



УДК 621.874

А.А. Мирошников
ГОУ ВПО ЛНР «Луганский национальный
университет им. В. Даля»
г. Луганск, Украина
E-mail: Topalexengineering@gmail.com
Дата поступления 30.11.2019

ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ БАЛОК КОРОбЧАТОГО СЕЧЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Аннотация

Кафедра подъемно-транспортной техники Луганского национального университета им. В. Даля занимается общими вопросами, проектирования, расчета и эксплуатации металлоконструкций грузоподъемных машин. Проблема определения остаточного ресурса кранов выдвигает задачу исследования стальных конструкций крановых мостов с целью выявления фактического распределения деформаций и напряжений по сечениям соответствующих балок. В современных мостовых кранах общего назначения применяются как правило мосты открытого типа с главными балками коробчатого сечения. При расчете таких балок используют элементарную теорию изгиба. Однако влияние рельсов, особенно при нежестком креплении их к балкам (при помощи накладок), а также влияние диафрагм на распределение деформаций по сечению балки, в основном не учитывается. Исходя из вышесказанного возникает вопрос, что значение фактических условий работы стальных конструкций и, в частности, знание фактического распределения деформаций и напряжений в сечении главной балки, а также влияние рельса, диафрагм на величину и характер распределения деформаций может оказать серьезное влияние на определение остаточного ресурса металлоконструкций.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние металлоконструкции, метод конечных элементов, коробчатая балка, мостовой кран, остаточный ресурс.

Введение

Практика эксплуатации грузоподъемных кранов на машиностроительных и металлургических заводах показывает, что интенсивность коррозии металлоконструкции зависит от ее типа и места установки крана. Вопрос о распределении деформаций по ширине поясов и по высоте стенок главных балок крановых мостов в технической литературе по существу не освещен, что в значительной степени затрудняет определение остаточного ресурса [1-4]. Поэтому проведение расчетов с помощью 3D моделирования металлоконструкций крана различных типов, в частности балок коробчатого сечения представляет собой весьма важную задачу. Инженерные задачи расчета металлоконструкций на прочность, жесткость и устойчивость, как правило, решаются методами строительной механики.

Однако инженерные конструкции представляют собой сложные непрерывные системы, анализ которых занимает большой объем времени, и не всегда приводит к требуемому результату. Метод конечных элементов (МКЭ) является одним из самых распространенных методов решения прикладных задач. Диапазон его применения чрезвычайно широк: строительство и машиностроение, гидро- и аэродинамика, горное дело и новейшая техника, а также различные задачи математической физики – теплопроводности, фильтрации, распространения волн и т. д. [5,6].

Следует отметить, что возникновение МКЭ и его развитие связано, прежде всего, с решением задач строительной механики. В настоящее время он успешно применяется при расчете самых разнообразных строительных конструкций как стержневых, так и континуальных.

Метод конечных элементов, как и многие другие численные методы, основан на представлении реальной континуальной конструкции ее дискретной моделью и замене дифференциальных уравнений, описывающих напряженно-деформированное состояние сплошных тел, системой алгебраических уравнений. Вместе с тем МКЭ допускает ясную геометрическую, конструктивную и физическую интерпретацию.

Основная часть

Цель данной статьи представить варианты расчета напряженно-деформированного состояния металлоконструкции двухбалочного мостового грейферного крана грузоподъемностью 5 т., пролетом 22,5 м., при действии на него вертикальных и горизонтальных сил, с учетом возникновения возможных усталостных дефектов.

Расчетный случай нагружения описан следующим образом [7-11]. Тележка крана смещена на $\frac{1}{4}$ от середины пролета. Учитывается одновременно действие нагрузок в следующих случаях: подъем груза и движение крана. Расчетные вертикальные нагрузки на главные балки крана с учетом коэффициента динамичности: $q_{об} = 2,5кН$ - погонная нагрузка от собственного веса главной балки с площадками; $G_{мех} = 5,3кН$ - нагрузка от механизмов передвижения; $G_{эл.с} = 20,5кН$ - нагрузка от электрооборудования; $G_{кб} = 14,4кН$ - полный вес кабины крана; $G_{т} = 23,3кН$ - сила давления одного колеса тележки на рельс; $P_{д} = 41,4кН$ - динамическая нагрузка механизма подъема.

Расчетные вертикальные нагрузки на главные балки крана приняты согласно методике [7] (рисунок 1.).

При расчете кранового моста на горизонтальные нагрузки принята расчетная схема – главные и концевые балки образуют статически неопределимую плоскую раму, нагруженную системой сил в своей плоскости (рисунок 2).

Горизонтальные нагрузки представлены в виде сосредоточенных динамических нагрузок от массы тележки и груза, передающиеся на металлоконструкцию в местах контакта ходовых колес тележки с

рельсами ($P_r = 2476$ Н.). Также распределенная динамическая нагрузка, приходящаяся на одну балку, определяется исходя из равенства изгибающих моментов в среднем сечении главных балок от сосредоточенной и распределенной нагрузок ($q_r = 428,6$ Н/м.).

Модель крана в программе создана с учетом всех геометрических характеристик и построена в натуральном масштабе.

Расчетная модель была построена с учетом всех факторов влияния вертикальных и горизонтальных сил. Учитываются физические свойства материала всех изделий (Ст3 ГОСТ 380-2005). Фиксация модели происходит по принципу шарнира, что имитирует установку крана на колеса. Модель представляет собой сборку, что позволяет задать свойства контактов элементов. Эта характеристика позволяет рассматривать жесткость модели, приближенной к реальной конструкции, и не делает ее монолитным изделием. Конечно-элементная модель включает в себя более 600 тысяч элементов и 1 миллион 200 тысяч узлов, что является высоким показателем качества сетки.

Прежде всего проведем расчет 3D модели, с учетом установленного рельса для перемещения грузовой тележки и без него. Для выявления влияния рельса на напряжения и прогиб производился контроль напряжений и прогиба в среднем сечении двух главных балок. Сечение взято как площадка с размерами 50x560 мм. Результаты расчета приведены в таблице 1.

Напряжения распределяются как правило по площадкам контакта сил имитирующие давление колес тележки на рельс, и передаются на верхний пояс. Повышена концентрация напряжений на больших диафрагмах, а также изменение поля напряжений в нижнем поясе. По характеру распределения значений напряжений в нижнем поясе с настилом, зондирование точек показывает, что точки, которые ближе к внутренней стенке имеют большее численное значение напряжения, это связано с действием горизонтальной силы на металлоконструкцию.

Внутренняя коррозия элементов металлоконструкции имеет характер сложный, а иногда и вовсе неподдающийся контролю. Как правило — это связано с невозможностью осмотра внутренней поверхности металла в балке коробчатого сечения. Оценка с помощью методов неразрушающего контроля может дать предварительную картину, но далеко не полную так как замерить огромное количество точек на

кранах с пролетом 22,5 м. и выше, просто становится невыполнимой задачей. Поэтому выполнен расчет напряженно-деформированного состояния металлоконструкции с имитацией потери несущей способности путем уменьшения толщины боковых стенок, а также верхнего и нижнего пояса по всей его длине. Имитация проводилась в балке с настилом, как более нагруженной.

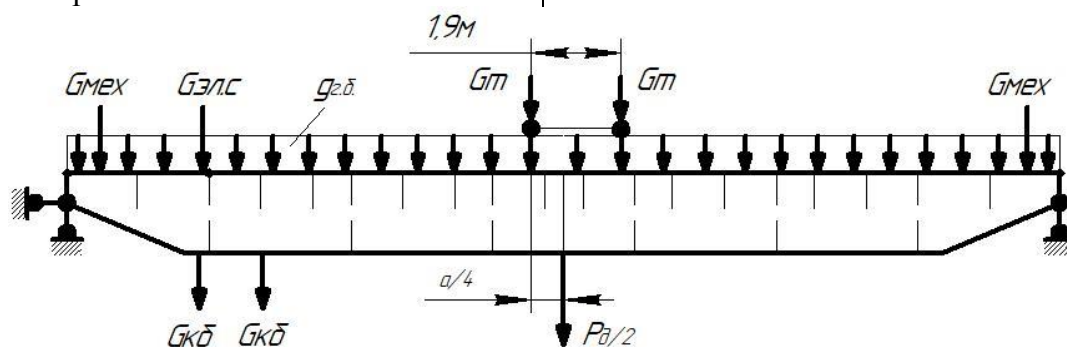


Рисунок 1. Расчетная схема моста крана при расчетах на вертикальные нагрузки

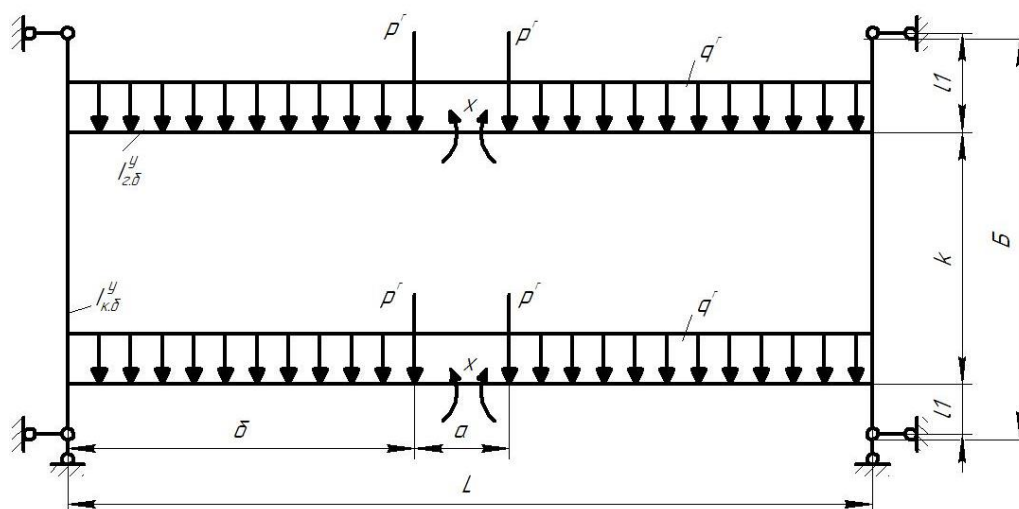


Рисунок 2. Расчетная схема моста крана при расчетах на горизонтальные нагрузки

Таблица 1

Результаты напряженно-деформированного состояния

Элементы контроля	Расчет с рельсом	Расчет без рельса
Напряжение нижнего пояса (МПа)	53	56
Напряжение нижнего пояса с настилом (МПа)	78	80
Напряжение верхнего пояса (МПа)	65	68
Напряжение верхнего пояса с настилом (МПа)	88	92
Прогиб нижнего пояса (мм)	19	22
Прогиб нижнего пояса с настилом (мм)	29	33

Дальнейшие расчеты проводим без учета рельса, т.к. его влияние на общую

жесткость незначительно, а скорость расчета увеличивается путем уменьшения количества конечных элементов.

Рассмотрим места, наиболее нагруженные в данной металлоконструкции крана. Основная концентрация напряжений находится в месте приварки большой диафрагмы к верхнему поясу.

Здесь следует обратить внимание на сварные швы, прикрепляющие большие и малые диафрагмы к листу верхнего пояса. Трещины появляются в сварных швах, после чего происходит обмятие верхней кромке диафрагм. Этому подвержены как правило краны общего назначения и специальные краны с тяжелым режимом работы работающие свыше 10 лет.

В стыке листа перехода нижнего пояса на сужение образуется повышенная концентрация напряжений. За данной зоной требуется повышенный контроль так как она является классическим местом образования усталостных трещин в металлоконструкции крана. Этому подвержены краны всех типов, отработавшие более 12 лет. Нагрузки, вызванные как, правило при передвижении тележки, подъема и опускания груза которые стремятся оторвать пояс от стенки. Усталостные трещины образуются в сварном шве, ниже точки перегиба пояса, распространяется до линиигиба и

переходит в лист стенки. Дефекты и остаточные напряжения в шве способствуют снижению остаточного ресурса.

Зона листа верхнего пояса в местах примыкания главных балок к концевым. Конструктивный концентратор напряжений, образованный приваркой усиливающих элементов, изменением ширины и толщины поперечного сечения пояса. Эти концентраторы напряжений возникают вследствие нагрузок вызывающие изгиб рамы моста в горизонтальной плоскости при пуске и торможении крана. Этому подвержены краны всех типов, отработавшие от 2 до 10 лет зависимости от режима работы. Усталостные трещины образуются при действии переменных напряжений от вертикальных, продольных и поперечных нагрузок в контактах колесо-рельс, вызывающих кручение и изгиб рамы моста в горизонтальной плоскости. Также образованию трещин способствует конструктивные концентраторы напряжений, дефекты и остаточные напряжения в местах сопряжения листа с усиливающими элементами. На ускоренное появление трещин может влиять деформационное старение стали.

Таблица 2

Результаты напряженно-деформированного состояния при потере несущей способности в балке с настилом вследствие внутренней коррозии

Элементы контроля	Потеря несущей способности				
	0%	5%	10%	20%	30%
Напряжение нижнего пояса (МПа)	56	71	89	97	105
Напряжение нижнего пояса с настилом (МПа)	80	92	110	121	126
Напряжение верхнего пояса (МПа)	68	88	98	108	114
Напряжение верхнего пояса с настилом (МПа)	92	101	107	118	123
Прогиб нижнего пояса (мм)	22	24,5	28	31	32
Прогиб нижнего пояса с настилом (мм)	33	36	38	42	43

Выводы

Имитационное моделирование позволяет получить более точную и наглядную картину распределений напряжений по

всей металлоконструкции. Проанализировать выбранный участок. Однако адекватность результатов напрямую зависят от точности созданной модели, что влечет за

собой повышенную трудоемкость подготовки к расчетам.

Результаты имитационного моделирования позволяют сделать следующие выводы:

1. Результаты расчетов показали, что учет рельса в 3D модели балки увеличивает ее общую жесткость на 4% и уменьшает прогиб на 15%.
2. Моделирование потери несущей способности дает наглядную картину распределения напряжений и прогиба балки. Сравнение этих данных с накопленной информацией испытаний крана позволяет делать предположения о усталостных дефектах, коррозии, внутри металлоконструкции. Это информация является ценной в тех случаях, когда при испытаниях фиксируют возросший прогиб моста без видимых внешних дефектов. Тогда стоит провести более точное измерение толщин металла с помощью методов неразрушающего контроля. Как правило уменьшение толщины боковых стенок балки практически не влияют на общий прогиб. Основную нагрузку несет верхний и нижний пояс [12-14]. Контроль именно этих элементов является приоритетным.
3. На базе полученной модели можно видеть зоны концентраций напряжений, за которыми стоит повысить контроль при эксплуатации конструкции.
4. Построение расчетной модели является сложным и трудоемким процессом, и имеет смысл в тех случаях, когда грузоподъемная машина отработала свой нормативной срок службы, эксплуатируется в агрессивной среде, а также при росте прогиба во время испытаний без видимых на то причин.
5. У кранов, работающих на открытых эстакадах, наиболее интенсивно корродируют листовые металлоконструкции коробчатого сечения из-за постоянного накопления воды во внутренних полостях. На главных

балках коробчатого сечения пролетного строения рельсы к листу верхнего пояса крепятся болтами. Через отверстия вода протекает внутрь балок увеличивая динамические нагрузки на всю металлоконструкцию. Именно для таких случаев построение расчетных моделей и их анализ на базе метода конечных элементов может дать наглядную картину внутреннего состояния металла [15].

Библиографический список

1. Мирошников А.А., Будиков Л.Я., Рекиян П.Н. Анализ напряженно-деформированного состояния металлоконструкции с помощью тензометрии на базе аналого-цифрового преобразователя // Механическое оборудование металлургических заводов. – 2018, № 2(11), стр. 32-37.
2. Будиков Л. Я., Мирошников А. А., Криничный П. Ю. Усовершенствование метода статических испытаний мостовых кранов позволит получать важные параметры оценки их остаточного ресурса // Подъемно-транспортное дело. – 2018, № 1-2, стр. 10-13.
3. Дубинин С.Ф. Диагностика кранов нуждается в улучшении // Подъемно-транспортное дело. – 2009, № 1. – С. 9-10.
4. Никитин К.Д., Крычина Т.А., Кузнецов А.А. Аварии грузоподъемных кранов как следствие опасных дефектов // Подъемно-транспортное дело. – 2007, № 6. – С. 17-21.
5. Компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния рабочих валков стана асимметричной прокатки дуо-400 / А.М. Песин, Д.О. Пустовойтов, Т.В. Швейва и др. // Механическое оборудование металлургических заводов. – 2018, № 2(11), стр. 3-9.
6. Применение метода конечных элементов к расчету конструкций: Учеб. пособие для техн. вузов / Р. А. Хечумов, Х. Кепплер, В. И. Прокопьев; Под ред. Р. А. Хечумова. – М.: Изд-во АСВ, 1994. – 353 с.

7. Методические указания к расчету несущих металлических конструкций мостовых кранов. Сост.: Л.Я. Будиков, А.В. Зеленко. – Луганск: Изд-во Восточноукр. Нац. университета им. В.Даля, 2003. – 44с.
8. ГОСТ 33169-2014. Краны грузоподъемные. Металлические конструкции. Подтверждение несущей способности. -М.: Стандартифом, 2015. – 30 с.
9. 1. РД 09-102-95. Методические указания по определению остаточного ресурса потенциально опасных объектов, поднадзорных ГОСГОРТЕХНАДЗОРУ России.
10. РД 22 28 36 01. Краны грузоподъемные. Типовые программы и методики испытаний.
11. РД 10-112-1-04. Рекомендации по экспертному обследованию грузоподъемных машин. Общие положения.
12. Концевой Е.М., Розеншейн Б.М. Ремонт крановых металлоконструкций. – М.: Машиностроение, 1979. – 206 с.
13. ISO 5817:2003 Welding — Fusion-welded joints in steel, nickel, titanium and their alloys (beam welding excluded) — Quality levels for imperfections (Сварка. Сварные соединения из стали, никеля, титана и их сплавов, полученные сваркой плавлением (исключая лучевые способы сварки). Уровни качества)
14. Александров А. В., Потапов В. Д., Державин Б. П. Соппротивление материалов. – М.: Высш. шк., 2000. – 560 с.
15. Дойхен Ю. М., Ким Т. С., Ловцов А. Д., Тен Е. С. Расчет конструкций, контактирующих с упругим основанием: Учеб. пособие. – Хабаровск: Изд-во Хабар. гос. техн. ун-та, 2001. – 203 с.

Information about the paper in English

A.A. Miroshnikov
 Dal Lugansk National University
 Lugansk, Ukraine
 E-mail: Topalexengineering@gmail.com
 Received 30.11.2019

STUDYING MODELS OF BOX GIRDERS BY A FINITE ELEMENT METHOD

Abstract

The Department of Handling and Lifting Equipment of Dal Lugansk National University studies general issues of design, calculations and operation of steel structures of lifting machines. Difficulties related to calculating remaining operating life of cranes result in setting the task of studying steel structures of crane bridges to identify an actual distribution of stress and strain by sections of relevant girders. Modern EOT cranes of a general application are designed, as a rule, with open-type bridges with main box girders. When making calculations for such girders, the elementary bending theory is used. However, in general the impact of rails, especially if they are not rigidly fixed to girders (using cover plates), and the impact of diaphragms on the distribution of strain along the section of the girder are not considered. In view of the above, actual operation conditions of steel structures and, in particular, actual distribution of stress and strain in the section of a main girder, as well as the impact of rails, diaphragms on the value and nature of distribution of strain may have a considerable influence on finding remaining operating life of steel structures.

Keywords: stress and strain state of steel structures, finite element method, box girder, EOT crane, remaining operating life.