

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства»
(ПГУАС)

ПОДБОР ПОДКРАНОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПОВЫШЕННОЙ ВЫНОСЛИВОСТИ

Методические указания
для самостоятельной работы

Под общей редакцией доктора технических наук,
профессора Ю.П. Скачкова

Пенза 2013

УДК 624.014.27

ББК 38.54

П44

*Методические указания подготовлены в рамках проекта
«ПГУАС – региональный центр повышения качества подготовки
высококвалифицированных кадров для строительной отрасли»
(конкурс Министерства образования и науки Российской Федерации –
«Кадры для регионов»)*

Рекомендовано Редсоветом университета

Рецензенты: заместитель директора ЗАО «Техстрой»
(г. Казань) Е.А. Николаев;
кандидат технических наук, доцент,
декан Технологического факультета
Р.В. Тарасов (ПГУАС)

**П44 Подбор подкрановых конструкций повышенной выно-
сливости:** метод. указания для самостоятельной работы / А.А. Кузь-
мишкин, В.В. Фадеев, Б.В. Волков; под общ. ред. д-ра техн. наук, проф.
Ю.П. Скачкова. – Пенза: ПГУАС, 2013. – 44 с.

Представлены исследования по разработке и подбору металлических подкрановых балок и рельсобалочных конструкций повышенной выносливости, в которых рельс работает в составе сечения конструкции.

Направлены на формирование способности к самостоятельному обучению новым методам исследования, к изменению научного и научно-производственного профиля своей профессиональной деятельности, на развитие способности проводить научные эксперименты и оценивать результаты исследований.

Подготовлены на кафедре «Строительные конструкции» и базовой кафедре ПГУАС при ООО «Доступное жилье» и предназначены для самостоятельной работы по образовательной программе (переподготовки) «Промышленное и гражданское строительство».

© Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства, 2013

© Кузьмишкин А.А., Фадеев В.В.,
Волков Б.В., 2013

ПРЕДИСЛОВИЕ

Мостовые краны появились во второй половине XIX в. с появлением электродвигателей постоянного тока (≈ 1870 г.). С появлением трехфазных электродвигателей (1890 г.) мостовые краны стали широко применяться, и быстро увеличилась их грузоподъемность.

От конструктивной формы балки в значительной степени зависят ее долговечность, надежность, простота изготовления и удобство обслуживания.

Созданием новых конструктивных форм подкрановых конструкций и рельсов занимались А.С. Довженко, Е.И. Беленя, И.И. Ведяков, Н.С. Стрелецкий, В.А. Горпинченко, К.К. Нежданов, А.И. Кикин, А.Ф. Сабуров, И.В. Попченков и другие исследователи. Проблемой обеспечения совместной работы подкрановой балки и рельса занимался К.К. Нежданов. Им получен ряд конструкций, называемых рельсобалочными. За счет включения рельса в работу сечения подкрановой балки резко возрастает изгибная и крутильная жесткость конструкции в целом.

Придание конструкции замкнутого контура дает максимальное увеличение крутильной жесткости. Замена существующих конструкций на трубчатый профиль обеспечивает повышение момента инерции ее при кручении в 200 и более раз. Устойчивость цилиндрической поверхности также во много раз выше, чем пластины.

Продолжены исследования по разработке рельсобалочных конструкций высокой выносливости, в которых рельс работает в составе сечения конструкции. Монография состоит из четырех глав.

В первой главе рассмотрена эллиптическая в сечении подкрановая конструкция, обладающая амортизирующими свойствами и большими моментами инерции при изгибе и кручении. Разработан сортамент эффективных эллиптических профилей. Во второй главе предложены подкраново-подстропильные конструкции, предназначенные для модернизации существующих подкраново-подстропильных ферм и методика расчета новой подкраново-подстропильной конструкции овального сечения. Третья глава посвящена усталостным испытаниям рельсобалочной конструкции. В четвертой главе рассмотрены пути повышения технологичности и восстановления работоспособности подкрановых конструкций, а в пятой главе предложены узлы соединения рельса с подкрановой конструкцией, позволяющие повысить работоспособности и улучшить ремонтно-пригодность.

ВВЕДЕНИЕ

Рост экономики и ужесточение требований по безопасности производственного процесса, а также надежности и экономичности конструкций каркаса неразрывно связано с техническим перевооружением действующих промышленных предприятий.

Разрушения в подкрановых балках возникают от усталости. Усталостное разрушение происходит вследствие накопления числа дислокаций при каждом цикле загрузки и концентрации их около стыков зерен с последующим скоплением в большие группы, что способствует разрыхлению металла в этом месте и, наконец, образованию трещины усталости, которая, развиваясь, приводит к разрыву. При каждом цикле длина трещины в поврежденном месте увеличивается.

Систематические исследования этой проблем приводились: на кафедре металлических конструкций и испытательной станцией МИСИ им. В.В. Куйбышева под руководством Н.С. Стрелецкого и Е.И. Белени, в ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко под руководством В.А. Балдина, в ЦНИИ Проектсталь-конструкция и в других организациях.

Повысить выносливость конструкции можно рядом основных мероприятий:

1) уменьшение локальных напряжений возникающих при прохождении колес крана, амортизацией;

2) в конструкциях со значительной концентрацией напряжений:

– сглаживанием силового потока, переходя от конструкций с резкой концентрацией напряжений к конструкциям с более мягкой концентрацией;

– снижением концентрации напряжений обработкой, например зачисткой поверхности сварного шва в стыковом соединении абразивным кругом или фрезой; отводом силового потока от места острой концентрации; предварительной обработкой сварного шва конструкции, например обкаткой швов роликами, или переходом к другим видам соединения;

– созданием благоприятных внутренних напряжений, например, локальным нагревом около мест концентрации напряжений с целью создания напряжений сжатия в местах концентрации;

– созданием остаточных напряжений сжатия и на поверхности конструкции, например за счет дробеструйной обработкой;

3) в конструкциях, где нет сильной концентрации напряжений или она мала, возможен переход от малоуглеродистых сталей и к легированным сталям, например марганцем.

1. ПОВЫШЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ И РАБОТОСЛОСОБОСТИ ПОДКРАНОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Подкрановые конструкции входят в состав стального каркаса производственного здания и обеспечивают нормальную эксплуатацию мостовых кранов. В отличие от обычных балочных конструкций они эксплуатируются в тяжелых условиях. Подкрановые балки непосредственно воспринимают подвижные силы от колес мостовых кранов, которые носят резко локальный и динамический характер. Крутящие моменты от внецентренного приложения вертикальных и поперечных сил приводят к появлению в стенке переменного напряженного состояния при высоком уровне напряжений.

Включением в работу балки кранового рельса достигается значительная экономия стали. Новые конструктивные формы балок позволяют также продлить их работоспособное состояние.

1.1. Рельсобалочная конструкция с двумя арочными трехглавыми рельсами

Очевидно, что замкнутые трубчатые профили гораздо более эффективны по сравнению с открытыми профилями. Большой эффект виден при работе конструкции на кручение. Момент инерции на кручение у конструкций с замкнутым профилем во много раз превосходит у аналогичных с открытым профилем, материалоемкость новых конструкций составляет 15–20 %. Поэтому далее рассмотрена рельсобалочная конструкция, выполненная в виде замкнутого трубчатого профиля.

В настоящее время при расчете подкрановых конструкций отдельно рассчитывают рельс и подкрановую балку из-за того, что невозможно исключить сдвиги рельса по отношению к балке, хотя упругим это крепление назвать нельзя.

Предлагаемый рельс и подкрановая балка представляют собой соединение исключаяющее сдвиги, и объединяющее рельс и подкрановую балку в единое целое, что дает значительное увеличение момента сопротивления W_x , а, следовательно, и экономию материала!

Известна низкая долговечность и ремонтпригодность традиционных подкрановых балок [1, с. 149]. Усталостные разрушения в них концентрируются в подрельсовой зоне подверженной динамическим подвижным сосредоточенным силам, передаваемым от колес кранов.

Произведем сравнение предлагаемой конструкции с традиционным решением [1, с. 221, рис. 4.23].

Основой разработанной рельсобалочной конструкции являются два арочных трехглавых полых в сечении рельсов [2], размещенных центральными главами вверх и вниз, причем их пяты соединены друг с другом без сдвигов шпильками с гарантированным натягом посредством симметричных швеллеров, ориентированных полками и выпуклой стенкой наружу, при этом в стыке между пятами рельсов и полками швеллеров размещены листовые затяжки, воспринимающие распор. В целом рельсы и швеллеры образуют замкнутый пространственный контур, разделенный листовыми затяжками на три отсека.

При износе верхнего рельса конструкция переворачивается нижним рельсом вверх и интенсивная эксплуатация продолжается.

Конструкция в целом представляет трубчатое сечение, очерченное по параболе или эллипсу, причем больший диаметр ориентирован вертикально, а меньший – горизонтально. Эффективные арочные полые рельсы, выполненные из износостойкой рельсовой стали, размещены сверху и снизу сечения, то есть в наиболее напряженных зонах при изгибе в вертикальной плоскости всего сечения и одновременно выполняют функции поясов, образуя двухстенчатую балку. Соединения выполнены шпильками с гарантированным натягом, исключающим сдвиги (рис. 1.1).

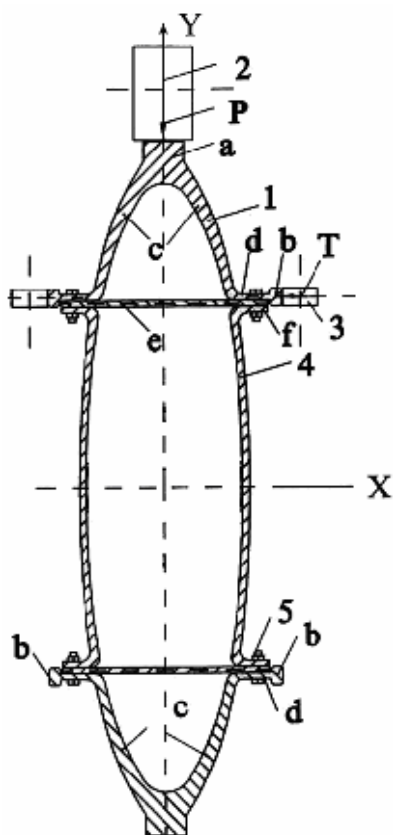


Рис. 1.1. Рельсобалочная конструкция:
 1 – арочный рельс;
 2 – основное колесо крана;
 3 – направляющие ролики крана;
 4 – стенка; 5 – фрикционные шпильки; кольцевой элемент

Локальные воздействия вертикальные P и горизонтальные T воспринимаются соответствующими главами рельса и равномерно распределяются им на все сечение. Локальные напряжения, возникающие в соединениях, малы по величине и не могут вызвать появление усталостных трещин. Ремонт конструкции выполняется простым переворачиванием ее нижним рельсом вверх.

Рельсобалочная конструкция состоит из трехглавых арочных в сечении полых рельсов 1 верхнего и нижнего.

Каждый из рельсов имеет центральную главу «а», воспринимающую вертикальную силу P от основного колеса 2 крана и две боковые главы «b», воспринимающие горизонтальные силы T от направляющих роликов 3 крана. Центральная глава «а» размещена в замке арки «с». Ветви арки опираются на пяты «d» и соединены затяжкой «е» из листа по всей длине рельса 1, образуя замкнутое сечение, отлично работающее на кручение.

Пяты «d» верхнего и нижнего рельсов 1 соединены друг с другом посредством швеллеров 4 с выпуклой стенкой, причем полки «f» швеллеров 4 и выпуклость стенки ориентированы наружу. Пяты «d» рельсов 1 и полки «f» швеллеров 4 соединены шпильками 5. Выпуклые стенки швеллеров 4 соединены друг с другом кольцевыми элементами 6 на опорах балок и в их пролетах.

Овальные отверстия в пятах рельсов и в тормозной балке прошиваются при прокатке с определенным шагом и ориентированы вдоль. Кривизна поверхностям стенок придается на листогибочном или вальцовочном станке и значительно повышает устойчивость ее. Вся конструкция соединена в единое целое посредством, например, полых заклепок с сердечником.

Вертикальная сила P передается по вертикальной оси симметрии. Горизонтальная сила T от направляющих роликов крана – на одну из глав «b» тормозной балки «е». Конструкция в целом представляет собой замкнутый трубчатый контур параболического очертания. Концентрация напряжений в узлах и сопряжений минимальна, то есть около единицы. Конструкция снабжена амортизирующими свойствами за счет кривизны поверхности, поэтому все динамические воздействия сглаживаются. Тормозная балка «е» является одновременно затяжкой воспринимающей распор от арочного рельса 1.

Ожидается резкое повышение долговечности, так как динамическая составляющая напряжений должны опускаться ниже предела выносливости, и появление усталостных трещин в рельсоподкрановой конструкции не должно появиться. Локальные напряжения в стенке, возникающие при кручении, близки к нулю, а локальные напряжения при центральном сжатии уменьшены в несколько раз. То есть, созданы условия благоприятной

работа конструкции в зоне так называемой “неограниченной долговечности”.

Увеличена ее ремонтпригодность минимум в два раза, так как после износа верхнего рельса конструкция переворачивается нижним рельсом вверх и интенсивная эксплуатация продолжается.

1.1.1. Особенности методики расчета рельсобалочной конструкции

Требуемый момент сопротивления трубчатого сечения определяем следующим образом:

$$W_x = \frac{M}{R_y}. \quad (1.1)$$

Двойную толщину стенки назначаем из условия прочности ее на срез.

Необходимая площадь сечения рельсобалочной конструкции находим из оптимального распределения металла по сечению.

$$A = \sqrt{6 \cdot W_x \cdot t_{ст}}. \quad (1.2)$$

Площадь сечения двух стенок

$$2 \cdot A_{ст} = h_{ст} \cdot 2 \cdot h_{ст}. \quad (1.3)$$

Момент инерции рельсобалочной конструкции

$$J_x = 2 \cdot J_{xp} + 2 \cdot A_p \cdot \left(\frac{H - h_p}{2} \right)^2 + \frac{2 \cdot t_{ст} \cdot h_{ст}^3}{12} + 2 \cdot A_3 \cdot \left(\frac{h_{ст}}{2} \right)^2, \quad (1.4)$$

где J_{xp} – собственный момент инерции рельса; A_p – его площадь сечения; h_p – его высота; $t_{ст}$ – толщина одной стенки; $h_{ст}$ – высота стенки; A_3 – площадь сечения одной затяжки; H – высота сечения рельсобалочной конструкции.

Тогда момент сопротивления

$$W_x = \frac{2 \cdot J_x}{H}. \quad (1.5)$$

Определим оптимальную высоту сечения стенки балки $h_{ст}$ при которой момент сопротивления W_x достигнет максимума. Для этого выразим площадь сечения двух затяжек

$$2 \cdot A_3 = A - 2 \cdot A_p - 2 \cdot A_{ст}, \quad (1.6)$$

где A – площадь всего сечения рельсобалочной конструкции.

После подстановки получим

$$W_x = \frac{1}{H} \left[4 \cdot J_{xp} + A_p \cdot (h_{ct} + h_p)^2 + h_{ct}^2 \cdot \left(A_3 + \frac{t_{ct} \cdot h_{ct}}{3} \right) \right]. \quad (1.7)$$

$$J_x = \frac{W_x \cdot H}{2}.$$

Из (1.7) получим из кубического уравнения требуемую высоту стенки балки

$$\begin{aligned} h_{ct}^3 + \frac{3}{t_{ct}} \cdot (A_p + A_3) \cdot h_{ct}^2 + \frac{3}{t_{ct}} \cdot (2 \cdot A_p \cdot h_p - W_x) \cdot h_{ct} + \\ + \frac{3}{t_{ct}} \cdot [h_p (A_p \cdot h_p - 2 \cdot W_x) + 4 \cdot J_p] = 0. \end{aligned} \quad (1.8)$$

Примем $\min A_3 = t_3 \cdot (B_{\max} - b_{нг})$.

Решив кубическое уравнение, получим h_{ct} .

Высота всей балки

$$H = h_{ct} + 2 \cdot h_p. \quad (1.9)$$

Площадь ее стенки

$$A_{ct} = 2 \cdot h_{ct} \cdot t_{ct}. \quad (1.10)$$

Подставив в (1.7) выполним проверку W_x .

Необходимо отметить, что данный момент сопротивления, найденный по формуле (1.7) должен быть равен моменту сопротивления – по формуле (1.1). По достижению этого равенства делаем вывод о том, что высота стенки h_{ct} и всего сечения H определена правильно.

Площадь сечения стенки

$$A_{ct} = 2 \cdot t_{ct} \cdot h_{ct}. \quad (1.11)$$

Площадь сечения рельсобалочной конструкции

$$A = 2 \cdot A_p + 2 \cdot A_3 + A_{ct}. \quad (1.12)$$

Высота сечения рельсобалочной конструкции

$$H = h_{ct} + 2 \cdot h_p. \quad (1.13)$$

Проверка прочности при изгибе в вертикальной плоскости

$$\sigma = \frac{M}{W_x}. \quad (1.14)$$

Делается вывод о прочности.

Сравнение материалоемкости обычной балки [1] и рельсобалочной конструкции по площади сечения приведено в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Сравнение материалоемкости

Наименование элемента	Прототип, см ²	Рельсобалочная конструкция, см ²
	КР80	ПКР100
Рельс	81,8	2 · 112,91 = 225,82
Затяжка	–	2 · 17,52 = 35,04
Верхний пояс	132	–
Стенка	217,84	1,6 · 119,1 = 190,56
Нижний пояс	101,2	–
Всего (всего в %)	532,84 (100 %)	451,42 (84,72 %)

Главный момент инерции относительно оси y

$$J_y = 2 \cdot J_{yp} + 2 \cdot A_{ст} \cdot \left(\frac{b}{2}\right)^2 + \frac{2 \cdot t_3 \cdot b_3^3}{12}; \quad (1.15)$$

$$W_y = \frac{2 \cdot J_y}{B_{\max}}, \quad (1.16)$$

где B_{\max} – максимальная ширина рельсобалочной конструкции.

Проверяются напряжения при изгибе в горизонтальной плоскости от сил T изгибающий момент без изменения.

$$\sigma = \frac{M_m}{W_y}. \quad (1.17)$$

Делается вывод о прочности.

При нахождении момента инерции на кручение рельсобалочной конструкции трубчатое сечение заменим эллипсом с такими же габаритами сечения.

$$\alpha = \frac{a_1}{a}; \quad n = \frac{a}{b}; \quad (1.18)$$

$$J_{кр} = \frac{\pi \cdot n^3 \cdot b_{эл}^2}{n^2 + 1} (1 - \alpha^4). \quad (1.19)$$

Момент сопротивления при кручении

$$W_{кр} = \frac{\pi \cdot n \cdot b_{эл}^3}{2} (1 - \alpha^4). \quad (1.20)$$

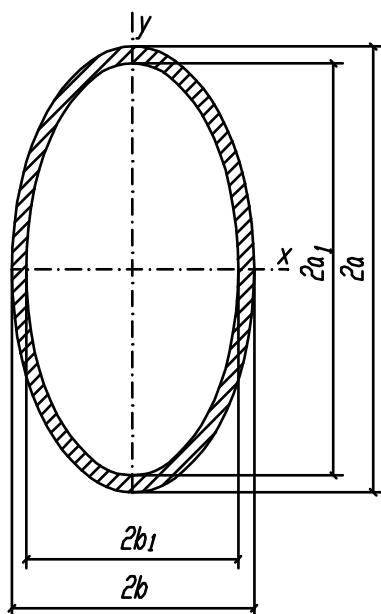


Рис. 1.2. Приведенное сечение рельсобалочной конструкции

Крутящий момент

$$M_{кр} = \frac{T \cdot (H - h_p)}{2}. \quad (1.21)$$

Проверка величины касательных напряжений при кручении

$$\tau = \frac{M_{кр}}{W_{кр}}. \quad (1.22)$$

Делается вывод о прочности подкрановой балки при действии крутящего момента.

Примечание: точки с максимальными напряжениями при изгибе в вертикальной и горизонтальной плоскости не совпадают, поэтому проверка на косоу изгиб обеспечена.

1.2. Сортамент эффективных эллиптических профилей

Деформируя любой трубчатый профиль в эллиптическое сечение, мы можем значительно повысить прочность трубы на изгиб.

Эллиптический трубчатый профиль может быть получен непосредственно при прокате трубы, установкой клетки для дополнительного обжатия готовой трубы и получения эллиптического профиля.

Покажем, при каком соотношении внешних габаритов профиля момент сопротивления W_x достигнет максимума.

Введём следующие обозначения:

A – площадь поперечного сечения трубы;

t – толщина стенки трубы;

a, b – расстояния от центра тяжести эллиптического профиля до середины толщины стенки;

$2a + t$ – внешний габарит эллиптического профиля по оси X .

Введем коэффициент $n = \frac{a}{b}$, тогда $b = \frac{a}{n}$.

В соответствии с введенным коэффициентом минимальный габарит эллиптического профиля:

$\frac{2a}{n} + t$ – внешний габарит эллиптического профиля по оси Y .

Аналогичным образом записываем размеры полости:

$2a - t$ – максимальный габарит полости;

$\frac{2a}{n} - t$ – минимальный габарит полости.

Считаем, что площадь поперечного сечения A и толщина стенки t величины постоянные (рис. 1.3).

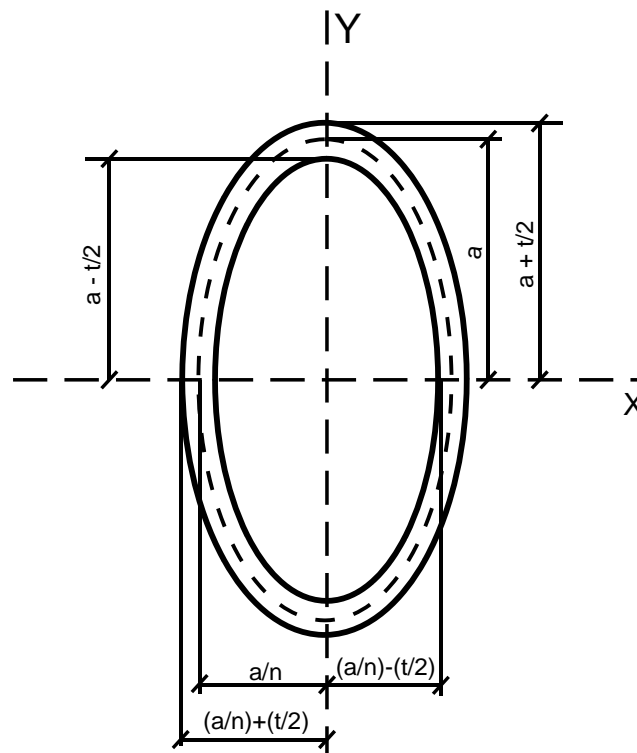


Рис. 1.3. Эллиптический трубчатый профиль

Площадь поперечного сечения эллипса:

$$A = \pi \cdot t \cdot \left[\left(a + \frac{t}{2} \right) \cdot \left(\frac{a}{n} + \frac{t}{2} \right) - \left(a - \frac{t}{2} \right) \cdot \left(\frac{a}{n} - \frac{t}{2} \right) \right], \quad (1.23)$$

тогда $A = \pi \cdot a \cdot t \cdot \left(1 + \frac{1}{n} \right).$ (1.24)

Момент инерции относительно оси X :

$$I_x = \frac{\pi \cdot a \cdot t}{4} \cdot \left[\frac{1}{n} \cdot \left(3 \cdot a^2 + \frac{t^2}{4} \right) + a^2 + \frac{3}{4} \cdot t^2 \right]. \quad (1.25)$$

Момент сопротивления по средней линии относительно оси X :

$$W_x = \frac{J_x}{a}, \quad (1.26)$$

$$W_x = \frac{\pi \cdot t}{4} \cdot \left[\frac{1}{n} \cdot \left(3 \cdot a^2 + \frac{t^2}{4} \right) + a^2 + \frac{3}{4} \cdot t^2 \right]; \quad (1.27)$$

$$\frac{d}{dn} \left(\frac{1}{n} + 1 \right)^2 = -\frac{2}{n^2} \left(\frac{1}{n} + 1 \right); \quad (1.28)$$

$$\frac{dW_x}{dn} = \frac{\pi \cdot t}{4} \cdot \left[\left(\frac{A}{\pi \cdot t} \right)^2 \cdot \left(-\frac{3}{n^2} \right) \cdot \left(\frac{1}{n} + 1 \right)^2 + \frac{2}{n^2} \left(\frac{1}{n} + 1 \right) \cdot \left(\frac{3}{n} + 1 \right) \right]. \quad (1.29)$$

Получим уравнение третьей степени, показывающее при каком значении n момент сопротивления W_x достигает максимальной величины

$$\frac{1}{n^3} + \frac{3}{n^2} + \frac{3}{n} \cdot \left[1 - \left(\frac{2 \cdot A}{\pi \cdot t^2} \right)^2 \right] + 1 + \left(\frac{2 \cdot A}{\pi \cdot t^2} \right)^2 = 0. \quad (1.30)$$

Например, для трубы диаметром 1020 мм

$$\begin{aligned} A &= 100 \pi \text{ см}^2; t = 1 \text{ см}; \\ \frac{1}{n^3} + \frac{3}{n^2} - \frac{119997}{n} + 40001 &= 0; \\ \frac{1}{n} &= 0,33336; n = 2,99976. \end{aligned}$$

Для тонкостенных профилей получаем максимум момента сопротивления W_x при n стремящемся к трем.

Подставив $n = 3$, получим формулы $a = \frac{3}{4} \cdot \frac{A}{\pi \cdot t}$, $b = \frac{a}{3}$.

Момент инерции относительно оси X :

$$J_x = \frac{36A}{16} \left(2a^2 + \frac{5}{6}t^2 \right).$$

Момент сопротивления относительно оси X :

$$W_x = \frac{J_x}{a + t/2}.$$

Момент инерции относительно оси Y :

$$J_y = \frac{\pi}{4} \cdot \left[a \cdot \left(\frac{a}{n} \right)^3 - \left(a - \frac{t}{2} \right) \cdot \left(\frac{a}{n} - \frac{t}{2} \right)^3 \right].$$

Момент сопротивления относительно оси Y :

$$W_y = \frac{J_y}{\frac{a}{n} + \frac{t}{2}}.$$

Статический момент полусечения:

$$S_{1/2\text{сеч}} = \frac{t}{36} \cdot (40 \cdot a^2 + 3 \cdot t^2).$$

Момент инерции при кручении и радиусы инерции эллиптического трубчатого профиля записываем в соответствии со справочником по сопротивлению материалов.

По полученным математическим зависимостям составлен сортамент эллиптических трубчатых профилей (прил. 5).

Особенность этих профилей – отсутствие концентраторов напряжений и амортизирующая способность профиля за счет своей формы сечения.

2. ПОДКРАНОВЫЕ КОНСТРУКЦИИ ДЛЯ ПРОЛЕТОВ 30–36 М

2.1. Методика расчета подкраново-подстропильной конструкции овальной в сечении

Оптимальные параметры и характеристики конструкции находим следующим образом. Задаваясь отношением высоты к ширине эллипса. $K = 3$, толщиной стенки эллипса $t_{\text{ст}}$, и характеристиками арочного рельса, находим из кубического уравнения половину высоты эллипса a .

$$a^3 - \left(\frac{7}{3} t_{\text{ст}} - \frac{4A_{\text{рел}}}{\pi t_{\text{ст}}} \right) a^2 + \left[\frac{5}{3} t_{\text{ст}}^2 + \frac{8A_{\text{рел}}}{\pi t_{\text{ст}}} \left(t_{\text{п}} + t_{\text{г}} - \frac{h_{\text{р}}}{2} \right) - \frac{2W_x}{\pi t_{\text{ст}}} \right] a + \frac{1}{\pi t_{\text{ст}}} \left[4J_{\text{рел}} + 4A_{\text{рел}} \left(t_{\text{п}} + t_{\text{г}} - \frac{h_{\text{р}}}{2} \right)^2 - 2W_x (t_{\text{п}} + t_{\text{г}}) - \frac{t_{\text{ст}}^3}{2} \right] = 0, \quad (2.1)$$

где a – половина высоты эллипса, $t_{\text{ст}}$ – толщина стенки эллипса, $A_{\text{рел}}$ – площадь сечения рельса, $t_{\text{п}}$ – толщина подошвы рельса, $t_{\text{г}}$ – толщина главной главы рельса, $h_{\text{р}}$ – высота рельса, W_x – момент сопротивления рельса.

Находим высоту сечения рельсобалочной конструкции:

$$H = 2(a + t_{\text{п}} + t_{\text{г}}). \quad (2.2)$$

Ширина конструкции:

$$b = H/K. \quad (2.3)$$

Площадь эллипса будет равна:

$$A_0 = \pi[ab - (a - t_{ст})(b - t_{ст})], \quad (2.4)$$

где b – половина ширины эллипса.

Диаметр соответствующей трубы:

$$D = \frac{A_0}{\pi t_{ст}} - t_{ст}. \quad (2.5)$$

Суммарная площадь сечения балки:

$$A = A_0 + 2A_{рел}. \quad (2.6)$$

Момент инерции эллипса при изгибе:

$$J_{x_0} = \frac{\pi}{4}(a^3b - a_1^3b_1). \quad (2.7)$$

Главный момент инерции подкрановой балки:

$$J_x = J_{x_0} + 2J_{рел} + 2A_{рел} \left(a + t_{п} + t_{г} - \frac{h_{рел}}{2} \right)^2. \quad (2.8)$$

Моменты сопротивления:

$$W_{xв} = W_{xн} = \frac{2J_x}{H}. \quad (2.9)$$

Проверяем напряжения в вертикальной плоскости:

$$\sigma = \frac{M}{W_x} \leq R_y \gamma_c. \quad (2.10)$$

Расчетами выявлена эффективность балок данной конструкции по сравнению с балками двутаврового сечения. Увеличился момент инерции кручения более чем в 500 раз. Повышение долговечности достигнуто рациональной формой конструкции, в которой эффективные коэффициенты концентрации напряжений близки к 1, а удары смягчены амортизацией.

2.2. Подкраново-подстропильная балка с нижним поясом из симметричной пары рельсобалочных конструкций

Разработано конструктивное решение подкраново-подстропильной конструкции [3, 4].

Подкраново-подстропильная балка содержит верхний и нижний пояса из труб. Нижний пояс ее выполнен из пары рельсобалочных конструкций, каждая из которых содержит эллиптического профиля подкрановую балку

с отношением большего диаметра к меньшему диаметру равному трём, ориентированную большим диаметром вертикально.

Сверху и снизу на подкрановой балке закреплены без проскальзывания трёхглавые арочные рельсы. При этом верхний пояс и пара рельсобалочных конструкций нижнего пояса подкраново-подстропильной балки соединены друг с другом парой непрерывных стенок-подвесок из профильных листов. Пара стенок-подвесок симметрична относительно вертикальной оси Y .

Верхний продольный край каждой из упомянутых стенок-подвесок копирует поверхность трубы верхнего пояса и соединен с ним посредством болтов, нижний профильный край каждой стенки-подвески копирует поверхность рельсобалочной конструкции нижнего пояса подкраново-подстропильной балки и соединён с ней посредством заклёпок-втулок с внутренним сердечником в каждой.

Стенки-подвески соединены друг с другом и с каждой из пары рельсобалочных конструкций нижнего пояса подкраново-подстропильной балки в зоне на 100–150 мм ниже верхнего трёхглавого арочного профиля рельса, а все ее сечение сбалансировано относительно горизонтальной оси X .

Сопоставление новой подкраново-подстропильной балки с подкраново-подстропильной фермой показывает следующие существенные отличия, а именно:

- решётчатая конструкция заменена балочной в несколько раз более надёжной;

- исключены сварные соединения, всегда имеющие скрытые дефекты [5, с. 23, п. 1.57] и при действии подвижных воздействий способствующие возникновению усталостных трещин, так как эффективные коэффициенты концентрации напряжений у сварных соединений в 4–5 раз выше, чем у болтовых соединений [6, с. 136, табл. 1.5.1];

- подкраново-подстропильные конструкция имеет амортизирующие свойства за счёт трубчатого профиля и арочного профиля рельсов;

- все соединения быстроразъёмные, поэтому достигнута высокая ремонтпригодность и заменяемость повреждённых элементов.

На рис. 2.1 показана подкраново-подстропильная балка, а ее сечение – на рис. 2.2. Подкраново-подстропильная конструкция содержит верхний пояс 1 из трубы, пару симметричных относительно вертикальной оси Y стенок-подвесок 2, выполненных из x листов, с рёбрами 3.

Верхний продольный край каждой из упомянутых стенок-подвесок копирует поверхность трубы верхнего пояса 1 и соединён с ним посредством фрикционных болтов 4, затянутых пневмогайковертом с гарантированным натягом. Нижний продольный край каждой стенки-подвески копирует поверхность эллиптической трубы a рельсобалочной конструкции 5 и соединён с ней без проскальзывания посредством заклёпок 6 с

внедренным в каждую сердечником [7, 8]. Внедрение заклёпок 6 в соединяемые элементы и сердечников осуществляется, автоматизировано пиротехнической установкой с использованием энергии выстрела.

Каждая из рельсобалочных конструкций 5 содержит эллиптическую трубу *a*, снабжена трёхглавыми рельсами *b* арочного профиля сверху и копирующими своей подошвой поверхность эллиптической трубы *a*. Эллиптическая труба *a* выполнена с отношением диаметров равному трём. В этом случае момент сопротивления эллиптической трубы достигает своего максимума, и она имеет момент сопротивления при изгибе W_x примерно такой же, как у двутаврового профиля.

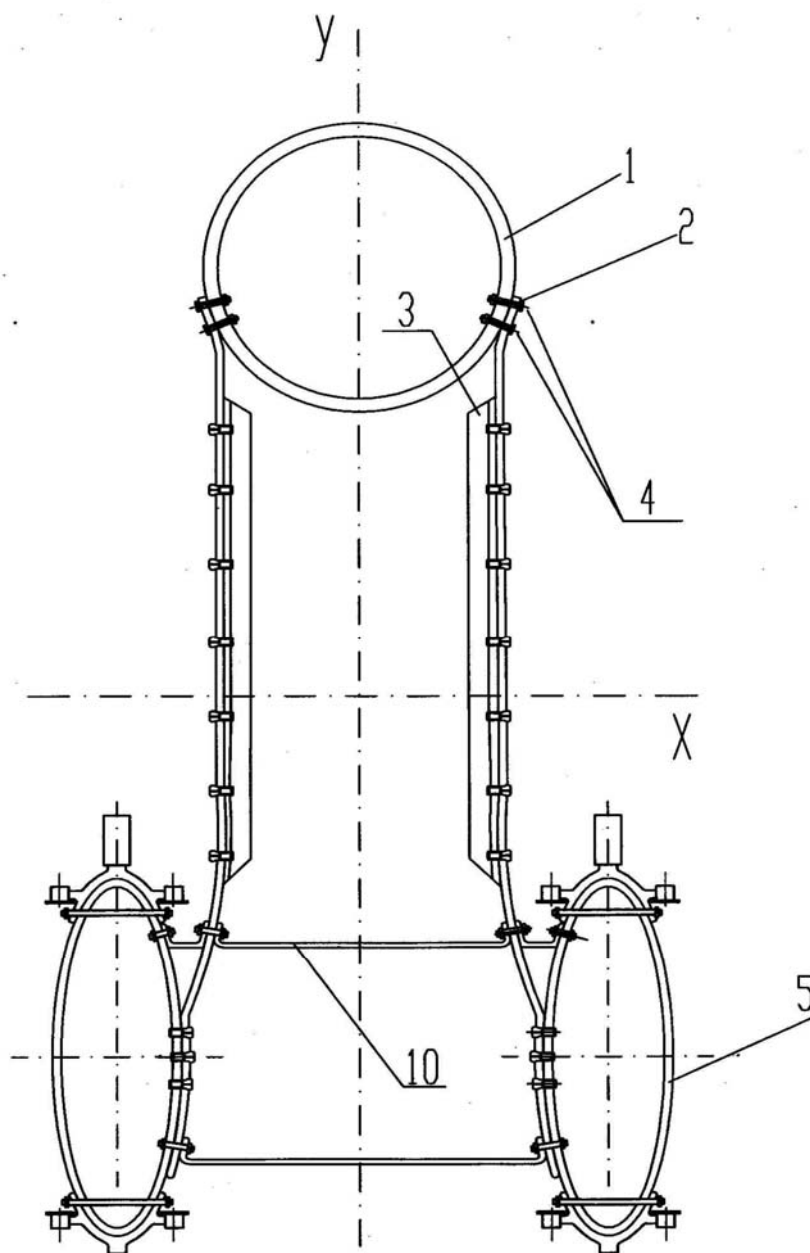


Рис. 2.1. Общий вид подкраново-подстропильной конструкции

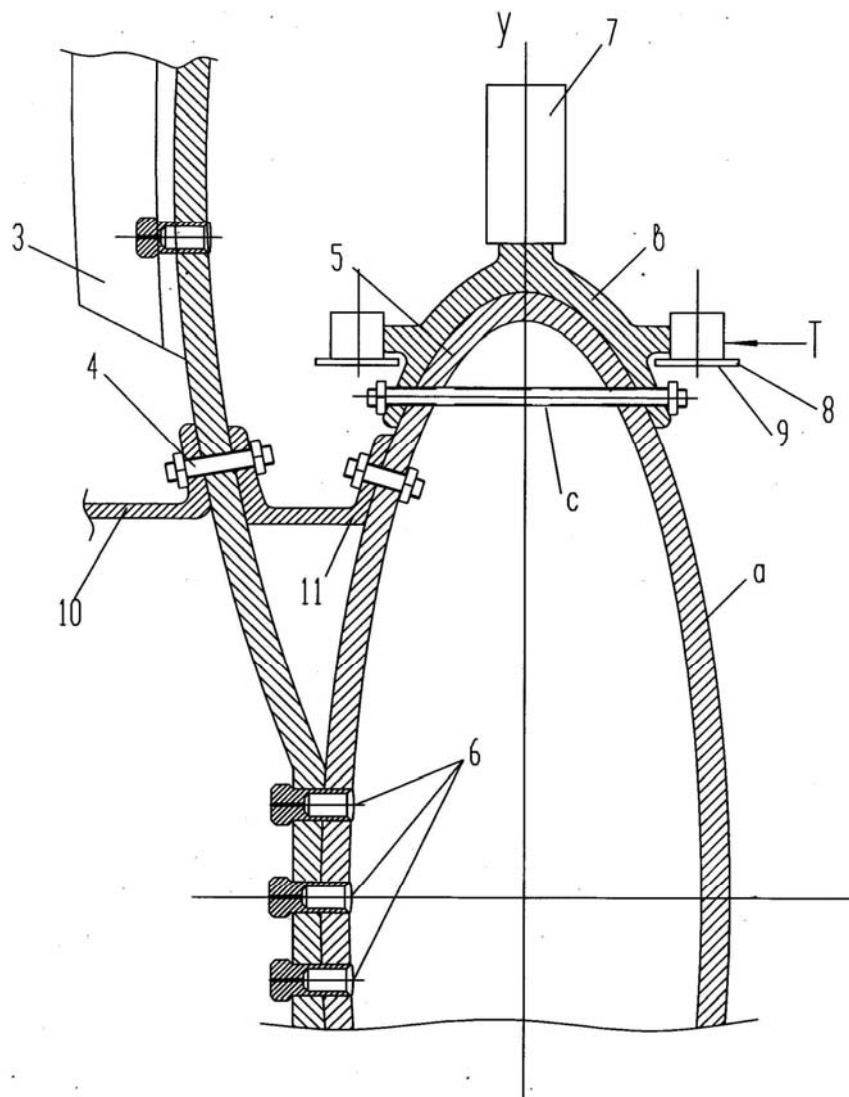


Рис. 2.2. Сечение подкраново-подстропильной конструкции

Верхний трёхглавый рельс b воспринимает вертикальные воздействия P от основного колеса 7 мостового крана, а горизонтальный распор воспринимает шпилька-затяжка c .

Одна из боковых глав трёхглавого арочного рельса b воспринимает воздействия T от направляющих роликов 8 крана. Направляющие ролики 8 крана имеют гребни 9 исключаящие сход крана с рельсов. Трёхглавые арочные рельсы b соединены с эллиптической трубой 5 посредством шпилька-затяжек c .

При нахождении основного колеса крана 6 над шпилькой-затяжкой c усилие в ней возрастает, и трение между контактирующими поверхностями также возрастает.

Нижний трёхглавый арочный рельс необходим для увеличения прочности нижнего пояса подкраново-подстропильной балки. Нижний пояс состоит из пары эллиптических труб, упрочненных в наиболее напря-

жённых зонах трёхглавыми рельсами b и симметричных относительно вертикальной оси y .

Упомянутая рельсобалочная конструкция при необходимости может быть отсоединена от стенок-подвесок 2 и перевернута на 180° . Этим повышена ремонтпригодность её. Стенки-подвески 2 соединены друг с другом посредством швеллерных профилей 9. С эллиптическим профилем 5 стенки-подвески 2 также соединены посредством швеллерных профилей 11 и фрикционных болтов 4.

Таким образом, все сечение подкраново-подстропильной конструкции состоит из пяти трубчатых отсеков, а именно: верхнего пояса 1; отсека, ограниченного парой стенок-подвесок 2, верхним поясом 1 и швеллерным элементом 10; отсека, ограниченного парой стенок-подвесок 2, швеллерным элементом 10 и нижним швеллерным элементом; двух отсеков, образованных парой эллиптических профилей 5.

Экономический эффект достигнут в результате следующего:

- нижний пояс подкраново-подстропильной конструкции выполнен из пары рельсобалочных конструкций, каждая из которых состоит из эллиптической подкрановой балки и трёхглавых арочных рельсов вверху и внизу;

- работа подкраново-подстропильной конструкции переведена в зону так называемой «неограниченной долговечности» и этим обеспечена надёжная её работа в течение 25-30 лет интенсивной эксплуатации;

- материалоемкость подкраново-подстропильной конструкции снижена по сравнению с подкраново-подстропильной фермой на 20–30 %.

Габариты данной балочной конструкции во многом зависят от габаритов кранов (т.е. от их высоты). Для экономии материала очень важно уменьшать высоту крана, так как оптимальная высота подкраново-подстропильной балки значительно меньше применяемой.

2.3. Повышение выносливости подкрановых конструкций

Надёжная, безотказная работа подкрановых конструкций с интенсивным, тяжелым (8К, 7К) режимом работы кранов в течение 25–30 лет возможна при выполнении следующих конструктивных требований:

- при расчете подкрановых балок и их креплений на выносливость следует учитывать данные табл. 32* [9, с. 37]. Эта таблица показывает неэффективность (отрицательный эффект) от применения для сварных подкрановых балок и их узлов сталей с временным сопротивлением более $R_{mn} > 420$ МПа, то есть для этих конструкций следует применять малоуглеродистую сталь спокойной плавки с $R_{mn} < 420$ МПа;

- при конструировании верхней части подкрановой балки и узлов ее сопряжения с тормозной балкой и колонной следует *применять сое-*

динения с минимальной концентрацией напряжений [9, с. 88, п. 2, 3] такие как: шпильки и болты; полые заклепки с внедренным сердечником в каждую;

– соединения подкрановых балок с колоннами должны выполняться разъемными на шпильках или болтах и обеспечивать возможность рихтовки подкрановых конструкций как по вертикали, так и по горизонтали и замены креплений.

– подкрановые балки смежных пролетов следует объединять в единое коробчатое сечение и этим повышать надежность и снижать материалоемкость на 15–20 %;

– для значительного повышения долговечности и снижения материалоемкости должны применяться специальные крановые рельсы и рельсовые блоки, работающие в составе сечения подкрановой конструкции как единое целое;

– крановые рельсы и рельсовые блоки должны обладать достаточными моментами инерции при изгибе и кручении, так как высота волн касательных напряжений (размах $2\tau_a$) в первую очередь зависит от $J_{x \text{ пер}}$ и $J_{кр \text{ пер}}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработаны стальные подкрановые конструкции, обеспечивающие интенсивную эксплуатацию в течение 25–30 лет. Это достигнуто за счет применения новой формы подкрановой конструкции – трубчатой, обладающей амортизирующими свойствами и большими (по сравнению с двутаврами) моментами сопротивления при изгибе и кручении. Применение эллиптического профиля позволяет убрать верхний поясной сварной шов от места приложения динамических локальных воздействий, возникающих от колес крана и уменьшить концентраторы напряжения в верхней зоне, сводя их к единице.

Конструктивная форма подкрановых балок является основным фактором, влияющим на их выносливость и долговечность. Разработанные аналитические зависимости позволили повысить моменты сопротивления эллиптических трубчатых профилей до своего максимума. На основании полученных зависимостей составлен сортамент эллиптических труб.

Реализована идея совместной работы двух параллельных подкрановых конструкций по средним рядам колонн и доказана эффективность их совместной работы, получены аналитические зависимости для параллельных рельсовых путей, позволяющие значительно повысить долговечность конструкций с одновременным понижением материалоемкости на 20–25 %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Муханов, К.К. Металлические конструкции [Текст]: учеб. для вузов / К.К. Муханов. – М.: Стройиздат, 1978. – 512 с.
2. Туманов, В.А. Система управления выносливостью стальных подкрановых конструкций интенсивной нагруженности [Текст]: дис.... д-ра техн. наук / В.А. Туманов. – Пенза: ПГУАС, 2004.
3. Кузьмишкин, А.А. Подкраново-подстропильные конструкции [Текст] / А.А. Кузьмишкин // Проблемы энергосбережения и экологии в промышленном и жилищно-коммунальном комплексах: сб. тр. IV междунар. науч.-практ. конф. – Пенза: ПДЗ, 2005.
4. Нежданов, К.К. Подкраново-подстропильная балка [Текст]: информационный листок № 344-04 / К.К. Нежданов, В.А. Туманов, А.А. Кузьмишкин. – Пенза: Пензенский ЦНТИ, 2004.
5. Правила производства и приёмки работ. Глава 18. Металлические конструкции [Текст]: СНиП III-18-75. – Часть III. – М., Стройиздат, 1976. – 160 с.
6. Справочник по кранам. Характеристики материалов и нагрузок. Основы расчетов кранов, их приводов и металлических конструкций [Текст]: в 2 т. / В.И. Брауде [и др.], под общ. ред. М.М. Гохберга. – М.: Машиностроение, 1988. – Т. 1. – 536 с.
7. Способ и устройство для неподвижного соединения [Текст]: пат. 2114328 Рос. Федерация / Нежданов К.К., Васильев А.В., Калмыков В.А., Нежданов А.К.; заявитель и патентообладатель ПГАСА, зарег. 27.06.1998, Бюл. № 18.
8. Нежданов, К.К. Долговечные подкрановые конструкции [Текст]: учеб. пособие для вузов / К.К. Нежданов, А.К. Нежданов, В.А. Туманов. – Пенза: ПГАСА, 2000. – 176 с.
9. Стальные конструкции [Текст]: СНиП II-23-81*. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1988. – 96 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

Основные буквенные обозначения величин

I. Геометрические величины

- x, y, z – координаты декартовой системы
 s – координата вдоль оси Os , нормальной к оси Ox и лежащей в срединной плоскости элемента стержня
 α_z – секториальная координата (площадь)
 α_z – координата центра изгиба
 A, A_c, A_n – площади поперечного сечения стержня, стенки, пояса
 $2t, 2h$ – толщина и ширина (высота) полосы
 $2t_c, 2h_c, 2t_n, 2h_n$ – то же, стенки и пояса
 t_p, b_p – толщина и ширина ребра жесткости
 $2l$ – пролет
 S_i, S_ω – центральный (относительно оси i) и секториальный статические моменты
 $S_i^{отс}, S_\omega^{отс}$ – то же, отсеченной части поперечного сечения
 S_i^n, S_i^c – то же, пояса и стенки
 J_i, J_ω – центральный (относительно оси i) и секториальный моменты инерции поперечного сечения
 J_i^n, J_i^c – моменты инерции пояса и стенки относительно оси i
 J_n, J_c – моменты инерции пояса и стенки относительно собственных центральных осей, нормальных к их срединным плоскостям
 J'_n – момент инерции пояса относительно собственной центральной оси, лежащей в срединной плоскости
 J_k – момент инерции при кручении
 $\xi = x/h; \mu = y/h$ – относительные координаты
 $\eta = l/h$ – относительный пролет
 W_x, W_y – моменты сопротивления сечения относительно осей соответственно $x - x, y - y$

II. Силовые факторы и напряжения

- P – сосредоточенная сила, нормальная к оси Ox
 T – сосредоточенная сила, параллельная оси Ox (касательная к стержню)
 $p(x)$ – распределенная нормальная к оси Ox нагрузка (давление)
 $q(x)$ – распределенная касательная нагрузка (давление)
 N, Q_y, Q_z – нормальная и поперечные силы в сечениях стержня
 M_z, M_y, M_x – изгибающие и крутящие моменты в сечениях стержня
 M_ω, B_ω – изгибно-крутящий момент и бимомент
 \bar{M}_x – момент чистого кручения

- $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ – компоненты плоского напряженного состояния
 (σ_s, τ_{xs})
 σ_x^0, τ_{xy}^0 – элементарные напряжения
 $\sigma'_x, \sigma'_y, \tau'_{xy}$ – местные напряжения
 $\sigma_\omega, \tau_\omega$ – секториальные напряжения
 $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ – относительные (безразмерные) напряжения в долях величин $p/2th$ или $q/2t$.
 $\epsilon_x, \epsilon_y, \gamma_{xy}$ – относительные деформации в направлении осей, указанных индексами

III. Физико-механические характеристики

- E – модуль упругости первого рода
 G – модуль сдвига
 ν – коэффициент Пуассона
 R, R^H – расчетное и нормативное сопротивление материала растяжению-сжатию
 R_{cp}, R_{cp}^H – расчетное и нормативное сопротивление материала срезу
 R_v – предел выносливости

Множители и приставки для обозначения десятичных кратных и дольных единиц

Множитель	Приставка	Обозначение приставки	
		русское	международное
10^{18}	экса	Э	E
10^{15}	пета	П	P
10^{12}	тера	Т	T
10^9	гига	Г	G
10^6	мега	М	M
10^3	кило	к	k
10^2	гекто	г	h
10^1	дека	да	da
10^{-1}	деци	д	d
10^{-2}	санتي	с	c
10^{-3}	милли	м	m
10^{-6}	микро	мк	μ
10^{-9}	нано	н	n
10^{-12}	пико	п	p
10^{-15}	фемто	ф	f
10^{-18}	атто	а	a

Расчет рельсобалочной конструкции для среднего ряда колонн под кран тяжелого режима работы грузоподъемностью $Q = 50/10$ т

Для выявления эффективности произведем сравнительный расчет рельсобалочной конструкции, выполненный в соответствии с примером расчета в учебнике профессора К.К. Муханова [1, с. 254] под кран тяжелого режима работы грузоподъемностью $Q = 50/10$ т (прототип). Сосредоточенное воздействие колеса крана (нормативное) $P_n = 5050$ гН. Расчетный изгибающий момент в прототипе $M = 3839000$ гНсм. Поперечная сила $Q = 15340$ гН. Расчетное сопротивление для стали ВСтЗсп5, примем как в примере $R_y = 210$ МПа (хотя в настоящее время $R_y = 230$ МПа).

Тогда в нашем случае, требуемый момент сопротивления трубчатого сечения:

$$W_x = \frac{M}{R_y} = \frac{3839000}{210} = 18281 \text{ см}^3;$$

$$2t_{\text{ст}} = \sqrt[3]{\frac{1,5W_x}{\lambda^2}} = \sqrt[3]{\frac{1,5 \cdot 18281}{90^2}} = 1,5, \text{ при } \lambda = 90.$$

Примем толщину стенки $2t_{\text{ст}} = 1,6$ см (две стенки по 0,8 см).

Необходимая площадь сечения рельсобалочной конструкции

$$A = \sqrt{6 \cdot W_x \cdot t_{\text{ст}}} = \sqrt{6 \cdot 18281 \cdot 1,6} = 419 \text{ см}^2.$$

Площадь сечения двух стенок $2 \cdot A_{\text{ст}} = h_{\text{ст}} \cdot 2 \cdot h_{\text{ст}}$.

Момент инерции рельсобалочной конструкции

$$J_x = 2 \cdot J_{\text{xp}} + 2 \cdot A_p \cdot \left(\frac{H - h_p}{2} \right)^2 + \frac{2 \cdot t_{\text{ст}} \cdot h_{\text{ст}}^3}{12} + 2 \cdot A_3 \cdot \left(\frac{h_{\text{ст}}}{2} \right)^2,$$

где J_{xp} – собственный момент инерции рельса; A_p – его площадь сечения; h_p – его высота; $t_{\text{ст}}$ – толщина одной стенки; $h_{\text{ст}}$ – высота стенки; A_3 – площадь сечения одной затяжки; H – высота сечения рельсобалочной конструкции.

Тогда момент сопротивления $W_x = \frac{2 \cdot J_x}{H}$.

Определим оптимальную высоту сечения стенки балки $h_{\text{ст}}$ при которой момент сопротивления W_x достигнет максимума. Для этого выразим площадь сечения двух затяжек

$$2 \cdot A_3 = A - 2 \cdot A_p - 2 \cdot A_{\text{ст}},$$

где A – площадь всего сечения рельсобалочной конструкции.

После подстановки получим

$$W_x = \frac{1}{H} \left[4 \cdot J_{xp} + A_p \cdot (h_{ct} + h_p)^2 + h_{ct}^2 \cdot \left(A_3 + \frac{t_{ct} \cdot h_{ct}}{3} \right) \right].$$

$$J_x = \frac{W_x \cdot H}{2}.$$

Из кубического уравнения найдем требуемую высоту стенки балки

$$h_{ct}^3 + \frac{3}{t_{ct}} \cdot (A_p + A_3) \cdot h_{ct}^2 + \frac{3}{t_{ct}} \cdot (2 \cdot A_p \cdot h_p - W_x) \cdot h_{ct} + \frac{3}{t_{ct}} \cdot [h_p (A_p \cdot h_p - 2 \cdot W_x) + 4 \cdot J_p] = 0.$$

Примем $\min A_3 = 0,4 \cdot (46,8 - 3) = 17,52 \text{ см}^2$. Рельс ПКР100, выполненный по параболе; $A_p = 112,91 \text{ см}^2$; $h_p = 23,2 \text{ см}$; $t_{ct} = 0,8 \text{ см}$; $J_{xp} = 9712 \text{ см}^4$; $W_x = 18281 \text{ см}^3$ – момент сопротивления подкрановой балки.

Подставив эти значения в предыдущее уравнение, получим

$$h_{ct}^3 + 489,11 \cdot h_{ct}^2 - 48907,23 \cdot h_{ct} - 2807308,17 = 0.$$

Решив кубическое уравнение, получим $h_{ct} = 119,1 \text{ см}$.

Тогда высота всей балки $H = 165,5 \text{ см}$.

Площадь ее стенки $A_{ct} = 2 \cdot h_{ct} \cdot t_{ct} = 2 \cdot 119,1 \cdot 0,8 = 190,56 \text{ см}^2$.

Выполнив проверку, получим $W_x = 18281 \text{ см}^3$.

То есть высота стенки h_{ct} и всего сечения H определена правильно.

Назначим стенку $119,1 \cdot 2 \cdot 0,8 = 190,56 \text{ см}^2$.

Площадь сечения рельсобалочной конструкции $A = 2 \cdot A_p + 2 \cdot A_3 + A_{ct}$,

$$A = 2 \cdot 112,91 + 2 \cdot 17,52 + 190,56 = 451,42 \text{ см}^2,$$

высота сечения $H = 119,1 + 2 \cdot 23,2 = 165,5 \text{ см}$.

Момент сопротивления по (4.2) $W_x = 18281,0 \text{ см}^3$.

Проверка прочности при изгибе в вертикальной плоскости

$$\sigma = \frac{M}{W_x} = \frac{3839000}{18281,0} = 209,999 \text{ МПа} < 210 \text{ МПа}.$$

Прочность обеспечена.

Поперечное сечение конструкции показано на рис. П.1.

Главный момент инерции относительно оси y

$$J_y = 2 \cdot J_{yp} + 2 \cdot A_{ct} \cdot \left(\frac{b}{2} \right)^2 + \frac{2 \cdot t_3 \cdot b_3^3}{12} =$$

$$= 2 \cdot 12076,6 + 2 \cdot \frac{198,08}{2} \cdot \left(\frac{16,3}{2} \right)^2 + \frac{2 \cdot 0,4 \cdot 43,8^3}{12} = 42451,1 \text{ см}^4.$$

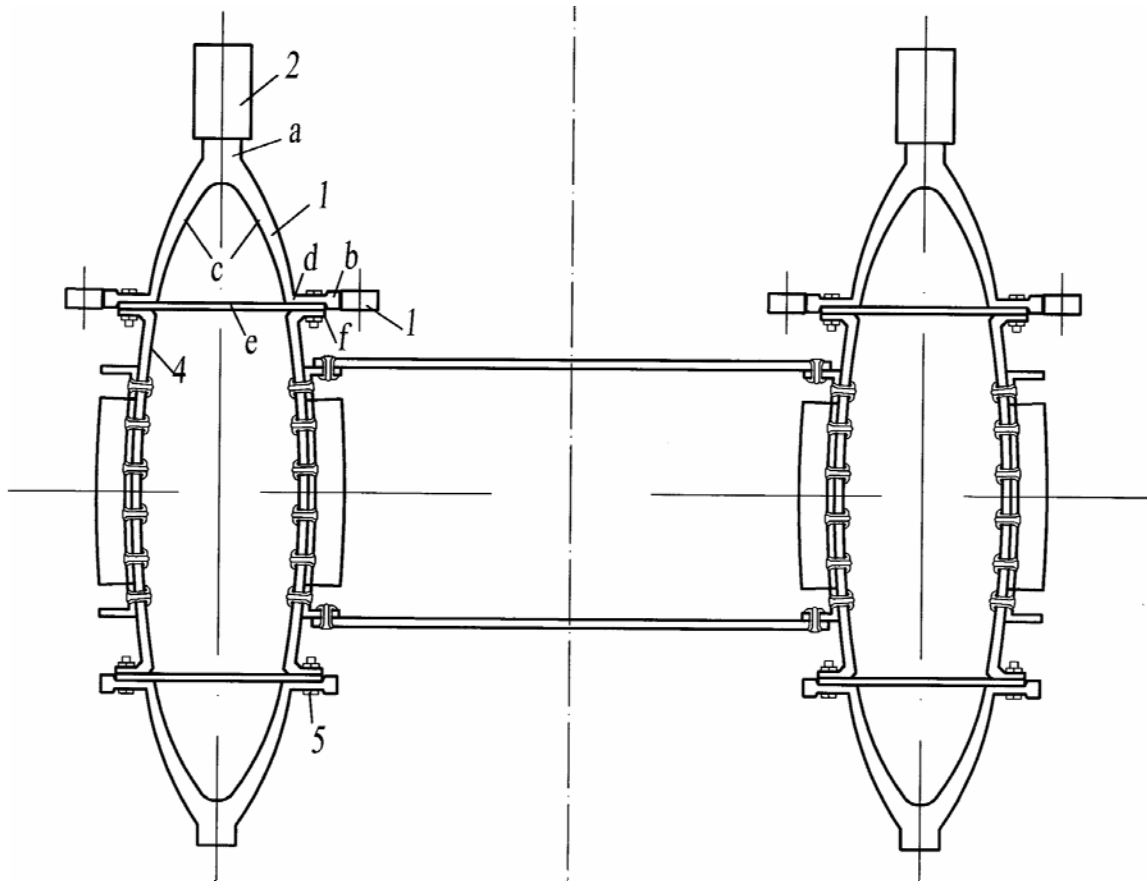


Рис. П.1. Поперечное сечение рельсобалочной конструкции по среднему ряду колонн под кран грузоподъемностью 50 т

Максимальная ширина рельсобалочной конструкции

$$B_{\max} = 46,8 \text{ см},$$

$$W_y = \frac{2 \cdot J_y}{B_{\max}} = \frac{2 \cdot 42451,1}{46,8} = 1814,2 \text{ см}^3.$$

Напряжения при изгибе в горизонтальной плоскости от сил T изгибающий момент без изменения.

$$M_T = 335090 \text{ гН}\cdot\text{см},$$

$$\sigma = \frac{M_T}{W_y} = \frac{335090}{1814,2} = 184,7 < 210 \text{ МПа}.$$

Прочность обеспечена.

Проверка рельсобалочной конструкции на кручении.

Заменим эквивалентным эллиптическим сечением (рис. П.2) таких же габаритов и с такой же толщиной стенки

$$\alpha = \frac{42,2}{43,8} = 0,963; \quad n = \frac{82,75}{21,9} = 3,78;$$

параметры α и n определены по рис. П.2.

Момент инерции на кручение

$$J_{кр} = \frac{\pi \cdot n^4 \cdot b_{эл}^3}{n^2 + 1} (1 - \alpha^4) = \frac{3,14 \cdot 3,78^3 \cdot 21,9^4}{3,78^2 + 1} (1 - 0,963^4) = 667920,13 \text{ см}^4.$$

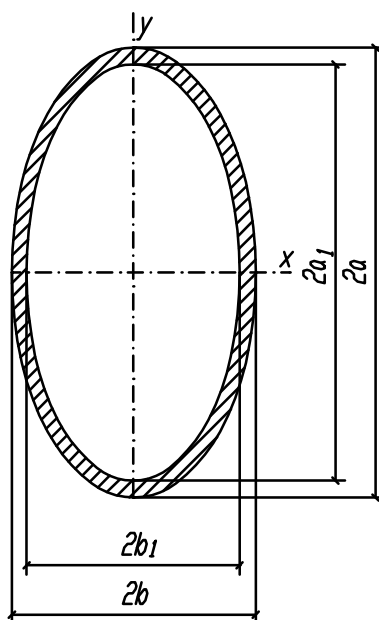


Рис. П.2. Эквивалентное эллиптическое сечение

Момент инерции на кручение по сравнению с традиционным решением, представленном в учебнике К.К. Муханова [1], увеличился в $667920/430,7 = 1550$ раз!

Момент сопротивления при кручении

$$W_{кр} = \frac{\pi \cdot n \cdot b_{эл}^3}{2} (1 - \alpha^4) = \frac{3,14 \cdot 3,78 \cdot 43,8^3}{2} (1 - 0,963^4) = 8730,14 \text{ см}^3.$$

Крутящий момент

$$M_{кр} = \frac{T \cdot (H - h_p)}{2} = \frac{505 \cdot (165,5 - 23,2)}{2} = 35930,75 \text{ гНсм.}$$

Проверка касательных напряжений при кручении

$$\tau = \frac{M_{кр}}{W_{кр}} = \frac{35930,75}{8730,14} = 4,1 < 133,4 \text{ МПа.}$$

Напряжения очень малы.

Прочность подкрановой балки на действие крутящего момента достаточна.

Примечание: точки с максимальными напряжениями при изгибе в вертикальной и горизонтальной плоскости не совпадают, поэтому проверка на косоу изгиб обеспечена.

Локальные напряжения в стенке

Эффективная длина распределения

$$l_{ef} = 3,25 \cdot \sqrt[3]{\frac{I}{t_{ст}}} = 3,25 \cdot \sqrt[3]{\frac{9712}{0,8 \cdot 2}} = 68,39 \text{ см.}$$

Локальные напряжения при центральном сжатии

$$\sigma_{loc} = \frac{P_{эКВ}}{l_{ef} \cdot t_{ст}} = \frac{3939}{68,39 \cdot 0,8 \cdot 2} = 35,99 \text{ МПа.}$$

где $P_{эКВ} = \gamma_n \cdot \gamma_{fl} \cdot P^H = 0,6 \cdot 1,3 \cdot 5050 = 3939 \text{ гН.}$

Режим работы 7К.

Величина локальных напряжений получается незначительной, поэтому возникновение усталостных трещин *исключено*.

Сравним материалоемкость конструкций (см. табл. П.1).

Т а б л и ц а П . 1

Сравнение материалоемкости балки и рельсобалочной конструкции по площади сечения

Наименование элемента	Прототип	Использование арочного
	см ²	рельса см ²
	КР80	ПКР100
Рельс	81,8	2 · 112,91 = 225,82
Затяжка	–	2 · 17,52 = 35,04
Верхний пояс	132	–
Стенка	217,84	1,6 · 119,1 = 190,56
Нижний пояс	101,2	–
Тормозная балка	58,8 + 40,5 = 99,3	–
Всего (всего в %)	632,14 (100%)	451,42 (71,41%)

Локальные напряжения при кручении близки к нулю $\sigma_{y loc кр} \approx 0$.

Рельсобалочная конструкция предназначена для восприятия динамических воздействий от колёс мостовых кранов.

По результатам расчета можно сделать вывод, что экономия материала составляет 29,6%. Трубчатая форма сечения рельсобалочной конструкции обеспечила увеличение момента инерции при кручении по сравнению с аналогом в 1550 раз, качественно изменяя ее работу.

Расчет рельсобалочной конструкции под кран тяжелого режима работы грузоподъемностью $Q = 500/100/20$ т

В начале выполним расчет одной двутавровой подкрановой балки не связанной с параллельной подкрановой балкой в единое целое.

Требуется рассчитать разрезную двутавровую подкрановую балку пролётом 12 м под два крана режима работы 8К грузоподъемностью 500/100/20 т. Материал конструкции – сталь 255 ГОСТ 27772-88 (В Ст3 сп5).

Пролёт крана 27 м, наибольшее нормативное давление колеса крана $P_n = 9100$ гН, масса крана по ГОСТ 20278-81 $G = 620$ т. Крановый рельс типа КР140 ГОСТ 4121-62. Схема кранового поезда из двух сближенных кранов $Q = 500/100/20$ т показана на рис. П.3. Масса главной тележки крана 210 т, вспомогательной тележки – 40 т.

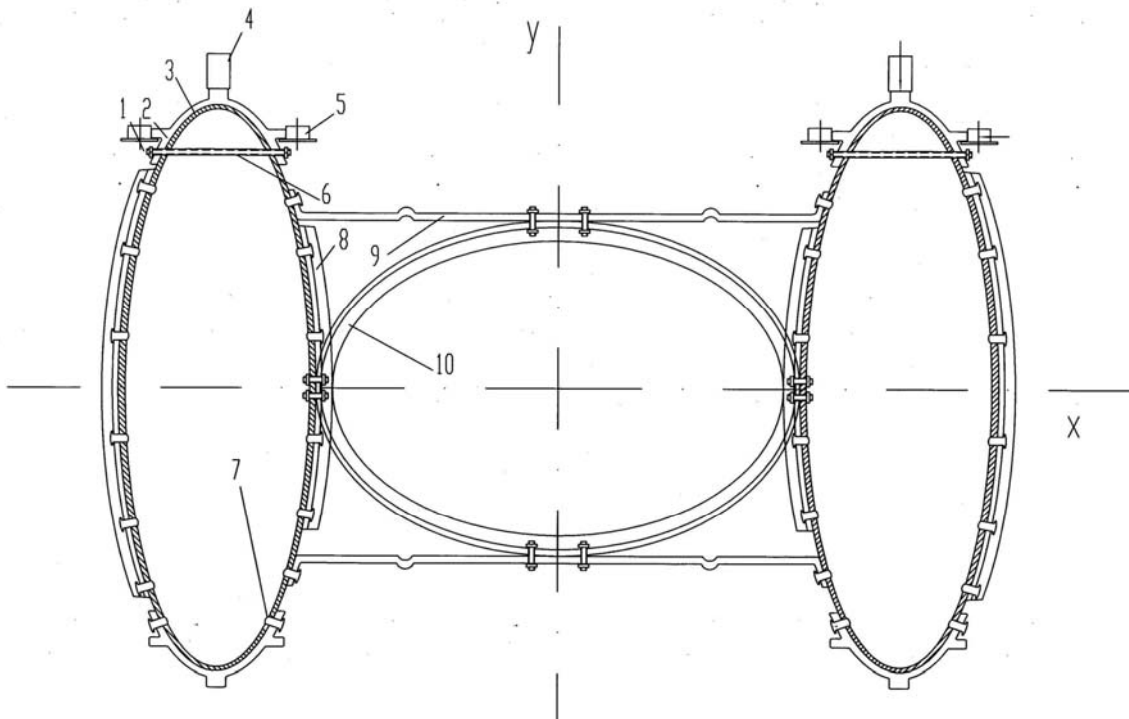


Рис. П.3. Поперечное сечение рельсобалочной конструкции по среднему ряду колонн под кран грузоподъемностью 500 т

Находим место приложения равнодействующей силы $R = \Sigma P$ (центр тяжести) от колес крана, заходящих на балку, взяв сумму статических моментов относительно удобной точки. Центр тяжести находится на расстоянии 5,357 м от точки «0». Сила, ближайшая к равнодействующей R – критическая, находится на расстоянии $a = 0,228$ м от центра тяжести рис. П.5, П.6.

Равнодействующую и критическую силы расположим симметрично относительно середины пролёта рельсобалочной конструкции, тогда опорные реакции будут равны:

$$R_A = \frac{(6000 - 114) \cdot 8 \cdot P}{12000} = \frac{5886 \cdot 8 \cdot 11561,6}{12000} = 45367,5 \text{ гН.}$$

$$R_B = \frac{(6000 + 114) \cdot 8 \cdot P}{12000} = \frac{6114 \cdot 8 \cdot 11561,6}{12000} = 47124,9 \text{ гН.}$$

Максимальный изгибающий момент под критической силой в каждой из подкрановых балок рельсобалочного блока:

$$M_{\max} = R_A \cdot 5,886 - P \cdot 5,810 - P \cdot 4,155 - P \cdot 1,655 = \\ = 45367,5 \cdot 5,886 - 11561,6(5,810 + 4,155 + 1,655) = 122439,4 \text{ гН}\cdot\text{м.}$$

Максимальная поперечная сила на опоре определяется по линии влияния. Наиболее сближенные колёса расположим около опоры, при этом одно колесо должно находиться строго над опорой (рис. П.4).

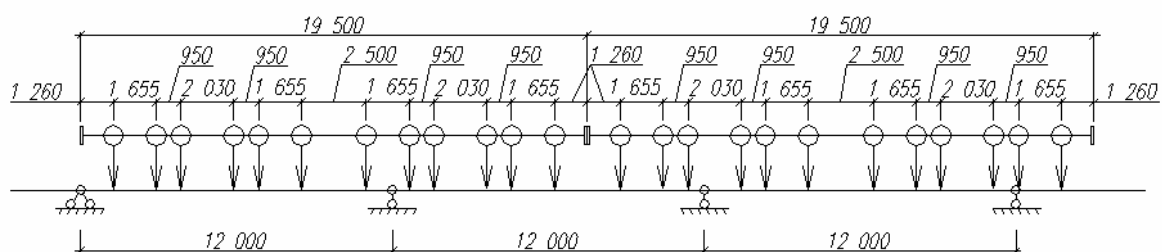


Рис. П.4. Положение кранов на рельсобалочном блоке конструкции

При таком условии на рельсобалочном блоке конструкции размещается восемь колес от крана на каждой из подкрановых балок. Максимальная поперечная сила равна опорной реакции балки над опорой:

$$Q_{\max} = R_A;$$

$$R_A \cdot 12 - P \cdot 1,310 - P \cdot 2,260 - P \cdot 3,915 - P \cdot 6,415 - P \cdot 8,070 - \\ - P \cdot 9,020 - P \cdot 11,050 - P \cdot 12,000 = 0;$$

$$Q_{\max} = R_A = 1156,6 \cdot (1,310 + 2,260 + 3,915 + 6,415 + 8,070 + \\ + 9,020 + 11,050 + 12,000) / 12 = 52065,7 \text{ гН.}$$

Определение максимального изгибающего момента M и поперечной силы Q в двутавровой подкрановой балке

Положение кранов на рельсобалочном блоке конструкции для определения максимального изгибающего момента находится по правилу Винклера.

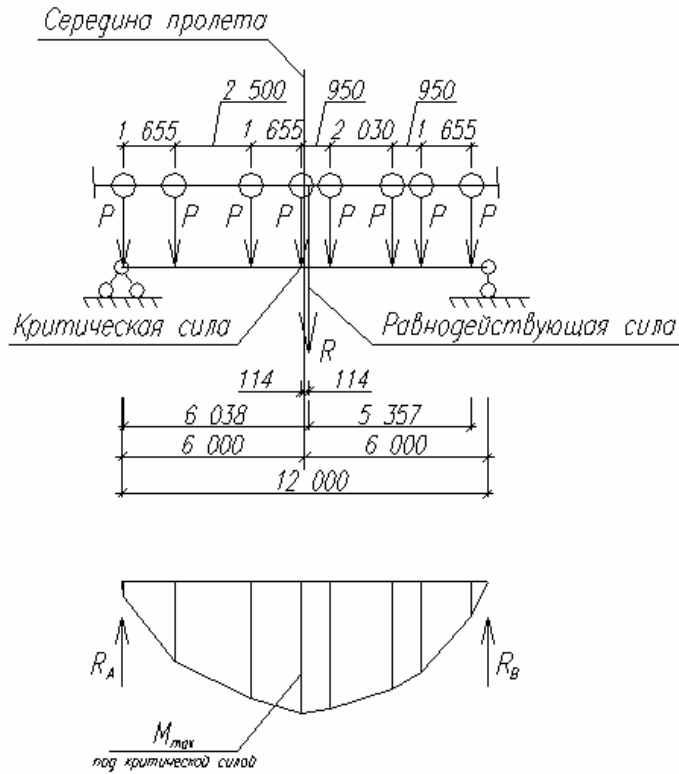


Рис. П.5. Определение максимального изгибающего момента

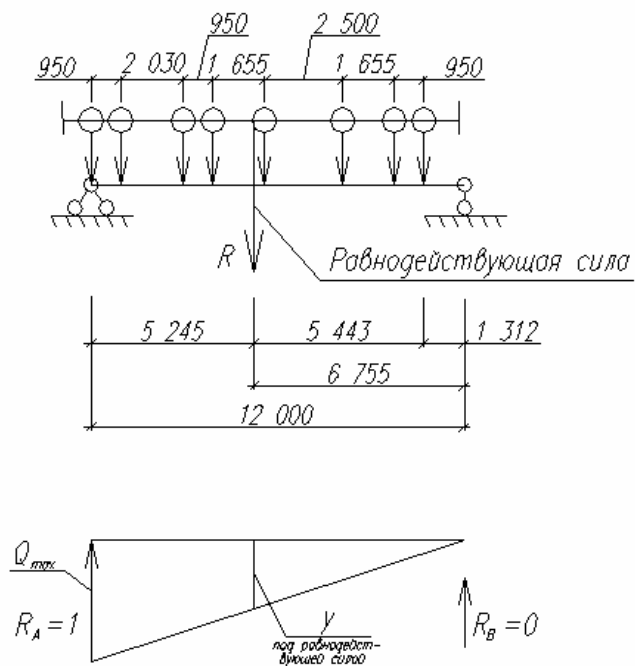


Рис. П.6. Определение максимальной поперечной силы

Для начала определяется число колёс от двух сближенных кранов, помещающихся в одном пролете. Выполнением рисунка в масштабе, устанавливаем, что на рельсобалочном блоке длиной 12 м помещается максимум восемь колес (либо четыре от одного крана и четыре колеса от второго крана, либо восемь колес от одного крана).

Наиболее сближенные колеса, а, следовательно, и наибольшее воздействие сил на балку приходится от одного крана, отсюда следует, что для определения максимального изгибающего момента по правилу Винклера в данном случае необходимо учитывать воздействие на балку одного крана и коэффициент сочетания будет равен единице.

Нормативная тормозная сила, передающаяся на рельс от одного колеса крана, принята равной 1/10 величины вертикальной силы:

$$T_n = 0,1 \cdot P_n = 0,1 \cdot 9100 = 910 \text{ гН.}$$

Коэффициент, учитывающий массу рельсобалочного блока и ремонтных грузов, примем 1,05, то есть учтём увеличением нагрузки на 5% (табл. П.2).

Т а б л и ц а П . 2

Сосредоточенные силы, передающиеся на балку

Сила от колеса крана	Нормативная, гН	Коэффициенты				Расчетная, гН
		надежности	динамичности	сочетаний	массы, <i>m</i>	
Вертикальная <i>P</i>	9100	1,1	1,1	0,95	1,05	10984
Горизонтальная <i>T</i>	910	1,1	1,0	0,95	–	951

Расчётный изгибающий момент от сил поперечного торможения в одной балке:

$$M_{\tau} = \frac{T}{P} \cdot M_{\max} = \frac{1101,1}{11561,6} \cdot 122439,4 = 11660,8 \text{ гН} \cdot \text{м.}$$

Нормативное значение изгибающего момента в вертикальной плоскости в каждой из двух балок:

$$M_n = \frac{P_n}{P} \cdot M_{\max} = \frac{9100}{11561,6} \cdot 122439,4 = 96370,6 \text{ гН} \cdot \text{м.}$$

Назначение сечения двутавровой подкрановой балки

Подкрановые балки выполнены из стали С255 ГОСТ 27772-88 (ВСт3 сп5) с расчётными сопротивлениями:

- при изгибе $R_y = 230 \text{ МПа}$;
- при срезе $R_{cp} = 0,58 R_y = 0,58 \cdot 230 = 133,4 \text{ МПа}$.

Коэффициент условий работы $\gamma = 0,9$.

Модуль упругости $E = 206000$ МПа.

Допустимый относительный прогиб $1/n_0 = 1/600$.

1. Требуемый момент сопротивления одной балки из условия прочности на изгиб определяется по формуле

$$W_{X_{\text{тр}}} = \frac{M}{\gamma \cdot R_y} = \frac{12243937}{0,9 \cdot 230} = 59149,5 \text{ см}^3.$$

2. Толщина стенки одной двутавровой подкрановой балки:
– из условия гибкости стенки

$$t_{\text{ст}} = \sqrt[3]{\frac{1,5W_x}{\lambda^2}} = \sqrt[3]{\frac{1,5 \cdot 59149,5}{130^2}} = 1,74 \text{ см.}$$

Назначаем толщину стенки одной двутавровой подкрановой балки $t_{\text{ст}} = 1,8$ см.

3. Требуемая площадь сечения одной двутавровой подкрановой балки:

$$\Sigma A = \sqrt{6 \cdot W_{\text{тр}} \cdot t_{\text{ст}}} = \sqrt{6 \cdot 59149,5 \cdot 1,8} = 799,3 \text{ см}^2.$$

4. Оптимальная высота рельсобалочной конструкции при заданной толщине стенки, равной 1,8 см:

$$h_{\text{опт}} = \frac{0,5 \cdot \Sigma A}{t_{\text{ст}}} = \frac{0,5 \cdot 799,3}{1,8} = 222,0 \text{ см.}$$

5. Окончательно назначаем высоту стенки:

$$h_{\text{ст}} = 220 \text{ см.}$$

Тогда $A_{\text{ст}} = 220 \cdot 1,8 = 396,0 \text{ см}^2$.

6. Назначаем площадь сечения поясов двутавровой подкрановой балки:

$$A_{\text{вп}} = A_{\text{нп}} = 0,25 \Sigma A = 0,25 \cdot 799,3 = 199,8.$$

Принимаем $t_n = 3,60$ см, $h = 220 + 2 \cdot 3,6 = 227,2$ см, тогда $A_n = 60 \cdot 3,6 = 216 \text{ см}^2$.

7. Суммарная площадь сечения двутавра

$$\Sigma A = 2 \cdot 216 + 396 = 828 \text{ см}^2 > 799,3 \text{ см}^2.$$

Главный момент инерции двутавра

$$J_x = \frac{bh^3 - (b - t_{\text{ст}}) \cdot h_{\text{ст}}^3}{12}$$

$$J_x = \frac{60 \cdot 227,2^3 - (60 - 1,8)220^3}{12} = 6997340 \text{ см}^4.$$

Его момент сопротивления:

$$W_x = \frac{2J_x}{h} = \frac{699734}{227,2} = 30798,2 \text{ см}^3.$$

Момент сопротивления двух двутавров: $W_x^{\text{об}} = 2 \cdot 30798,2 = 61596,4 \text{ см}^3$.

$$W_x^{\text{об}} = 61596,4 \text{ см}^3 > W_{\text{тр}} = 59149,5 \text{ см}^3.$$

Проверка на изгиб одной балки $\sigma = 12243937/61596,3 = 198,8 < 0,9 \cdot 230 = 207 \text{ МПа}$.

Прочность на изгиб каждой из балок достаточна.

Сечение из двух двутавров скомпоновано.

Заменяем каждый из двутавров овальный в сечении рельсобалочной конструкцией с арочными рельсами сверху и снизу сечения.

Овальный в сечении профиль, образованный из двух зеркальных арок имеет максимальный момент сопротивления при отношении большей оси к меньшей равном трем $\frac{2h_0}{b_0} = 3$; $b_0 = \frac{2h_0}{3}$.

Площадь сечения овала равна

$$A_0 = \frac{32h_0t_0}{9},$$

где h_0 – высота от оси x до середины толщины t_0 ; t_0 – толщина овала.

Его главный момент инерции

$$J_{x_0} = \frac{6t_0}{32t_0} \left(2h_0^2 + \frac{5}{6}t_0^2 \right)$$

и момент сопротивления

$$W_{x_0} = \frac{J_{x_0}}{h_0 + 0,5t_0}.$$

Сверху и снизу овала размещаем рельсы.

Тогда суммарный момент инерции двух рельсо-балочных конструкций равен:

$$\begin{aligned} \sum J_x &= 2 \cdot \left[\frac{6A_0}{35} \left(2h_0^2 + \frac{5}{6}t_0^2 \right) + 2A_{\text{рел}} \left(h_0 + \frac{t_0}{2} + t_r - \frac{h_{\text{рел}}}{2} \right)^2 + 2J_{\text{рел}} \right] = \\ &= 2 \cdot \left[W \left(h_0 + \frac{t_0}{2} + t_r \right) \right]; \end{aligned}$$

$$\sum J_x = W_x \frac{h}{2};$$

$$\frac{12A_0}{35}h_0^2 + \frac{A_0}{7}t_0^2 + 2A_{\text{рел}} \left[h_0^2 + 2 \left(\frac{t_0}{2} + t_r - \frac{h_{\text{рел}}}{2} \right) h_0 + \left(\frac{t_0}{2} + \frac{2t_r}{2} - \frac{h_{\text{рел}}}{2} \right)^2 \right] +$$

$$+ 2J_{\text{рел}} - W_x \left(h + \frac{t_0}{2} + t_r \right) = 0;$$

$$\sum A = 2A_{\text{рел}} + A_0 \Rightarrow A_0 = \sum A - 2A_{\text{рел}};$$

$$h_0 = \frac{9A_0}{32t_0} \Rightarrow A_0 = \frac{32t_0}{9}h_0.$$

Подставив $A_0 = \frac{32t_0}{9}h_0$, получаем уравнение третьей степени для нахождения половины высоты овала

$$h_0^3 + \frac{105}{64} \frac{A_{\text{рел}}}{t_0} h_0^2 + \frac{105}{128t_0} \left[\frac{32t_0^3}{63} + 2A_{\text{рел}}(t_0 + 2t_r - h_{\text{рел}}) - W_x \right] h_0 +$$

$$+ \frac{105}{128 \cdot t_0} \left[\frac{A_{\text{рел}}}{2} (t_0 + 2t_r - h_{\text{рел}})^2 + 2J_{\text{рел}} - W_x \left(\frac{t_0}{2} + t_r \right) \right] = 0;$$

$$A_{\text{рел}} = 187,24; J_{x \text{ рел}} = 31344;$$

$$h_{\text{рел}} = 33,575; t_0 + 2t_r - h_{\text{рел}} = 1 + 2 \cdot 3 - 33,575 = -26,575;$$

$$W_{x \text{ тр}} = 59149,5 \text{ см}^3; \quad t_0 = 1,1 \Rightarrow \text{ПО } t_r = 3.$$

Примем эффективный арочный крановый рельс ЭК140 [9]:

- $A_{\text{рел}} = 187,24 \text{ см}^2$ – площадь сечения;
- $J_{x \text{ рел}} = 31344 \text{ см}^4$ – его момент инерции;
- $h_{\text{рел}} = 33,575 \text{ см}$ – его высота.

Толщину стенки овала примем равной $t_0 = 1 \text{ см}$.

Требуемый момент сопротивления одного овала $W_{x \text{ тр}} = 60897 \text{ см}^3$.

После постановки получаем $h_0^3 + 307,19062h_0^2 - 58117,743h_0 - 84334,19 = 0$.

Один из корней дает требуемую половину высоты овального сечения $h_0 = 133,537 \text{ см}$.

$$\text{Главный момент инерции } I_x = \frac{6A_0}{35} \left(2h_0^2 + \frac{5}{6}t_0^2 \right) = 2891202,8 \text{ см}^4.$$

Суммарный момент инерции рельсобалочный конструкции из двух овалов

$$\sum J_x = 2891202,8 + 5398762,8 + 2 \cdot 31344 = 8352653,6 \text{ см}^4.$$

$$\text{Её момент сопротивления } W_x = \frac{\sum J_x}{h_0 + 0,5t_0 + t_r} = 61032 \text{ см}^3 > 60897.$$

Проверка прочности при изгибе в вертикальной плоскости

$$\sigma = \frac{M}{W_x} \leq R_y \cdot y; \quad \sigma = 207 \text{ МПа} < 230 \cdot 0,9 = 207 \text{ МПа}.$$

Прочность обеспечена.

Следовательно, объединение конструкций позволяет экономить от 20 до 30% металла.

Несимметричное (одностороннее) нагружение для новой конструкции не опасно, так как момент инерции при кручении рельсобалочного блока велик (примерно в 1880 раз больше чем у, например, у обычного двутавра) и поэтому приложение 50% нагрузки (от двух кранов) с эксцентриситетом для новой конструкции не ощутимо.

Эффект достигнут из-за следующего:

– уменьшена материалоемкость пары рельсобалочных конструкций на 20–30% по сравнению с материалоемкостью единичной рельсобалочной конструкции;

– работа пары рельсобалочных конструкций переведена в зону так называемой "неограниченной долговечности" и появление усталостных трещин в качественном материале подкрановых балок без дефектов и повреждений невозможно в течение всего срока эксплуатации, то есть 25-30 лет.

Пример конкретной реализации рихтовки рельсовых путей

Необходимо выполнить рихтовку рельсовых путей на Пензенском компрессорном заводе в литейном цехе. Длина данного пролета 18 м, мостовые краны грузоподъемностью $Q = 10$ т подкрановые балки стальные, разрезные длиной по 10 м. Рихтовка каркаса посредством рихтовки фундаментов совместно с колоннами затруднена, так как по этому ряду колонн выполнена кирпичная стена, и стальные колонны вмурованы в стену. Масса подкрановых балок около 5 т. На отдельных участках пути имеются тормозные балки.

Так как масса подкрановых балок около 5 т достаточно автомобильного домкрата грузоподъемностью 2,5–5 т. Высота сечения подкрановых балок равна 1,2 м. Опорные ребра соединены друг с другом шестью болтами М20 установленными в отверстия $\varnothing 23$ мм. Анкерные болты М24. Опорные ребра шириной 250 мм.

На данной колонне необходимо выполнить вертикальное поддомкрачивание на величину $\Delta = 120$ мм и горизонтальное перемещение к колонне на $\delta = 25$ мм (рис. 5.1). Так как горизонтальное перемещение будет к колонне, то упор 9 ставим с зазором $\delta = 25$ мм со стороны колонны и для пальца 6 используем левое верхнее отверстие $\varnothing 23$ мм. Диаметр пальца назначаем $\varnothing 22$ мм из стали Ст35 с термообработкой. Палец с одной стороны заострен. Длина пальца $l_n = 200$ мм (с запасом, чтобы не ставить шпильки). До верхнего ряда отверстий от плиты 600 мм.

Принимаем уголки 4, 2L100×10 длиной по 650 мм с верхним отверстием $\varnothing 23$ мм на расстоянии 600 мм от нижнего торца.

Назначаем высоту сечения h рычага 4.

Для универсальности приспособлений и использования их в других пролетах цеха, где грузоподъемность крана $Q = 50$ т и подкрановые балки массой до 10 т. Будем считать, что домкрат 7 развивает силу $6 \text{ т} = 600 \text{ гН}$. Примем рычаг 4 равноплечим, то есть от оси домкрата до центрального отверстия 25 см и от центрального отверстия до оси стойки 25 см.

Изгибающий момент в рычаге 4

$$M = 600 \times 25 = 15000 \text{ гНсм.}$$

Примем сталь [43] 10ХСНД С $R_y = 300$ МПа.

Требуемый момент сопротивления сечения рычага

$$W_{\text{тр}} = \frac{M}{R_y} = \frac{15000}{300} = 50 \text{ см}^3.$$

Толщина стенки рычага $t_{ст} = 2$ см

$$W = \frac{h^2 t}{6} \Rightarrow h = \sqrt{\frac{6 \cdot W}{t}} = \sqrt{\frac{6 \cdot 50}{2}} = 13,0 \text{ см}^3.$$

Уголки рассчитываем на сжатие

$$A_{тр} = \frac{N}{\varphi \cdot R} = \frac{3000}{0,8 \cdot 300} = \frac{10}{0,8} = 12 \text{ см}^2.$$

Применяем с запасом 2L63×6, $A_{\phi} = 7,28 \times 2 = 14,56 \text{ см}^2$.

Поддомкрачивание выполняем за 4 цикла по 30 мм. Потребуется семь подкладок по 30 мм, три подкладки под опорные уголки общей толщиной 90 мм и четыре подкладки под опорные ребра суммарной толщиной 120 мм.

После окончания рихтовки анкерные болты с контрят. При необходимости укрепляют крепления тормозных балок. После рихтовки необходимо проверить зазор между верхом крана и низом фермы. Зазор должен быть не менее 100 мм.

Сортамент эллиптических трубчатых профилей

Деформируя любой трубчатый профиль в эллиптическое сечение, мы можем значительно повысить прочность трубы на изгиб.

Считаем, что площадь поперечного сечения A и толщина стенки t величины постоянные (рис. П.7).

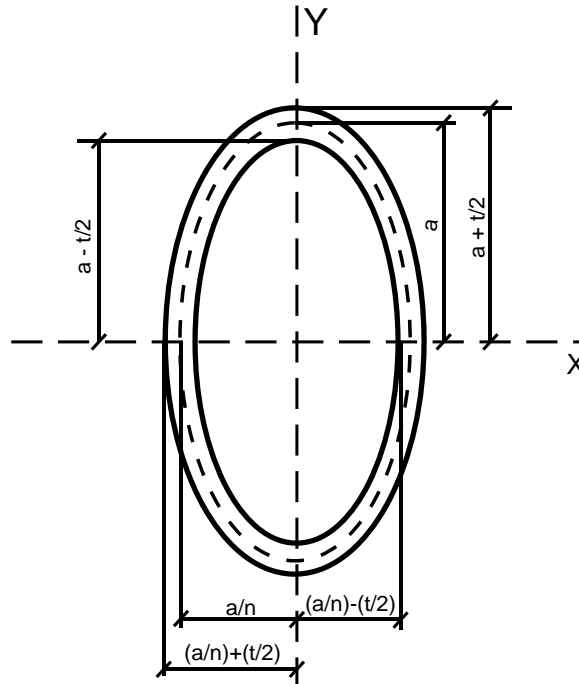


Рис. П.7. Эллиптический трубчатый профиль

Введём следующие обозначения:

A – площадь поперечного сечения трубы;

t – толщина стенки трубы;

a, b – расстояния от центра тяжести эллиптического профиля до середины толщины стенки;

$2a + t$ – внешний габарит эллиптического профиля по оси X .

Введем коэффициент $n = \frac{a}{b}$, тогда $b = \frac{a}{n}$.

В соответствии с введенным коэффициентом минимальный габарит эллиптического профиля:

$\frac{2a}{n} + t$ – внешний габарит эллиптического профиля по оси Y .

Аналогичным образом записываем размеры полости:

$2a - t$ – максимальный габарит полости;

$\frac{2a}{n} - t$ – минимальный габарит полости.

Продолжение прил. 5
СОРТАМЕНТ ЭЛЛИПТИЧЕСКИХ ТРУБЧАТЫХ ПРОФИЛЕЙ

D_3 , мм	A , см ²	t , см	a , см	b , см	I_{x_3} , см ⁴	W_{x_3} , см ³	I_{y_3} , см ⁴	W_{y_3} , см ³	r_x	r_y	$I_{кр}$, см ⁴	$S_{1/2}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
325	60,13	0,60	23,93	7,97	12910,4	532,9	1142,2	138,0	14,7	4,4	1688,8	381,6
325	69,93	0,70	23,85	7,95	14922,4	616,6	1309,8	157,8	14,6	4,3	1945,6	442,4
325	79,67	0,80	23,78	7,93	16895,7	698,9	1471,3	176,7	14,6	4,3	2195,5	502,5
325	89,35	0,90	23,70	7,90	18830,8	779,7	1626,8	194,8	14,5	4,3	2438,7	561,8
326	50,42	0,50	24,08	8,02	10961,4	450,6	977,4	118,1	14,7	4,4	1438,7	322,0
326	60,32	0,60	24,00	8,00	13032,2	536,3	1153,1	138,9	14,7	4,4	1704,9	384,0
326	70,15	0,70	23,93	7,97	15063,6	620,5	1322,5	158,9	14,7	4,3	1964,1	445,2
326	79,92	0,80	23,85	7,95	17056,1	703,3	1485,6	177,9	14,6	4,3	2216,5	505,7
326	89,63	0,90	23,78	7,92	19010,0	784,7	1642,6	196,1	14,6	4,3	2462,1	565,3
326	99,27	1,00	23,70	7,90	20926,0	864,7	1793,7	213,5	14,5	4,3	2701,1	624,2
326	108,86	1,10	23,63	7,87	22804,5	943,3	1938,9	230,1	14,5	4,2	2933,4	682,3
326	118,38	1,20	23,55	7,85	24645,8	1020,5	2078,4	246,0	14,4	4,2	3159,2	739,6
480	74,61	0,50	35,63	11,88	35513,2	989,9	3205,8	264,4	21,8	6,6	4685,1	705,1
480	89,35	0,60	35,55	11,85	42348,8	1181,3	3803,1	313,0	21,8	6,5	5574,8	842,6
480	104,02	0,70	35,48	11,83	49097,1	1370,5	4386,2	360,3	21,7	6,5	6449,0	978,8
480	118,63	0,80	35,40	11,80	55758,6	1557,5	4955,3	406,2	21,7	6,5	7307,9	1114,0
480	133,17	0,90	35,33	11,78	62334,2	1742,4	5510,5	450,8	21,6	6,4	8151,6	1247,9
480	147,65	1,00	35,25	11,75	68824,5	1925,2	6052,1	494,0	21,6	6,4	8980,2	1380,7
480	162,07	1,10	35,18	11,73	75230,1	2105,8	6580,1	536,1	21,5	6,4	9793,9	1512,3
480	176,43	1,20	35,10	11,70	81551,9	2284,4	7094,8	576,8	21,5	6,3	10592,8	1642,8
530	98,77	0,60	39,30	13,10	57212,5	1444,8	5153,0	384,6	24,1	7,2	7540,7	1029,7
530	115,01	0,70	39,23	13,08	66368,9	1677,0	5949,7	443,2	24,0	7,2	8730,3	1196,7
530	131,19	0,80	39,15	13,05	75419,0	1906,9	6729,1	500,3	24,0	7,2	9901,1	1362,5
530	147,31	0,90	39,07	13,03	84363,6	2134,4	7491,5	556,0	23,9	7,1	11053,2	1526,9
530	163,36	1,00	39,00	13,00	93203,6	2359,6	8237,0	610,1	23,9	7,1	12186,9	1690,1

Продолжение прил. 5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
530	179,35	1,10	38,93	12,98	101939,6	2582,4	8965,8	662,9	23,8	7,1	13302,1	1852,0
530	195,28	1,20	38,85	12,95	110572,4	2802,8	9678,2	714,3	23,8	7,0	14399,2	2012,6
630	117,62	0,60	46,80	15,60	96613,6	2051,2	8740,6	549,7	28,7	8,6	12757,6	1460,2
630	137,00	0,70	46,72	15,58	112177,7	2383,0	10108,9	634,8	28,6	8,6	14788,4	1698,1
630	156,33	0,80	46,65	15,55	127590,4	2711,8	11452,5	718,0	28,6	8,6	16792,4	1934,5
630	175,58	0,90	46,57	15,53	142852,7	3037,8	12771,7	799,5	28,5	8,5	18769,8	2169,3
630	194,78	1,00	46,50	15,50	157965,6	3361,0	14066,6	879,2	28,5	8,5	20720,8	2402,6
630	213,91	1,10	46,43	15,48	172929,8	3681,3	15337,6	957,1	28,4	8,5	22645,5	2634,3
630	232,98	1,20	46,35	15,45	187746,4	3998,9	16584,8	1033,3	28,4	8,4	24544,1	2864,6
720	156,80	0,70	53,48	17,83	168151,7	3124,0	15205,3	836,6	32,7	9,8	22199,5	2224,1
720	178,95	0,80	53,40	17,80	191370,2	3557,1	17245,4	947,5	32,7	9,8	25228,4	2534,8
720	201,03	0,90	53,33	17,78	214391,0	3986,8	19253,3	1056,4	32,7	9,8	28222,3	2843,6
720	223,05	1,00	53,25	17,75	237215,2	4413,3	21229,2	1163,2	32,6	9,8	31181,4	3150,7
720	245,01	1,10	53,18	17,73	259843,9	4836,6	23173,4	1268,0	32,6	9,7	34105,9	3456,0
720	266,91	1,20	53,10	17,70	282278,0	5256,6	25086,2	1370,8	32,5	9,7	36996,1	3759,6
820	178,79	0,70	60,98	20,33	249285,6	4065,0	22607,9	1093,5	37,3	11,2	32951,2	2891,8
820	204,08	0,80	60,90	20,30	283852,7	4630,5	25665,4	1239,9	37,3	11,2	37473,1	3296,8
820	229,30	0,90	60,82	20,27	318162,0	5192,4	28680,9	1383,9	37,2	11,2	41949,3	3699,7
820	254,47	1,00	60,75	20,25	352214,9	5750,4	31654,5	1525,5	37,2	11,2	46380,2	4100,7
820	279,57	1,10	60,68	20,23	386012,5	6304,8	34586,6	1664,8	37,2	11,1	50765,8	4499,7
820	304,61	1,20	60,60	20,20	419556,0	6855,5	37477,4	1801,8	37,1	11,1	55106,5	4896,6
820	329,58	1,30	60,52	20,18	452846,6	7402,5	40327,4	1936,5	37,1	11,1	59402,4	5291,6
820	354,50	1,40	60,45	20,15	485885,4	7945,8	43136,7	2068,9	37,0	11,0	63653,9	5684,5
1020	254,34	0,80	75,90	25,30	549484,3	7201,6	49918,2	1942,3	46,5	14,0	72684,1	5120,8
1020	285,85	0,90	75,82	25,27	616346,8	8080,6	55857,4	2171,3	46,4	14,0	81446,1	5749,5
1020	317,30	1,00	75,75	25,25	682809,1	8954,9	61731,1	2397,3	46,4	13,9	90137,2	6375,7
1020	348,69	1,10	75,68	25,23	748872,8	9824,5	67539,6	2620,4	46,3	13,9	98757,7	6999,4
1020	380,01	1,20	75,60	25,20	814539,4	10689,5	73283,3	2840,4	46,3	13,9	107307,9	7620,6

Окончание прил. 5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1020	411,27	1,30	75,52	25,18	879810,3	11549,9	78962,6	3057,6	46,3	13,9	115788,0	8239,3
1020	442,46	1,40	75,45	25,15	944687,0	12405,6	84577,9	3271,9	46,2	13,8	124198,4	8855,5
1120	279,48	0,80	83,40	27,80	728995,2	8699,2	66339,9	2352,5	51,1	15,4	96498,6	6182,8
1120	314,13	0,90	83,32	27,77	817917,4	9763,3	74269,0	2631,3	51,0	15,4	108170,1	6943,1
1120	348,72	1,00	83,25	27,75	906355,8	10822,2	82118,7	2906,9	51,0	15,3	119755,9	7700,7
1120	383,24	1,10	83,18	27,73	994311,9	11875,9	89889,4	3179,1	50,9	15,3	131256,2	8455,5
1120	417,71	1,20	83,10	27,70	1081787,4	12924,6	97581,5	3448,1	50,9	15,3	142671,3	9207,6
1120	452,11	1,30	83,02	27,68	1168784,0	13968,1	105195,5	3713,9	50,8	15,3	154001,6	9957,0
1120	486,44	1,40	82,95	27,65	1255303,2	15006,6	112731,8	3976,4	50,8	15,2	165247,4	10703,5
1220	342,40	0,90	90,82	30,27	1059244,9	11605,0	96337,9	3135,5	55,6	16,8	140180,8	8249,2
1220	380,13	1,00	90,75	30,25	1174036,9	12866,2	106563,3	3465,5	55,6	16,7	155241,4	9150,7
1220	417,80	1,10	90,68	30,23	1288255,1	14121,7	116694,7	3791,9	55,5	16,7	170200,4	10049,2
1220	455,41	1,20	90,60	30,20	1401901,4	15371,7	126732,4	4114,7	55,5	16,7	185058,0	10944,6
1220	492,95	1,30	90,52	30,18	1514977,4	16616,1	136676,8	4434,0	55,4	16,7	199814,6	11837,1
1220	530,43	1,40	90,45	30,15	1627484,9	17855,0	146528,6	4749,7	55,4	16,6	214470,5	12726,5
1320	370,68	0,90	98,33	32,78	1343907,6	13605,7	122395,5	3683,8	60,2	18,2	177955,1	9667,9
1320	411,55	1,00	98,25	32,75	1489828,6	15086,9	135433,2	4073,2	60,2	18,1	197124,1	10725,7
1320	452,36	1,10	98,17	32,72	1635076,2	16561,9	148360,4	4458,6	60,1	18,1	216173,7	11780,3
1320	493,10	1,20	98,10	32,70	1779652,5	18030,9	161177,5	4840,2	60,1	18,1	235104,3	12831,6
1320	533,79	1,30	98,02	32,68	1923559,4	19493,9	173885,1	5217,9	60,0	18,0	253916,2	13879,7
1320	574,41	1,40	97,95	32,65	2066798,8	20950,8	186483,5	5591,7	60,0	18,0	272609,9	14924,5
1420	442,96	1,00	105,75	35,25	1857706,9	17484,3	169096,5	4730,0	64,8	19,5	245933,9	12425,7
1420	486,92	1,10	105,67	35,22	2039148,9	19196,5	185291,6	5179,4	64,7	19,5	269759,1	13648,9
1420	530,80	1,20	105,60	35,20	2219812,3	20902,2	201358,9	5624,5	64,7	19,5	293446,2	14868,6
1420	574,63	1,30	105,53	35,18	2399699,0	22601,4	217298,9	6065,6	64,6	19,4	316995,7	16084,8
1420	618,39	1,40	105,45	35,15	2578811,3	24294,0	233112,1	6502,4	64,6	19,4	340407,9	17297,5
1420	662,09	1,50	105,38	35,13	2757151,1	25980,2	248799,1	6935,2	64,5	19,4	363683,3	18506,8

Сравнение геометрических характеристик стандартного двутаврового профиля с эквивалентным эллиптическим трубчатым профилем

Заменяем двутавр I100Б4 [5] ($h = 1014$ мм; $b = 323,1$ мм; $h_{ст} = 948$ мм; толщина стенки $t_{ст} = 18,6$ мм; толщина полки $t_{п} = 33$ мм; площадь поперечного сечения $A = 395$ см²) эквивалентным эллиптическим трубчатым профилем с этой же площадью поперечного сечения $A = 395$ см².

Расчет ведем по формулам, используемым во второй главе при составлении сортамента эллиптических трубчатых профилей.

Толщина стенки эллиптического трубчатого профиля равна:

$$t_{ст} \frac{18,6}{2} = 9,3 \text{ мм.}$$

Момент инерции относительно оси X :

$$J_x = \frac{3 \cdot A}{16} \left(2 \cdot a^2 + \frac{5}{6} \cdot t^2 \right).$$

Момент сопротивления относительно оси X :

$$W_x = \frac{I_x}{a + \frac{t}{2}}.$$

Момент инерции при кручении эллиптического трубчатого профиля записываем в соответствии со справочником по сопротивлению материалов [20, с. 77].

$J_x = 1522981,6$ см⁴, а для двутавра 100Б4 $J_x = 662170,0$ см⁴, т.е. увеличение на 130%, $W_x = 14951,4$ см³, а для двутавра 100Б4 $W_x = 13060$ см³, т.е. увеличение на 14,5%.

Момент инерции при кручении:

$J_p = 201664,6$ см⁴, а для двутавра 100Б4 $J_{кр} = 977,4$ см⁴, т.е. увеличение в 206,3 раза.

Таким образом, эллиптический трубчатый профиль при $n = 3$ имеет отличные характеристики.

Особенность новых профилей – отсутствие концентраторов напряжений и амортизирующая способность профиля за счет своей формы сечения. Переход к таким конструкциям снижает повреждаемость усталостными трещинами.

О Г Л А В Л Е Н И Е

ПРЕДИСЛОВИЕ	3
ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. ПОВЫШЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ И РАБОТОСТОСОБОСТИ ПОДКРАНОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ	5
1.1. Рельсобалочная конструкция с двумя арочными трехглавыми рельсами.....	5
1.2. Сортамент эффективных эллиптических профилей	11
2. ПОДКРАНОВЫЕ КОНСТРУКЦИИ ДЛЯ ПРОЛЕТОВ 30–36 М	14
2.1. Методика расчета подкраново-подстропильной конструкции овальной в сечении.....	14
2.2. Подкраново-подстропильная балка с нижним поясом из симметричной пары рельсобалочных конструкций.....	15
2.3. Повышение выносливости подкрановых конструкций	19
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	20
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	21
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	22

Учебное издание

Кузьмишкин Алексей Александрович

Фадеев Василий Васильевич

Волков Борис Валерианович

ПОДБОР ПОДКРАНОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПОВЫШЕННОЙ ВЫНОСЛИВОСТИ

Методические указания

для самостоятельной работы

Под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. Ю.П. Скачкова

Р е д а к т о р

В.С. Кулакова

В е р с т к а

Н.А. Сазонова

Подписано в печать 23.12.13. Формат 60×84/16.

Бумага офисная «Снегурочка». Печать на ризографе.

Усл.печ.л. 2,55. Уч.-изд.л. 2.75. Тираж 80 экз.

Заказ №342.