

УДК 621.874

Т. В. ЛУЦКО, А. В. КОНДРЫКИНСКИЙ, С. А. ТИЩЕНКО

ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»

**К ВОПРОСУ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ
МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИИ ПРОЛЕТНОГО СТРОЕНИЯ МОСТОВОГО
КРАНА**

Аннотация. В статье рассмотрен вопрос снижения металлоемкости металлоконструкции мостового крана при обеспечении заданной грузоподъемности. В качестве объекта исследования принят мостовой кран КМ-32 грузоподъемностью 32 т и пролетом 16,5 м. Предлагается следующая модернизация моста крана: усилить металлоконструкции главных балок пролетного строения за счет введения дополнительных наружных продольных ребер жесткости при одновременном уменьшении толщины вертикальных диафрагм, что позволяет снизить массу моста на 4 %. На основании выполненного численного анализа напряженно-деформированного состояния базовой и модернизированной конструкции моста в программной среде Компас – 3D APM FEM: «Прочностный анализ» установлены наибольшие концентрации напряжений и максимальные прогибы мостов, а также определены массы рассматриваемых конструкций мостов. Установлена зависимость повышения массы главной балки пролетного строения крана при увеличении высоты поперечного сечения главной балки по сравнению с оптимальной высотой.

Ключевые слова: диафрагма, кран мостовой, масса, металлоконструкция, напряженно-деформированное состояние, прогиб, ребро жесткости.

ФОРМУЛИРОВКА ПРОБЛЕМЫ

Мостовые краны имеют широкое распространение в цехах и на складах предприятий в различных отраслях, на строительных площадках и объектах энергетики. Одним из важных проблем является снижение металлоемкости мостовых кранов. Поскольку масса пролетных строений составляет от 60 до 80 % массы крана, а иногда и более, а стоимость металла – приблизительно 65 % стоимости изготовления машины [1].

В связи с этим исследования, направленные на поиск оптимальных геометрических параметров металлоконструкций мостов, что непосредственно влияет на их массу, являются актуальными в настоящее время.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Среди разнообразия конструкций пролетных строений мостовых кранов остановимся на рассмотрении коробчатых конструкций. Различают коробчатые балки закрытые и открытые. В закрытых балках пространственная жесткость обеспечивается за счет диафрагм, а в открытых – за счет поперечных рам или специальных коробок и ребер жесткости [1]. Коробчатые закрытые балки, как правило, могут быть выполнены из листов, а также из прокатных и из тонкостенных гнутых и штампованных профилей. Исследованиям, направленным на поиск оптимальных конструкций коробчатых мостов кранов, посвящены работы В. Ю. Анцева, М. М. Гохберга, П. Ю. Калабина, Л. Ф. Москвичевой, А. С. Толоконникова и др. [2–4].

Данные исследования направлены, прежде всего, на оптимизацию металлоконструкций, которая сводится к уменьшению металлоемкости крана. В настоящей работе рассмотрим влияние расположения вертикальных диафрагм и продольных ребер жесткости в металлоконструкциях главных балок моста крана на прочностные, жесткостные и массовые характеристики металлоконструкции крана.

© Т. В. Луцко, А. В. Кондрыйкинский, С. А. Тищенко, 2021

Целью настоящего исследования является обоснование рациональных геометрических параметров пролетного строения мостового двухбалочного крана, обеспечивающих снижение его металлоемкости при обеспечении заданной грузоподъемности.

Задачами являются:

1. Моделирование металлоконструкции моста крана в программном комплексе APM FEM: Прочностный анализ для Компас – 3D.
2. Численный анализ напряженно-деформированного состояния двух вариантов исполнения металлоконструкции: в базовом и модернизированном. Модернизация металлоконструкции моста заключается в установке дополнительных наружных продольных ребер жесткости вдоль главных балок при уменьшенной толщине основных вертикальных диафрагм.
3. Сравнительный анализ металлоемкости различных исполнений металлоконструкции пролетного строения крана.

ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ

В качестве объекта рассмотрения принята металлоконструкция моста крана КМ-32 грузоподъемностью 32 т и пролетом 16,5 м, изготовленная из стали 09Г2С. На рисунке 1 представлена главная балка и ее поперечное сечение посередине пролета с указанием геометрических параметров.

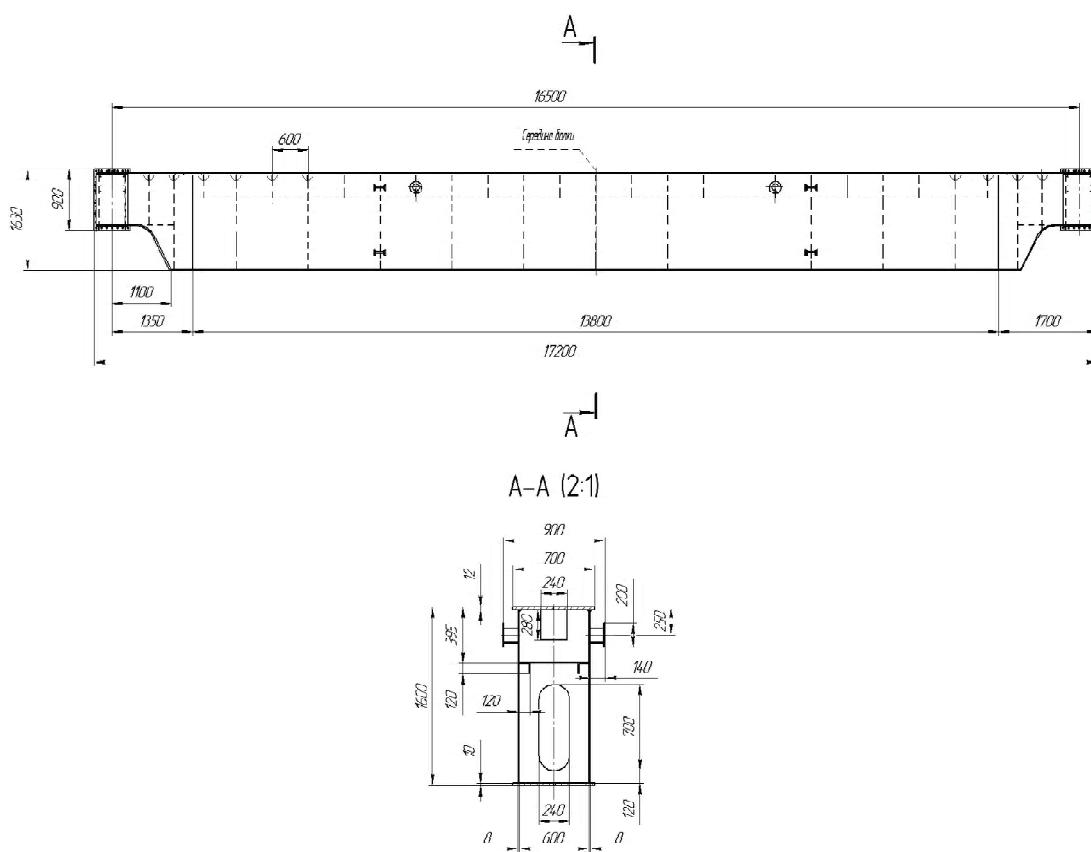


Рисунок 1 – Главная балка мостового крана КМ-32.

В результате расчета металлоконструкции данного крана по известным методикам [3, 5, 6] установлено, что прочность обеспечивается с достаточным запасом, в частности, максимальные нормальные напряжения при изгибе в сечении балки посередине пролета от совместного действия вертикальных и горизонтальных нагрузок составляют 169,6 МПа. Расчетный максимальный прогиб составляет 6 мм против допускаемого 24 мм. Все это говорит о резерве по снижению металлоемкости.

Далее было выполнено моделирование металлоконструкции моста крана в программном комплексе APM FEM: Прочностный анализ для Компас – 3D [7]. Твердотельная модель сборочного опорного узла главной балки модернизированного исполнения моста крана, а также ее поперечное

сечение посередине пролета показаны на рисунке 2. На рисунке 3 приведены карты напряжений для двух исполнений пролетного строения: базового и модернизированного при нагружении крана весом груза и тележки, расположенных посередине моста.

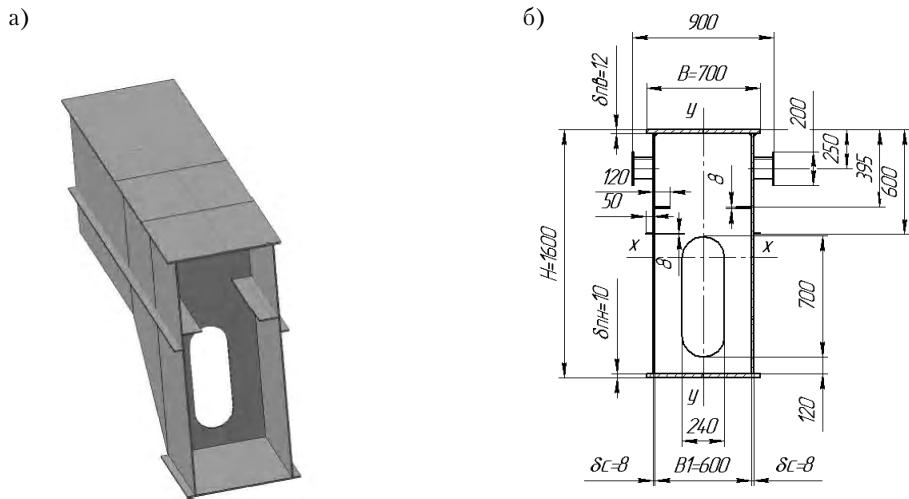


Рисунок 2 – Твердотельная модель сборочного опорного узла главной балки (а), модернизированного исполнения моста крана и ее поперечное сечение посередине моста (б).

Анализ полученных в программном комплексе результатов максимальных напряжений показывает, что для базового исполнения они составляют 119,38 МПа, для модернизированного – 122,98 МПа, что говорит о практически равной прочности. Запас прочности по сравнению с расчетным значением 1,44 увеличился до 2,05 для базовой модели и до 1,99 для модернизированной модели. Определение максимальных прогибов показало, что для базовой модели прогиб составил 3,65 мм, для модернизированной – 3,36 мм, что меньше расчетного значения 6 мм. Эти результаты говорят о том, что программа позволяет выполнять прочностный расчет более точно, так как учитывает все особенности расстановки и геометрические размеры и профили диафрагм и ребер.

Найдя оптимальные размеры поперечного сечения балки, можно получить оптимальную массу балки.

Масса главной балки определяется по формуле:

$$m_B = V_B \gamma = FL\gamma \rightarrow \min, \quad (1)$$

где V_B – объем балки, м^3 ;

F – площадь поперечного сечения главной балки, м^2 (принимаем площадь в среднем сечении балки);

L – пролет крана, м;

γ – плотность материала, из которого изготовлена металлоконструкция, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Для нахождения площади оптимального поперечного сечения принимаем, что балка находится под действием изгибающего момента МИ, действующего в вертикальной плоскости (изгиб в горизонтальной плоскости в данном случае не рассматриваем). В качестве расчетного принимаем коробчатое поперечное сечение, представленное на рисунке 4. Как видно из рисунка 4, толщина верхнего пояса балки больше, чем нижнего пояса. В рассматриваемом кране КМ-32 толщина верхнего пояса балки составляет $1,2\delta_n$, где δ_n – толщина нижнего пояса. Тогда по методике, изложенной в работе [3], определяем оптимальную площадь поперечного сечения балки с поясами разной толщины в соотношении 1,2:1.

Целевой функцией является площадь поперечного сечения балки:

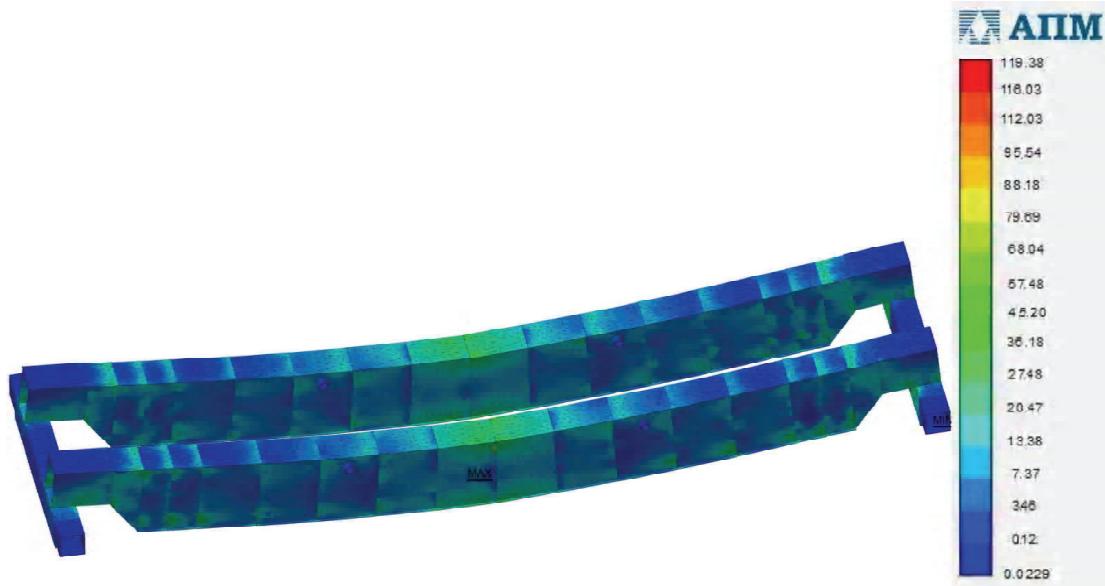
$$F = 2,2B\delta_n + 2H\delta_c = 2W/H + 1,33H\delta_c, \quad (2)$$

где B – ширина поперечного сечения, м;

H – высота поперечного сечения, м;

δ_n – толщина нижнего пояса, м;

а)



б)

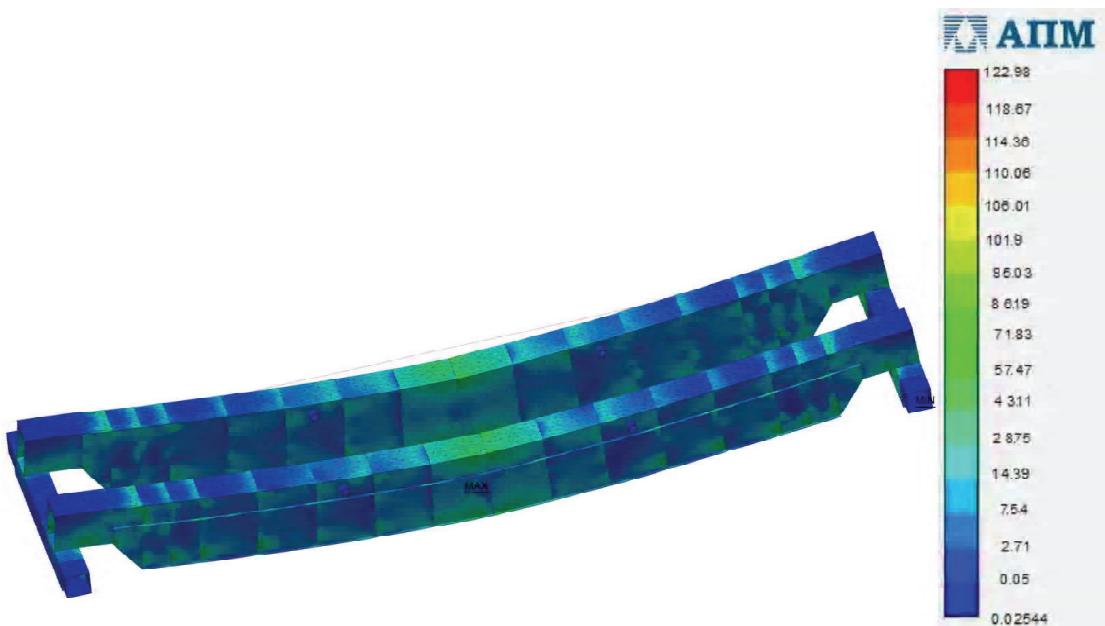


Рисунок 3 – Карты напряжений (МПа) в металлоконструкции пролетного строения мостового крана в базовом (а) и в модернизированном исполнении (б).

δ_c – толщина стенки, м;

$W = M_u / [\sigma]$ – момент сопротивления сечения относительно оси $x-x$;

M_u – максимальный изгибающий момент, действующий в вертикальной плоскости;

$[\sigma]$ – допускаемое нормальное напряжение, МПа.

Зафиксируем толщину стенки δ_c , принимаем для крана КМ-32 толщина стенки $\delta_c = 8$ мм. Тогда продифференцируем целевую функцию по высоте сечения H :

$$\frac{dF}{dH} = -\frac{2W}{H^2} + \frac{4\delta_c}{3} = 0. \quad (3)$$

Откуда определяется оптимальная высота коробчатой балки:

$$H_0 = \sqrt{\frac{3W}{2\delta_c}} = \sqrt{\frac{3M_u}{2\delta_c[\sigma]}}. \quad (4)$$

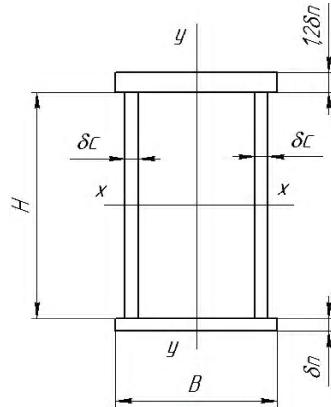


Рисунок 4 – Расчетная схема поперечного сечения коробчатой балки.

Минимальная площадь поперечного сечения коробчатой балки с фиксированной шириной сечения B и поясами разной толщины в соотношении 1,2:1:

$$F_0 = 2,2B\delta_n + 2H_0\delta_c = 2,2B\delta_n + 2,45\sqrt{\frac{M_u\delta_c}{[\sigma]}}. \quad (5)$$

Для крана КМ-32 определяем значения оптимальной высоты и оптимальной площади поперечного сечения при толщине стенки $\delta_c = 8$ мм: $H_0 = 1471$ мм, $F_0 = 0,0389$ м². Сравним с площадью поперечного сечения реальной балки, изображенной на рисунке 1, которая составляет $F = 0,0406$ м² при высоте сечения $H = 1600 - 12 - 10 = 1578$ мм и толщине стенки $\delta_c = 8$ мм. Результаты расчета массы показали: оптимальная балка имеет массу 5 006,4 кг, а масса реальной балки с поперечным сечением, изображенном на рисунке 1, составляет 5 225,2 кг, что превышает оптимальное значение массы балки. Это говорит о том, что высоту балки приняли завышенной при фиксированной толщине стенки 8 мм и ширине сечения 700 мм.

Таким образом, при увеличении высоты сечения в 1,072 раза, то есть на 7,2 %, масса балки увеличилась на 4,3 %. При увеличении высоты балки на 10 % масса увеличивается на 6,1 %. График повышения массы балки (в процентном соотношении γ_m) при увеличении высоты сечения H по сравнению с оптимальной высотой H_0 (в процентном соотношении γ_H) показан на рисунке 5.

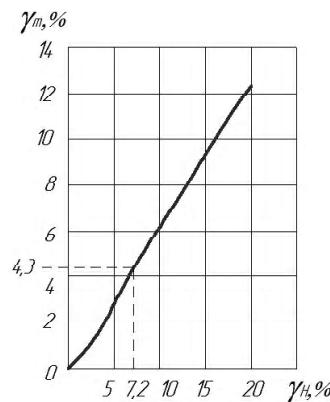


Рисунок 5 – График повышения массы балки при увеличении высоты поперечного сечения балки H относительно оптимальной высоты сечения H_0 (в процентном соотношении).

Зависимость повышения массы балки в процентном соотношении γ_m от увеличения высоты поперечного сечения балки γ_H по отношению к оптимальному значению при разной толщине поясов и фиксированной ширине сечения и толщине стенок с высокой оценкой достоверности аппроксимации $R^2 = 0,9993$ описывается следующей формулой:

$$\gamma_m = 0,6075\gamma_H + 0,0586, \quad (6)$$

где $\gamma_m = \frac{m - m_0}{m_0} \cdot 100\%$ – приращение массы балки m по отношению к оптимальной массе m_0 , %;

$\gamma_H = \frac{H - H_0}{H_0} \cdot 100\%$ – приращение высоты поперечного сечения балки H по отношению к оптимальной высоте H_0 , %.

Далее выполнен расчет массы балки в программном комплексе АРМ FEM: Прочностной анализ для Компас – 3D для базовой и модернизированной модели с учетом всех составных элементов. Результаты расчета массы одной балки представлены на рисунке 6 в виде гистограммы.

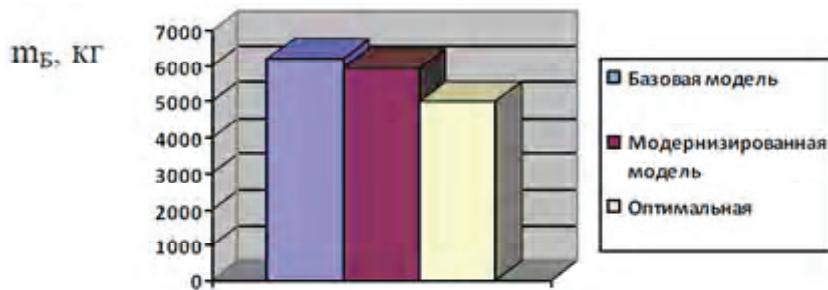


Рисунок 6 – Гистограмма массы главной балки мостового крана КМ-32.

Как видно из полученной гистограммы, масса главной балки для базовой модели составила 6 214,3 кг, а для модернизированной – 5 933 кг.

Масса металлоконструкции всего пролетного строения модернизированной модели составило 13 523 кг и по сравнению с массой базовой модели 14 086 кг она снизилась на 4 %, что позволяет рекомендовать для практического применения предложенную модернизацию главных балок крана, заключающуюся в уменьшении толщины вертикальных диафрагм с 8 до 6 мм и установке дополнительных наружных продольных ребер жесткости.

ВЫВОДЫ

1. Одним из основных направлений совершенствования металлоконструкции мостовых кранов является снижение металлоемкости. В связи с этим предлагается выполнить модернизацию главных балок пролетного строения на примере мостового крана КМ-32, усилив верхний пояс за счет установки дополнительных наружных продольных ребер жесткости при одновременном уменьшении толщины вертикальных диафрагм с 8 мм до 6 мм. При этом сохраняется заданная грузоподъемность 32 т.

2. Выполнено моделирование в программном комплексе АРМ FEM: Прочностный анализ для Компас – 3D базовой и модернизированной моделей моста крана КМ-32.

3. Численный анализ напряженно-деформированного состояния металлоконструкций мостов показал, что прочностные и жесткостные характеристики модернизированной модели мало отличаются от базовой модели.

4. Установлена зависимость повышения массы коробчатой балки при увеличении высоты поперечного сечения балки с разной толщиной поясов балки относительно оптимальной высоты сечения при фиксированных толщинах стенок и ширине поперечного сечения.

5. Определены массы главных балок базовой, модернизированной и оптимальной, а также массы металлоконструкций мостов в целом. Установлено снижение на 4 % металлоемкости модернизированной модели пролетного строения крана по сравнению с базовой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шабашов, А. П. Мостовые краны общего назначения / А. П. Шабашов, А. Г. Лысяков. – 5-е изд., переработанное и дополненное. – Москва : Машиностроение, 1980. – 304 с., ил. – Текст : непосредственный.
2. Анцев, В. Ю. Оптимизация металлических конструкций грузоподъемных машин мостового типа / В. Ю. Анцев, А. С. Толоконников, П. Ю. Калабин. – Текст : непосредственный // Известия ТулГУ. Серия Технические науки. – 2009. – Выпуск 4. – Часть 1. – С. 144–153.

3. Гохберг, М. М. Металлические конструкции подъемно-транспортных машин / М. М. Гохберг. – Ленинград : Машиностроение, 1976. – 454 с. – Текст : непосредственный.
4. Москвичева, Л. Ф. Несущая способность элементов металлоконструкций мостовых кранов при статическом и циклическом нагружениях : специальность 01.02.06 «Динамика, прочность машин, приборов и аппаратурь» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Москвичева Людмила Федоровна ; Красноярский государственный технический университет. – Красноярск, 2002. – 152 с. – Текст : непосредственный.
5. Курсовое проектирование грузоподъемных машин : учебное пособие для студентов машиностроительных специальностей вузов / С. А. Казак, В. Е. Дусье, Е. С. Кузнецов [и др.] ; под редакцией С. А. Казака. – Москва : Высшая школа, 1989. – 319 с. – ISBN 5-06-000143-1. – Текст : непосредственный.
6. Соколов, С. А. Строительная механика и металлические конструкции машин : учебник / С. А. Соколов. – 2-е изд. – Санкт-Петербург : Политехника, 2020. – 423 с. – ISBN 978-5-7325-1093-5. – Текст : электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS : [сайт]. – 2020. – URL: <https://www.iprbookshop.ru/94830.html> (дата обращения: 20.09.2021).
7. АРМ FEM Система прочностного анализа для КОМПАС-3Д : Руководство пользователя. – Москва : Научно-технический центр «Автоматизированное проектирование машин», 2017. – 36 с. – Текст : непосредственный.

Получена 26.10.2021

Т. В. ЛУЦЬКО, О. В. КОНДРИКІНСЬКИЙ, С. О. ТИЩЕНКО
ДО ПИТАННЯ ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ
МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЇ ПРОГОНОВОЇ БУДОВИ МОСТОВОГО КРАНА
ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури»

Анотація. У статті розглянуто питання зниження металоємності металлоконструкції мостового крана при забезпеченні заданої вантажопідйомністі. За об'єктом дослідження прийнято мостовий кран КМ-32 вантажопідйомністю 32 т і прогоном 16,5 м. Пропонується наступна модернізація моста крана: посилити металлоконструкції головних балок прогонової будови за рахунок введення додаткових зовнішніх поздовжніх ребер жорсткості при одночасному зменшенні товщини вертикальних діафрагм, що дозволяє знизити масу моста на 4 %. На основі виконаного чисельного аналізу напруженено-деформованого стану базової і модернізованої конструкції моста в програмному середовищі Компас-3Д АРМ FEM: «Аналіз міцності» встановлені найбільші концентрації напружень і максимальні прогини мостів, а також визначені маси розглянутих конструкцій мостів. Встановлено залежність підвищення маси головної балки прогонової будови крана при збільшенні висоти поперечного перерізу головної балки в порівнянні з оптимальною висотою.

Ключові слова: діафрагма, кран мостовий, маса, металлоконструкція, напруженено-деформований стан, прогин, ребра жорсткості.

TATYANA LUTSKO, ALEXANDER KONDRIKINSKY, SERGEI TISHCHENKO
ON THE ISSUE OF DETERMINING THE RATIONAL PARAMETERS OF THE
METAL STRUCTURE OF THE BRIDGE CRANE SUPERSTRUCTURE
Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

Abstract. The article considers the issue of reducing the metal consumption of the bridge crane metal structure while providing a given load capacity. The KM-32 overhead crane with a lifting capacity of 32 tons and a span of 16.5 m was adopted as the object of research. The following modernization of the crane bridge is proposed: to strengthen the metal structures of the main beams of the superstructure by introducing additional external longitudinal stiffeners while reducing the thickness of the vertical diaphragms, which reduces the weight of the bridge by 4 %. Based on the numerical analysis of the stress-strain state of the basic and upgraded bridge structure in the Kompass – 3D APM FEM: «Strength Analysis» software environment, the greatest stress concentrations and maximum deflections of bridges were established, and the masses of the bridge structures under consideration were determined. The dependence of the increase in the mass of the main beam of the crane superstructure with an increase in the height of the cross-section of the main beam compared with the optimal height is established.

Key words: diaphragm, bridge crane, mass, metal structure, stress-strain state, deflection, stiffeners.

Луцко Татьяна Васильевна – кандидат технических наук, доцент кафедры наземных транспортно-технологических комплексов и средств ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: статика и динамика грузоподъемных кранов.

Кондрыйкинський Александр Владимирович – магістрант по напрямленню підготовки 23.04.02 «Наземні транспортно-технологіческі комплекси» ГОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: исследование напряженно-деформированного состояния металлоконструкций грузоподъемных машин.

Тищенко Сергей Олександрович – магістрант по напрямленню підготовки 23.04.02 «Наземні транспортно-технологіческі комплекси» ГОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: исследование напряженно-деформированного состояния металлоконструкций грузоподъемных машин.

Луцько Тетяна Василівна – кандидат технічних наук, доцент кафедри наземних транспортно-технологіческих комплексів та засобів ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: статика і динаміка вантажопідйомних кранів.

Кондрикінський Олександр Володимирович – магістрант за напрямом підготовки 23.04.02 «Наземні транспортно-технологічні комплекси» ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: дослідження напружено-деформованого стану металоконструкцій вантажопідйомних машин.

Тищенко Сергій Олександрович – магістрант за напрямом підготовки 23.04.02 «Наземні транспортно-технологічні комплекси» ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: дослідження напружено-деформованого стану металоконструкцій вантажопідйомних машин.

Lutsko Tatyana – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Land Transport and Technological Complexes and Facilities Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: statics and dynamics of lifting cranes.

Kondrykinsky Alexander – master's student, in the field of training 23.04.02 Land Transport and Technological Complexes and Facilities, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: research of stress-strain state of metal structures of lifting machines.

Tishchenko Sergei – master's student, in the field of training 23.04.02 Land Transport and Technological Complexes and Facilities, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: research of stress-strain state of metal structures of lifting machines.