

УДК 621.874

## ОЦЕНКА НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ РАМЫ ГРУЗОВОЙ ТЕЛЕЖКИ МОСТОВОГО КРАНА ПРИ РЕКОНСТРУКЦИИ

Белякова Карина Дмитриевна<sup>1</sup>, бакалавр

e-mail: [karinabelakova0592@gmail.com](mailto:karinabelakova0592@gmail.com)

Никитаев Игорь Владимирович<sup>1</sup>, кандидат технических наук, доцент

e-mail: [inikitaev@bk.ru](mailto:inikitaev@bk.ru)

<sup>1</sup> Волжский государственный университет водного транспорта, Нижний Новгород, Россия

**Аннотация.** В статье рассматривается вопрос реконструкции грузовой тележки мостового крана грузоподъемностью 4 тонны. Основной целью работы является снижение металлоемкости конструкции при сохранении ее несущей способности. Выполнено 3D-моделирование рамы тележки в среде КОМПАС-3D. Прочностной расчет реализован методом конечных элементов в программном комплексе APM FEM. С использованием методик, изложенных в учебнике С.А. Соколова, проведен анализ усталостной прочности модернизированной конструкции: определены эквивалентные напряжения, дана оценка предела выносливости сварного узла.

**Ключевые слова:** мостовой кран, грузовая тележка, реконструкция, метод конечных элементов, КОМПАС-3D, APM FEM, усталостная прочность, предел выносливости.

## EVALUATION OF THE LOAD-BEARING CAPACITY AND DURABILITY OF THE FRAME OF THE OVERHEAD CRANE TROLLEY DURING RECONSTRUCTION

Karina D. Belyakova<sup>1</sup>, Bachelor's Degree Student

e-mail: [karinabelakova0592@gmail.com](mailto:karinabelakova0592@gmail.com)

Igor V. Nikitaev<sup>1</sup>, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

e-mail: [inikitaev@bk.ru](mailto:inikitaev@bk.ru)

<sup>1</sup> Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia

**Abstract.** This article examines the reconstruction of a 4-ton overhead crane trolley. The primary objective is to reduce the structural metal content while maintaining its load-bearing capacity. 3D modeling of the trolley frame was performed using KOMPAS-3D. Strength analysis was performed using the finite element method in the APM FEM software package. Using the methods outlined in S.A. Sokolov's textbook, a fatigue strength analysis of the modernized structure was conducted: equivalent stresses were determined, and the fatigue limit of the welded joint was estimated.

**Keywords:** overhead crane, trolley, reconstruction, finite element method, KOMPAS-3D, APM FEM, fatigue strength, endurance limit.

## **Введение**

Мостовые краны являются неотъемлемой частью технологического оборудования современных промышленных предприятий, складов и строительных площадок. В процессе длительной эксплуатации их металлоконструкции подвергаются значительному износу, что приводит к снижению надежности и безопасности. Альтернативой дорогостоящей полной замене оборудования выступает реконструкция (модернизация), направленная на обновление узлов, снижение металлоемкости и продление срока службы [1, 3].

Одним из наиболее нагруженных узлов является грузовая тележка, воспринимающая вес поднимаемого груза и динамические нагрузки при передвижении. Снижение массы тележки позволяет уменьшить общую нагрузку на мост крана и подкрановые пути, а также снизить энергопотребление приводов. Однако любое изменение геометрии несущих элементов требует тщательной проверки не только на статическую прочность, но и на сопротивление усталости, учитывая циклический характер нагружения крановых конструкций. Как отмечает С.А. Соколов [2], эксплуатационное нагружение элементов конструкций всегда нестационарно, и прогнозирование усталостной долговечности является одной из ключевых задач при проектировании и реконструкции подъемно-транспортных машин.

**Целью данной работы** является разработка и верификация облегченной конструкции рамы грузовой тележки мостового крана г/п 4 т, обеспечивающей выполнение условий статической прочности и обладающей достаточным запасом усталостной долговечности в условиях типового эксплуатационного нагружения.

## **Анализ конструкции и методика исследования**

Объектом исследования является грузовая тележка мостового крана грузоподъемностью 4 тонны. Исходная конструкция представляет собой сварную раму из стальных швеллеров, на которой смонтированы механизм подъема и механизм передвижения.

Для достижения поставленной цели в работе решались следующие задачи:

1. Разработка 3D-модели рамы в системе автоматизированного проектирования КОМПАС-3D.
2. Проведение прочностного расчета методом конечных элементов (МКЭ) в модуле АРМ FEM для оценки напряженно-деформированного состояния (НДС).
3. Оценка статической прочности путем сравнения эквивалентных напряжений с пределом текучести материала.
4. Выполнение оценки усталостной долговечности модернизированной рамы с применением аналитических методов, изложенных в работе [2]. Это включает определение параметров нагружения, эквивалентных напряжений и сравнение их с пределом выносливости для соответствующего типа сварного узла.
5. Анализ результатов и формулировка выводов о возможности эксплуатации модернизированной конструкции.

Метод конечных элементов выбран как наиболее эффективный инструмент для анализа сложных сварных конструкций, позволяющий учитывать геометрию деталей, граничные условия и приложенные нагрузки [4].

## **Моделирование и прочностной расчет рамы тележки**

### **Создание расчетной модели**

Трехмерная геометрическая модель рамы (Рисунок 1) создана в среде КОМПАС-3D. Основным материалом конструкции принята сталь марки Ст3, обладающая хорошей

свариваемостью и достаточной прочностью для данного класса оборудования. Физико-механические характеристики материала [5]:

- Предел текучести ( $\sigma_T$ ): 235 МПа;
- Предел прочности ( $\sigma_B$ ): 370–510 МПа;
- Модуль упругости (E): 200 ГПа;
- Коэффициент Пуассона ( $\nu$ ): 0,3.

Для проведения расчетов модель была импортирована в расчетный модуль АРМ FEM. Граничные условия заданы в виде закреплений в местах установки ходовых колес.

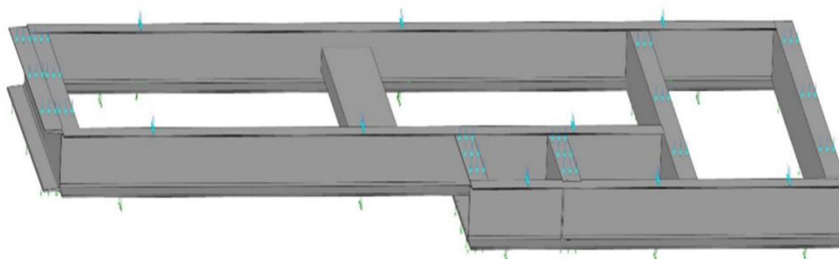


Рисунок 1 – Трехмерная геометрическая модель рамы создана в среде КОМПАС-3D

### Приложение нагрузок

Основной нагрузкой на раму является вес поднимаемого груза, передаваемый через механизм подъема на опорные поверхности рамы. Суммарная номинальная нагрузка ( $F$ ) с учетом веса груза и грузозахватных приспособлений составила 46 000 Н. Нагрузка прикладывалась равномерно распределенной по опорным поверхностям (Рисунок 1). Собственный вес конструкции учитывался автоматически заданием плотности материала.

### Результаты расчета МКЭ

Для конечно-элементного разбиения использовались 10-узловые тетраэдры второго порядка точности, что обеспечивает высокую точность вычислений. Количество элементов в модели составило 178 394, узлов – 359 717.

В результате расчета получены поля распределения напряжений (Рисунок 2).

Анализ НДС (Рисунок 2) показывает, что максимальные эквивалентные напряжения ( $\sigma_{max}$ ) в конструкции возникают в зонах концентраторов – в местах пересечения швеллеров и вблизи опорных узлов. Расчетное значение максимальных напряжений составило **129,9 МПа**.

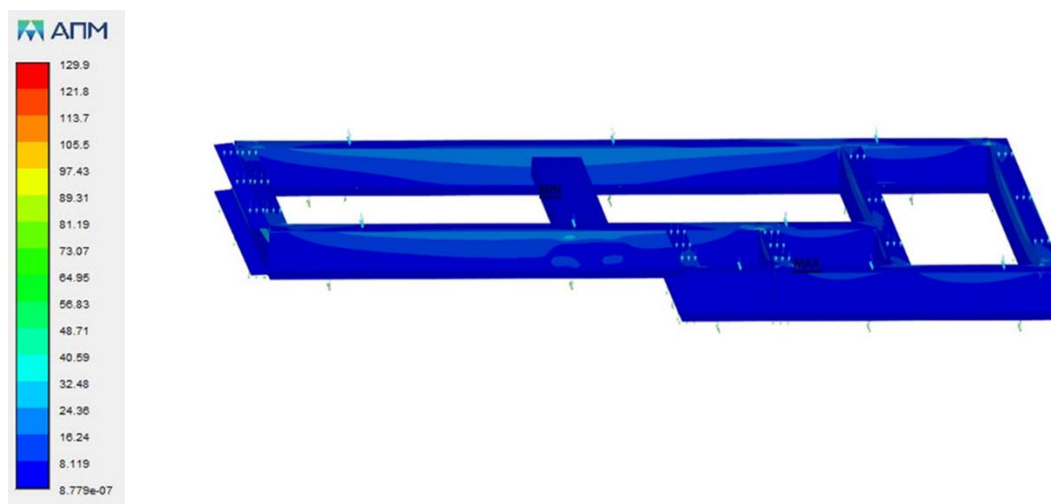


Рисунок 2 – Анализ напряженно-деформированного состояния рамы

## Оценка статической прочности

Условие статической прочности выполняется, так как соблюдается неравенство:

$$\sigma_{max} \leq [\sigma] \quad (1)$$

где  $[\sigma] = \sigma_T / [n]$  – допускаемое напряжение;

$[n]$  – нормативный коэффициент запаса прочности.

При  $\sigma_T = 235$  МПа и минимальном рекомендуемом коэффициенте запаса для подобных конструкций  $[n] = 1,4$ , допускаемое напряжение составит  $[\sigma] \approx 168$  МПа. Полученное в расчете значение 129,9 МПа ниже допускаемого, что подтверждает статическую прочность модернизированной рамы.

## Оценка усталостной долговечности рамы

Учитывая, что кран работает в повторно-кратковременном режиме, его металлоконструкция подвержена циклическим нагрузкам. Для прогнозирования срока службы модернизированной рамы необходимо выполнить проверку на сопротивление усталости согласно методикам, изложенным в работе С.А. Соколова [2].

## Определение параметров нагружения и эквивалентных напряжений

В соответствии с [2], реальный нестационарный процесс нагружения крана может быть заменен эквивалентным стационарным. При проектировочной оценке можно использовать упрощенный подход, основанный на глобальном цикле нагружения.

Для рамы тележки, воспринимающей нагрузку от веса груза и подвески, характерен от нулевой цикл нагружения ( $R=0$ ), так как минимальное напряжение в элементе соответствует его ненагруженному состоянию ( $\sigma_{min}=0$ ), а максимальное – рабочему состоянию с грузом ( $\sigma_{max}$ ).

Эквивалентное напряжение ( $\sigma_{ef}$ ), приведенное к симметричному циклу ( $R=-1$ ), может быть определено по формуле (5.1.18) из [2]:

$$\sigma_{ef} = 0,5 \cdot (1 - R) \cdot \sigma_{max} = 0,5 \cdot \sigma_{max} \quad (2)$$

Принимая в запас прочности  $\sigma_{max}$  равным максимальным напряжениям, полученным в МКЭ-расчете (129,9 МПа), получаем:

$$\sigma_{ef} = 0,5 \cdot 129,9 \approx 65 \text{ МПа}$$

## Определение предела выносливости сварного узла

Предел выносливости сварного узла при симметричном цикле ( $\sigma_{-1K}$ ) определяется по формуле (5.3.1) [2]:

$$\sigma_{-1K} = k_t \cdot \sigma_{-1KB} \quad (3)$$

где  $\sigma_{-1KB}$  – базовый предел выносливости для соответствующей группы концентраторов (табл. 5.3.1 [2]);

$k_t$  – коэффициент влияния толщины.

Рама тележки представляет собой сварную конструкцию. Наиболее вероятным местом усталостного разрушения являются сварные соединения швеллеров. Согласно классификации в табл. 5.3.2 [2], данное соединение можно отнести к группе 16 ("Стыковое

соединение элементов из фасонного проката") при нормальном качестве исполнения (QN). Для этой группы при симметричном цикле базовый предел выносливости составляет  $\sigma_{-1KB} \approx 50$  МПа (значение уточнено по контексту таблицы для группы 5-7).

Коэффициент влияния толщины  $k_t$  рассчитывается по формуле (5.3.2) [2]:

$$\kappa_t = (t_0 / t)^{0,2} \quad (4)$$

где  $t_0 = 20$  мм – базовое значение толщины;

$t$  – толщина свариваемого элемента. Для используемого швеллера характерная толщина стенки составляет примерно 8 мм.

$$k_t = (20/8)^{0,2} = (2,5)^{0,2}$$

Вычисление:

$$2,5^{0,2} = e^{0,2 \cdot \ln(2,5)} \approx e^{0,2 \cdot 0,916} \approx e^{0,1832} \approx 1,2$$

Таким образом, предел выносливости сварного узла рамы при симметричном цикле составит:

$$\sigma_{-1K} = 1,2 \cdot 50 = 60 \text{ МПа}$$

### Проверка условия усталостной прочности

Для проверки на неограниченную долговечность используется условие (5.4.4) из [2] в рамках расчета по допускаемым напряжениям (СРДН):

$$k_a \cdot \sigma_{ef} \leq [\sigma_{-1K*}] = \frac{\sigma_{-1K} m \sqrt[0,4]{0,4}}{n} \quad (5)$$

Примем: коэффициент концентрации  $k_a = 1,2$  (учитывает наличие сварных швов), показатель степени усталостной кривой  $m = 3,5$  (рекомендация для сварных узлов),  $\sqrt[0,4]{0,4} \approx 0,75$ , коэффициент запаса  $n = 1,4$ .

Левая часть условия:

$$k_a \cdot \sigma_{ef} = 1,2 \cdot 65 = 78 \text{ МПа}$$

Правая часть условия (предел ограниченной выносливости на базе  $N_0 = 2 \cdot 10^6$ ):

$$[\sigma_{-1K*}] = \frac{60 \cdot 0,75}{1,4} = \frac{45}{1,4} \approx 32,1 \text{ МПа}$$

Полученное неравенство  $78 \leq 32,1$  не выполняется. Это означает, что при заданных параметрах конструкция не удовлетворяет условию неограниченной долговечности. Следовательно, ее ресурс будет ограниченным.

### Оценка ограниченной долговечности

Если условие неограниченной долговечности не выполняется, это не означает непригодность конструкции. Необходимо проверить, что фактический срок службы (число циклов нагружения) будет достаточным. Число циклов до разрушения  $N$  определяется из уравнения усталостной кривой [2]:

$$N = N_0 \left( \frac{\sigma_{-1K}}{k_a \cdot \sigma_{ef}} \right)^m \quad (6)$$

Подставляем значения:

$$N = 2 \cdot 10^6 \cdot \left( \frac{60}{78} \right)^{3,5}$$

$$\frac{60}{78} \approx 0,77$$

$$0,77^{3,5} = 0,77^3 \cdot \sqrt{0,77} \approx 0,456 \cdot 0,877 \approx 0,4$$

$$N \approx 2 \cdot 10^6 \cdot 0,4 = 8 \cdot 10^5 \text{ циклов}$$

Полученное значение  $N=800000$  циклов является расчетной долговечностью конструкции до образования усталостной трещины. Для крана среднего режима работы (группа 4М), работающего в несколько смен, такое количество циклов может соответствовать нескольким годам эксплуатации. В реальных условиях, благодаря неполной загрузке, нестационарности процесса и качественному изготовлению, фактическая долговечность может быть выше [2].

### Заключение

В результате выполнения работы была спроектирована рама грузовой тележки мостового крана грузоподъемностью 4 тонны. Применение CAD/CAE-систем (КОМПАС-3D, АРМ FEM) позволило детально проанализировать напряженно-деформированное состояние конструкции и подтвердить ее статическую прочность.

### Основные выводы:

Максимальные эквивалентные напряжения в раме, полученные методом конечных элементов, составляют 129,9 МПа, что значительно ниже предела текучести стали Ст3 (235 МПа). Это гарантирует статическую прочность конструкции.

С использованием методик С.А. Соколова [2] выполнена оценка усталостной долговечности. Расчетное эквивалентное напряжение для наиболее нагруженной зоны составило 65 МПа, предел выносливости сварного узла – 60 МПа.

Условие неограниченной долговечности для данного узла не выполняется, что характерно для многих сварных конструкций реальных машин [2].

Расчетная ограниченная долговечность (ресурс до образования трещины) составила порядка **800 000 циклов нагружения**. Это позволяет прогнозировать достаточный срок службы модернизированной тележки при типовых режимах эксплуатации крана.

Для обеспечения проектной долговечности необходимо строго соблюдать технологию сварки, обеспечивая плавные переходы и качественное выполнение швов, что снижает концентрацию напряжений [2].

Разработанная конструкция рекомендуется к внедрению после проведения натурных испытаний и соответствующего согласования с надзорными органами.

### Список литературы:

1. Константинов, В. Ф. Грузоподъемные и транспортирующие машины: учебное пособие для СПО / В. Ф. Константинов. — 2-е изд., стер. — Санкт-Петербург: Лань, 2025. — 176 с.
2. Соколов, С. А. Металлические конструкции подъемно-транспортных машин / С. А. Соколов. — Санкт-Петербург: Политехника, 2005. — 423 с.



3. Михайлов, С. В. Устройство и эксплуатация грузоподъемных кранов. Практическое пособие / С. В. Михайлов, И. И. Коврик, В. А. Малявко. — Минск: ГИПК «ГАЗ-ИНСТИТУТ», 2024. — 132 с.
4. Кудрявцев, Е. М. Компьютерное моделирование, проектирование и расчет элементов машин и механизмов / Е. М. Кудрявцев. — М.: Издательство АСВ, 2018. — 328 с.
5. Марочник сталей и сплавов / Под ред. В. Г. Сорокина. — М.: Машиностроение, 2016. — 640 с.

