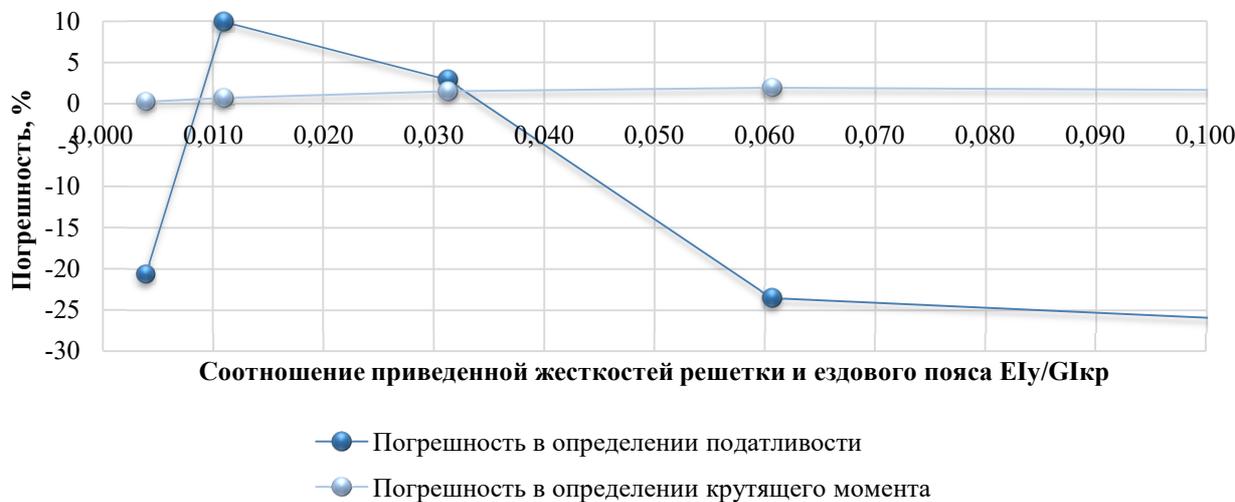


Рис. 6. Точность аналитического расчёта нижнего пояса

При несимметричной вертикальной нагрузке от крана схема работы системы была разложена на изгиб в вертикальной плоскости и

кручение пояса, сопровождаемое изгибом и кручением решетки.

Эквивалентное напряжение вычислены в соответствии с СП 16.13330.2017 по формуле:

$$\sigma_e = \sqrt{(\sigma_x + \sigma_{loc,x})^2 - (\sigma_x + \sigma_{loc,x})\sigma_{loc,y} + \sigma_{loc,y}^2 + 3(\tau_{xy} + \tau_{loc,xy})^2}. \quad (4)$$

Входящие в (4) выражения элементарных напряжений определены с учетом всех составляющих:

$$\sigma_x = \frac{N}{A} + \sigma_{xz} + \sigma_{xy} + \frac{B\omega\omega}{I_{\omega}}, \quad (5)$$

$$\tau_{xy} = \frac{\Delta K_3(0)S_{\rho 1}}{s_1 I_{zu}}, \quad (6)$$

где  $\sigma_{xz}$  и  $\sigma_{xy}$  – изгибные напряжения, определяемые для кромки стенки;

$\Delta K_3(0)$  – полусумма равнодействующих касательных напряжений в стенке под силой.

Результаты вычисления эквивалентных и касательных напряжений в стенках нижнего пояса ППФ в середине пролета в осях 38–44 приведены на рисунке 7.

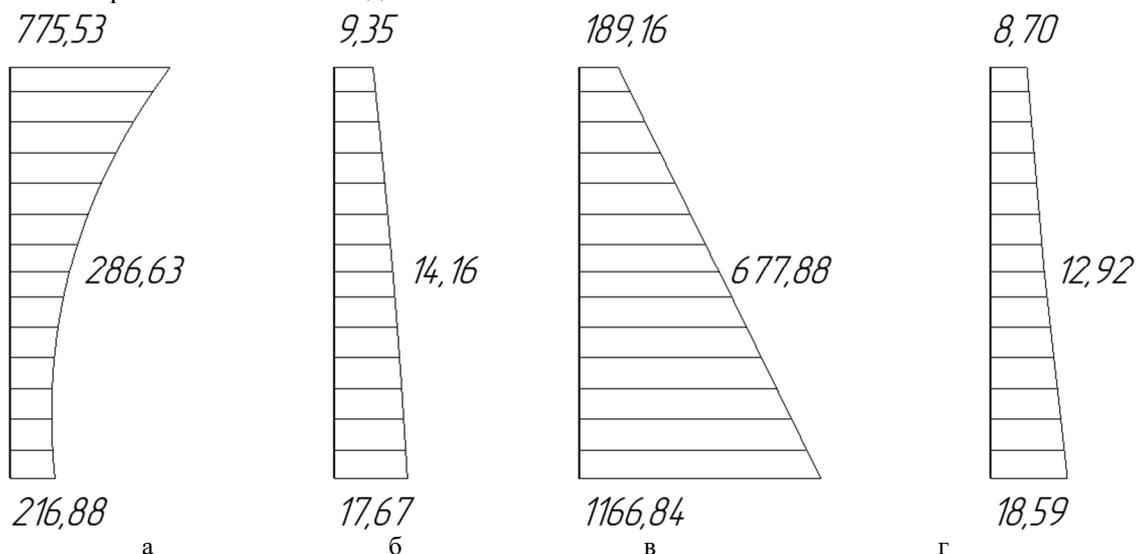


Рис. 7. Поля напряжений в стенках нижнего пояса в середине пролета, кг/см<sup>2</sup>:

а)  $\sigma_e$  в стенке под крановым рельсом, б)  $\tau_{xy}$  в стенке под крановым рельсом, в)  $\sigma_e$  в правой стенке, г)  $\tau_{xy}$  в правой стенке (по рис. 1)

Результаты аналитического расчета в отдельных зонах имеют расхождение с результатами расчета на ЭВМ. Сравнение напряжений,

полученных аналитическим и численным методами приведено в таблице 1.

Таблица 1

**Сравнение значений напряжений в стенках нижнего пояса ППФ в середине пролета в осях 38–44**

Элемент	Точка	Аналитический расчет		Численный расчет	
		$\sigma_e$ , кгс/см <sup>2</sup>	$\tau_{xy}$ , кгс/см <sup>2</sup>	$\sigma_e$ , кгс/см <sup>2</sup>	$\tau_{xy}$ , кгс/см <sup>2</sup>
Левая стенка (рис. 1)	Верх	775,53	9,35	714,09	2,10
	Центр	286,63	14,16	270,64	13,64
	Низ	216,88	17,67	478,72	17,60
Правая стенка (рис. 1)	Верх	189,16	8,70	298,15	17,90
	Центр	677,88	12,92	425,94	21,22
	Низ	1166,84	18,59	799,44	19,26

Сравнение результатов численного расчета и натурального обследования исследуемой ППФ приведено в таблице 2. Данные экспериментальных исследований НДС узла ППФ, полученные методом тензометрии, сопоставимы с результатами

численного расчета методом конечных элементов за исключением отдельных точек. Несответствие отдельных напряжений может объясняться влиянием сварочных напряжений и скоплением трещиноподобных дефектов в околошовных зонах [18].

Таблица 2

**Сравнение значений напряжений в узле «44-Е» (узел 2, рис. 1)**

Точка на рис. 9	Натурное обследование			Численный расчет		
	$\sigma_x$ , кгс/см <sup>2</sup>	$\sigma_y$ , кгс/см <sup>2</sup>	$\tau_{xy}$ , кгс/см <sup>2</sup>	$\sigma_x$ , кгс/см <sup>2</sup>	$\sigma_y$ , кгс/см <sup>2</sup>	$\tau_{xy}$ , кгс/см <sup>2</sup>
1	-147	441	218	-21,7	391,8	126,2
2	-168	-840	-396	-157,6	-510,4	-277,0
3	966	672	-32	160,8	620,71	357,48
4	714	945	97	705,9	101,3	94,0

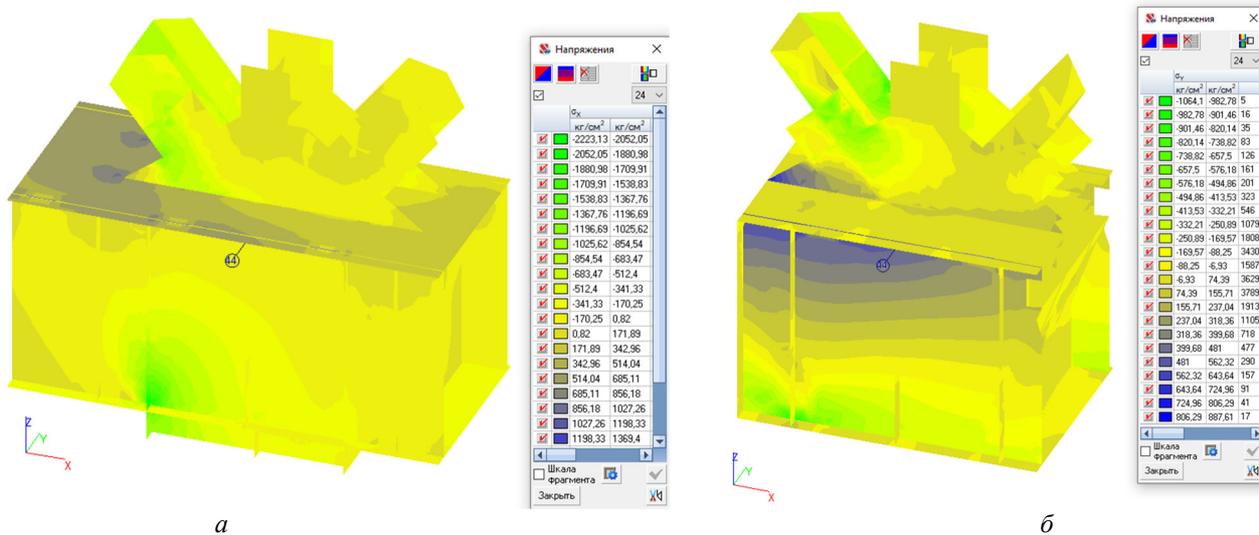


Рис. 8. Поля напряжений в узле «44-Е» (узел 2, рис. 1)

а)  $\sigma_x$ , б)  $\sigma_y$

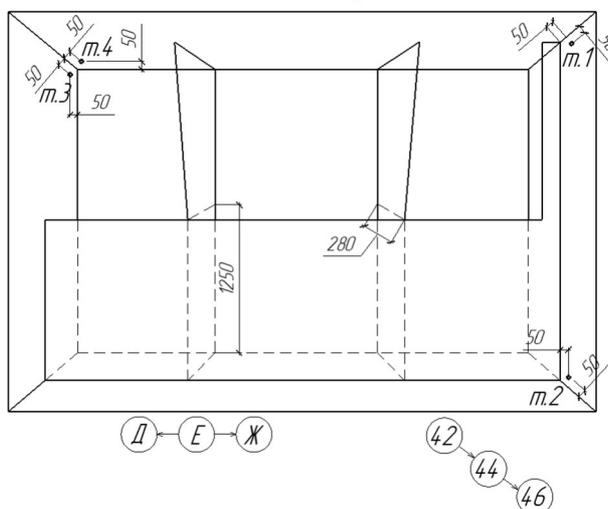


Рис. 9. Схема привязки точек определения напряжений в узле «44-Е» (узел 2, рис. 1)

**Выводы.**

1. Расчетная схема балки, принятая в действующей методике расчета нижнего пояса ППФ, не учитывает вовлечение элементов решетки и верхнего пояса в пространственную работу нижнего пояса на кручение. Крутящие моменты в эквивалентной балке более, чем в 2 раза выше крутящих моментов в нижнем поясе ППФ. При увеличении соотношения изгибной жесткости решетки и крутильной жесткости ездового пояса  $EI_y/GI_{кр}$  крутящий момент в нижнем поясе уменьшается.

2. Угловая податливость ездового пояса в большой степени зависит от соотношения жесткостей. Учет в расчете решетки может не только уменьшить, но и увеличить угол поворота пояса в зависимости от соотношения жесткостей. При соотношении изгибной жесткости решетки и крутильной жесткости ездового пояса  $EI_y/GI_{кр} < 0,07$  решетка оказывает значительное отрицательное влияние на угловую податливость ездового пояса кручению.

Податливость нижнего пояса может превышать податливость эквивалентной балки, так как при кручении происходит поворот сечений балки без смещения относительно нейтральной оси, при кручении пояса происходит поворот и горизонтальное смещение сечения, сопровождаемое дополнительным поворотом.

3. Расчетная схема балки на угловых упругих опорах, оказывающих сопротивление повороту вокруг продольной оси, позволяет учесть включение решетки в работу пояса на кручение и в большей степени соответствует работе реальной конструкции. Жесткость опор, устанавливаемых в местах присоединения элементов решетки к нижнему поясу, определена с учетом защемления верхних концов элементов решетки по формуле (1).

При определении крутящего момента погрешность предложенного аналитического метода относительно численного составляет не более 2 %. Большая погрешность при определении

податливости (10–26 %) объясняется особенностью деформации нижнего пояса, заключающейся в том, что при кручении его упругая ось превращается в кривую с различными знаками кривизны на разных участках, а, следовательно, и с различными углами закручивания.

4. Результаты аналитического расчета напряжения в нижнем поясе с учетом составляющей от кручения имеют расхождение с результатами расчета пространственной модели ППФ на ЭВМ в некоторых зонах. Необходимо дополнительное изучение методов вычисления внутренних усилий и напряжений в нижнем поясе. Данные натурных исследований напряжений пояса, полученные методом тензометрии, сопоставимы с результатами численного расчета за исключением отдельных точек. Причинами несоответствия напряжений в отдельных зонах могут являться скопления трещиноподобных дефектов в околошовных зонах и сварочные напряжения.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ельников Н.А., Кочетова Е.А. Анализ применения систем типа «подкраново-подстропильные фермы» в большепролетных цехах одноэтажных промышленных зданий // Труды научного конгресса 14-го российского архитектурно-строительного форума. 2016. С. 143–146.
2. Власов В.З. Тонкостенные упругие стержни. М.: Физматгиз, 1959. 568 с.
3. Уманский А.А. Кручение и изгиб тонкостенных авиаконструкций. М.: Оборонгиз, 1939. 112 с.
4. Doostfateme A., Hematiyan M., Arghavan S. Closed-form approximate formulas for torsional analysis of hollow tubes with straight and circular edges // Journal of Mechanics. 2009. Vol. 25. No. 4. Pp. 401–409.
5. Srinivasan V., Purushothaman T., Chatterjee S. Stress analysis of thin-walled circular and rectangular tubes subjected to torsion // International Journal of Mechanical Engineering and Technology. 2017. Vol. 8. № 8. Pp. 1580–1587.
6. Omidvari A., Hematiyan M. Approximate closed-form formulae for buckling analysis of rectangular tubes under torsion // International Journal of Engineering. 2015. Vol. 28. No. 8. Pp. 1226–1232.
7. Chiskis A., Parnes R. On torsion of closed thin-wall members with arbitrary stress-strain laws: a general criterion for cross-sections exhibiting no warping // Journal of Applied Mechanics. 2000. Vol. 67. Pp. 460–464.
8. Li L-Y., Easterbrook D. Free torsion of thin-walled structural members of open and closed-sections // Applied Mathematics and Mechanics. 2014. Vol. 35. № 1. Pp. 25–32.
9. Mentrasti L. Torsion of closed cross-section thin-walled beams: the influence of shearing strain // Thin-Walled Structures. 1987. Vol. 5. № 4. Pp. 277–305.
10. Mentrasti L. Distortion (and torsion) of rectangular thin-walled beams // Thin-Walled Structures. 1990. Vol. 10. № 3. Pp. 175–193.
11. Руководство по проектированию стальных подкрановых конструкций. М.: ЦНИИпроектстальконструкция, 1976. 112 с.
12. Лампси Б.Б. Расчет подкраново-подстропильных ферм. Горький, 1978. 52 с.
13. Лампси Б.Б., Хазов П.А., Маркина Ю.Д., Бриккель Д.М. Влияние жесткости элементов решетки на податливость ездового пояса подкраново-подстропильной фермы (ППФ) // Приволжский научный журнал. 2022. № 2. С. 29–37.
14. Лампси Б.Б., Маркина Ю.Д., Хазов П.А. Влияние высоты подкраново-подстропильной фермы (ППФ) на податливость ездового пояса // Приволжский научный журнал. 2023. № 1. С. 28–34.
15. Tusnina O.A. Finite element analysis of crane secondary truss // Magazine of Civil Engineering. 2018. № 1(77). Pp. 68–89. DOI:10.18720/MCE.77.7.
16. Туснина О.А., Такки В.Ф., Егоров И.Ф. Опыт замены нижнего пояса находящейся под нагрузкой подкраново-подстропильной фермы // Промышленное и гражданское строительство. 2023. № 4. С. 21–28. DOI:10.33622/0869-7019.2023.04.21-28.
17. Еремин К.И. Предотвращение разрушений строительных металлических конструкций. Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова, 2004. 235 с.
18. Еремин К.И., Шульга С.Н. Моделирование развития усталостных повреждений в подкраново-подстропильных фермах // Вестник МГСУ. 2014. № 2. С. 30–38.

#### Информация об авторах

**Маркина Юлия Дмитриевна**, старший преподаватель, аспирант кафедры теории сооружений и технической механики. E-mail: poluektoff@bk.ru. Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. Россия, 603950, г. Н. Новгород, ул. Ильинская, д. 65.

Поступила 26.09.2023 г.

© Маркина Ю.Д., 2023

**Markina Yu.D.**

*Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering*

*E-mail: poluektoff@bk.ru*

## TORSION OF LOWER BELT OF CRANE SECONDARY TRUSS

**Abstract.** *The lower belt of the crane secondary truss, along which the crane moves, is made of a thin-walled box profile. The largest local concentrated crane forces applied with eccentricity to the lower belt of truss made of thin-walled welded box cause its restrained torsion. The calculation method of the crane secondary truss does not consider the inclusion in the work of the lower belt for torsion and horizontal bending of the webs. A beam with a span equal to the span of the crane secondary truss is taken as the design scheme of the lower belt along which the crane moves. In fact, the work of the belt during torsion is different from the work of the beam.*

*The objectives of the work are to assess the impact on the operation of the lower belt during torsion of the webs and the upper belt and to clarify the methodology for calculating the lower belt. The study of the influence of webs on the angular malleability and torque of the lower belt has been carried out. Various ratios of the stiffness of the belt and the entire crane secondary truss are considered. The design scheme of the belt for the calculation of torsion is proposed – a beam angular elastic supports at the points of junction of the webs. The formula for determining the stiffness of elastic supports has been adopted. The error in determining the bending moments in the lower belt according to the proposed method relative to the results of numerical calculation of the rod design scheme of the entire crane secondary truss does not exceed 2%. The stresses in the lower belt, considering the torsion component, are analytically determined. The results were verified numerically using shell finite elements and a full-scale examination.*

**Keywords:** *torsion, angle of rotation, angular compliance, thin-walled section, stress-strain state.*

### REFERENCES

1. Yelnov N.A., Kochetova Ye.A. Analiz primeneniya sistem tipa «podkranovo-podstropilnye fermy» v bolsheproletnykh tsekhakh odnoetazhnykh promyshlennykh zdaniy [Analysis of the application of systems such as "crane-under-trusses" in large-span shops of single-storey industrial buildings]. Trudy nauchnogo kongressa 14-go rossiyskogo arkhitekturno-stroitel'nogo foruma. 2016. Pp. 143–146. (rus)
2. Rukovodstvo po proektirovaniyu stalnykh podkranovykh konstruktsiy [Guidelines for the design of steel crane structures]. Moscow.: TsNIIproektstalkonstruktsiya, 1976. 112 p. (rus)
3. Vlasov V.Z. Tonkostennyye uprugie sterzhni [Thin-walled elastic rods]. Moscow: Fizmatgiz, 1959. 568 p. (rus)
4. Doostfateme A., Hematiyan M., Arghavan S. Closed-form approximate formulas for torsional analysis of hollow tubes with straight and circular edges. Journal of Mechanics. 2009. Vol. 25. No. 4. Pp. 401–409.
5. Srinivasan V., Purushothaman T., Samrat Chatterjee Stress analysis of thin-walled circular and rectangular tubes subjected to torsion. International Journal of Mechanical Engineering and Technology. 2017. Vol. 8. No. 8. Pp. 1580–1587.
6. Omidvari A., Hematiyan M. Approximate closed-form formulae for buckling analysis of rectangular tubes under torsion. International Journal of Engineering. 2015. Vol. 28. No. 8. Pp. 1226–1232.
7. Chiskis A., Parnes R. On torsion of closed thin-wall members with arbitrary stress-strain laws: a general criterion for cross-sections exhibiting no warping. Journal of Applied Mechanics. 2000. Vol. 67. Pp. 460–464.
8. Li L.-Y., Easterbrook D. Free torsion of thin-walled structural members of open and closed-sections. Applied Mathematics and Mechanics. 2014. Vol. 35. No. 1. Pp. 25–32.
9. Mentrasti L. Torsion of closed cross-section thin-walled beams: the influence of shearing strain. Thin-Walled Structures. 1987. Vol. 5. No. 4. Pp. 277–305.
10. Mentrasti L. Distortion (and torsion) of rectangular thin-walled beams. Thin-Walled Structures. 1990. Vol. 10. No. 3. Pp. 175–193.
11. Rukovodstvo po proektirovaniyu stalnykh podkranovykh konstruktsiy [Guidelines for the design of steel crane structures]. Moscow.: TsNIIproektstalkonstruktsiya, 1976. 112 p. (rus)
12. Lamps B.B. Raschet podkranovo-podstropilnykh ferm [Calculation of crane secondary truss]. Gorky, 1978. 52 p. (rus)
13. Lamps B.B., Khazov P.A., Markina Yu.D., Brikkel D.M. Vliyanie zhyostkosti elementov reshyotki na podatlivost ezdovogo poyasa podkranovo-podstropilnoy fermy (PPF) [The effect of the rigidity of the grid elements on the pliability of the crane secondary truss riding belt]. Privolzhskiy nauchny zhurnal. 2022. No. 2. Pp. 29–37. (rus)
14. Lamps B. B., Khazov P. A., Markina Yu. D. Vliyanie vysoty podkranovo-podstropilnoy fermy (PPF) na podatlivost ezdovogo poyasa [The effect of the height of the crane secondary truss on the pliability of the riding belt]. Privolzhskiy nauchny zhurnal. 2023. No. 1. Pp. 28–34. (rus)

15. Tushina O.A. Finite element analysis of crane secondary truss. Magazine of Civil Engineering. 2018. No. 1(77). Pp. 68–89. DOI: 10.18720/MCE.77.7.

16. Tushina O.A., Tushina O.A., Takki V.F., Egorov I.F. Opyt zameny nizhnego poyasa nakhodyashcheyasya pod nagruzkoy podkranovo-podstropil'noy fermy [Experience of replacing the lower belt of a crane-sub-truss under load]. Industrial and Civil Engineering. 2023. No. 4. Pp. 21–28. DOI:10.33622/0869-7019.2023.04.21-28.

17. Eremin K.I. Predotvrashcheniye razrusheniy stroitelnykh metallicheskih konstruktiv [Prevention of destruction of building metal structures]. Magnitogorsk, 2004. 235 p. (rus)

18. Eremin K.I., Shulga S.N. Modelirovaniye razvitiya ustalostnykh povrezhdeniy v podkranovo-podstropil'nykh fermakh [Simulation of fatigue damages in crane secondary truss]. Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering. 2014. No. 2. Pp. 30–38. (rus)

*Information about the authors*

**Markina, Yuliya D.** Senior lecturer, postgraduate student of the chair of theory of structures and technical mechanics. E-mail: poluektoff@bk.ru. Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, Russia, 603950, Nizhny Novgorod, Il'inskaya str., 65.

---

*Received 26.09.2023*

**Для цитирования:**

Маркина Ю.Д. Кручение нижнего пояса подкраново-подстропильной фермы // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. №11. С. 27–36. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-11-27-36

**For citation:**

Markina Yu.D. Torsion of lower belt of crane secondary truss. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2023. No. 11. Pp. 27–36. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-11-27-36