

## ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ РАМЫ ШАССИ АВТОМОБИЛЬНОГО КРАНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОНЕЧНОЭЛЕМЕНТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

*Белорусская государственная политехническая академия*

*Минск, Беларусь*

В работе приводится расчет внешних активных и реактивных нагрузок и напряженно-деформированного состояния (НДС) рамы шасси автомобильного крана МЗКТ-79081 грузоподъемностью 75 т. Расчет произведен методом конечных элементов (МКЭ) с помощью прикладного пакета Pto\_MECANICA. Описана методика создания расчетной модели. Приведены оценка статического НДС при различных нагрузочных режимах, анализ результатов расчета; даны рекомендации по изменению конструкции и снижению уровня нагруженности опасных локальных элементов и зон.

### **Обоснование выбора метода и средств моделирования; разработка методики**

Для расчета многократно статически неопределимых конструкций в настоящее время широко применяется МКЭ, основанный на совместном рассмотрении напряженного состояния системы небольших элементов конечного размера. МКЭ используется при решении самых разнообразных задач: расчет НДС, расчет собственных частот и форм колебаний, анализ устойчивости, решение задач теплопередачи, исследование установившихся и неустойчивых переходных процессов, акустических явлений нелинейных статических процессов и т.д. Суть метода состоит в следующем. Физическая область задачи делится на подобласти или конечные элементы (КЭ). Процесс дискретизации включает в себя идеализацию реальной геометрии набором непересекающихся КЭ, а так же задание информации о числе, размерах и форме конечных элементов. Зависимая переменная (одна или несколько) аппроксимируется функцией специального вида на каждом конечном элементе и, следовательно, во всей области расчетной схемы. Подстановка аппроксимирующих функций в определяющие уравнения дает систему множества уравнений с неизвестными параметрами. Решая эти уравнения, можно определить значения параметров и, следовательно, получить приближенное решение задачи на стадии создания новых конструкций.

Системы прочностных расчетов современных САПР в авиационно-космической промышленности, судостроении, машиностроении и других отраслях отечественной и зарубежной промышленности основаны именно на МКЭ. В настоящее время разработан большой арсенал комплексов различных конечных элементов, которые позволяют моделировать практически любые конструкции с учетом реальных особенностей их

работы. МКЭ дает наиболее полное приближение к результатам натурных испытаний несущей системы.

Таким образом, представляется целесообразным прочностной анализ рамы проводить на базе универсальных конечно-элементных программных комплексов, применимых для расчета широкого класса машиностроительных конструкций. При этом, вследствие необходимости подробной детализации конечно-элементных схем, анализ конструкций должен проводиться на современных высокопроизводительных компьютерах, оснащенных средствами графического вывода информации. Применение математических методов и вычислительной техники, разработка эффективных моделей, многовариантное проектирование позволяет оптимизировать нагруженность, прочность и ресурс машин еще на стадии проектирования, что сокращает сроки их создания. Такой подход экономически целесообразен и особенно актуален при мелкосерийном и единичном производстве дорогостоящих технических объектов.

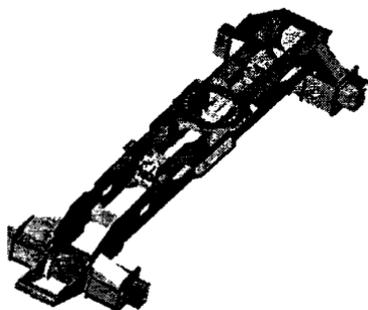
В данной работе приводится расчет реакций опор и НДС рамы кранового шасси 79081 при работе с испытательным грузом для различных положений стрелы. Расчет произведен методом конечных элементов с помощью прикладного пакета Pro/MECHANICA. Трехмерная виртуальная модель создана в пакете Pro/ENGINEER. При решении проблемы определения НДС рам по заданным нагрузкам необходимо учитывать тот факт, что рамы многоосных тягачей (РМТ) производства МЗКТ отличаются весьма сложной конструкцией и большим разнообразием модификаций. По форме РМТ являются оболочечными конструкциями и поэтому используемые в автомобилестроении методики расчета рам как стержневых систем применимы к РМТ только на самых ранних стадиях проектирования для приближенных расчетов. Ввиду конструктивных особенностей рамы представляется необходимым ее расчетную схему реализовать в виде оболочечной конечно-элементной аппроксимации. Система закрепления конструкции и нагрузки выбраны в соответствии с реальными условиями. Результатом расчета являются значения напряжений и перемещений в различных точках, функциональная зависимость которых однозначно описывается известными дифференциальными зависимостями Коши и законами Гука, а также значения реакций в местах закрепления выдвигаемых опор.

### **Создание трехмерной твердотельной модели рамы**

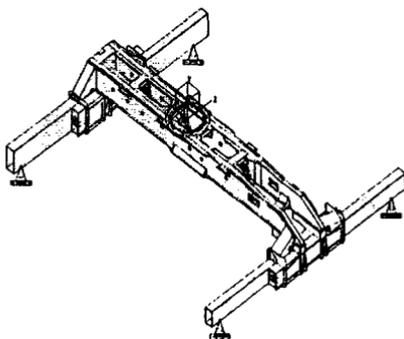
Трехмерная модель рамы кранового шасси 79081 (рис.1) была создана в среде пакета Pro/ENGINEER посредством сборки из деталей выполненных по чертежам. В дальнейшем эти детали можно использовать для моделирования различных РМТ (ввиду полной параметризации), а также для определения их центра тяжести, массы, стоимости и, в дальнейшем, передачи на производство (раскрой металла и т.д.). Однако, созданная таким образом модель является чрезвычайно сложной для непосредственного создания конечно-элементной модели, что приводит к необходимости ее упрощения. На следующем шаге детали сборки были соединены в один файл соответствующего форма-

та \*.prt. На рис. 1 (фигура 1.1) изображена трехмерная твердотельная модель рамы, представляющая собой одну деталь, готовую к использованию в последующем расчете.

1.1. Трехмерная модель в сборе



1.2. Расчетная модель



1.3. Приложенные нагрузки

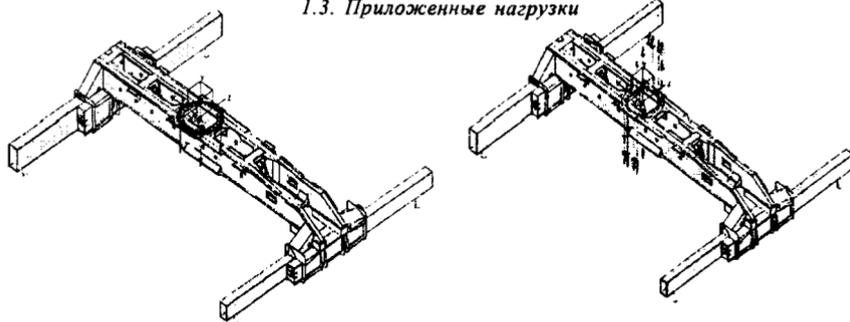


Рис.1. Трехмерная модель рамы кранового шасси

Затем с помощью модуля Pro/MECHANICA Structure в зависимом режиме были определены срединные поверхности и поверхности, которым присваивались характеристики толщин тонкостенных элементов конструкции. Полученная трехмерная поверхностная модель была передана в независимый режим модуля Pro/MECHANICA Structure, где для нее были заданы материалы, определены закрепления, приложены нагрузки.

#### Создание конечноэлементной модели рамы кранового шасси

Для создания конечноэлементной модели (КЭ-модели) рамы кранового шасси использовались трехмерные трех- и четырехузловые конечные элементы, каждому из

которых ставились в соответствие следующие свойства: толщина, тип (shell), материал. Разбивка поверхностной модели на конечноэлементную сетку производилась автоматически, а в местах предполагаемых концентраций напряжений автоматическая разбивка улучшалась вручную, что позволило повысить точность результатов.

Конечно-элементная модель содержит: точек – 4664, ребер – 12317, оболочек – 7600, элементов – 7600, количество уравнений – 204732. Время расчета 4173.94 сек., использование дискового пространства – 640 000 кб.

### **Основные результаты расчета и анализ НДС рамы кранового шасси**

Результатом расчета является определенное НДС модели. На экран (и, соответственно, на печать) можно вывести поля напряжений, перемещений, а также конкретные цифровые значения этих величин в любых точках модели. Одновременно с этим создается текстовый файл, в котором содержится вся информация о ходе расчета, а также значения всех вычисляемых величин в каждом из элементов и узлов. Этот файл является достаточно неудобным для визуального просмотра, что в принципе не служит препятствием для изучения результатов расчета, т.к. всю необходимую информацию можно получить при выводе интересующих пользователя данных непосредственно на экран (на печать). Краткая информация о ходе вычислений: количестве элементов, методе вычислений, затраченном времени и памяти, а также основные результаты, такие как моменты инерции, максимальные, средние и минимальные напряжения, перемещения, энергия деформации, реакции опор записывается в файлы текстового формата \*.prt. На рисунках были показаны распределения эквивалентных напряжений полученные в результате расчета рамы кранового шасси 79081 при работе на выносных опорах для различных положений стрелы с грузом и проведен анализ НДС.

#### **Анализ НДС рамы кранового шасси 79081 при работе на выносных опорах по результатам расчета МКЭ (направление стрелы – влево под углом 90°)**

На рис. 2 представлено общее НДС рамы 79081, установленной на выносных опорах при направлении стрелы влево. Как видно из рисунка, наиболее нагруженной являются задняя и центральная части левого (наиболее нагруженного) лонжерона, а так же область около левого воротника.

На рис. 3 представлено распределение эквивалентных напряжений в элементах рамы при рассматриваемом положении стрелы.

На рис. 3 (фигура 3.1) представлено распределение эквивалентных напряжений на левом лонжероне, в среднем они не превышают 343 МПа, но в местах крепления поперечин существуют области с довольно высокими напряжениями, достигающими предела текучести.

На рис. 3 (фигура 3.2) показаны напряжения в передней части правого лонжерона. Из него можно сделать вывод, что напряжения в околоротниковой части, в

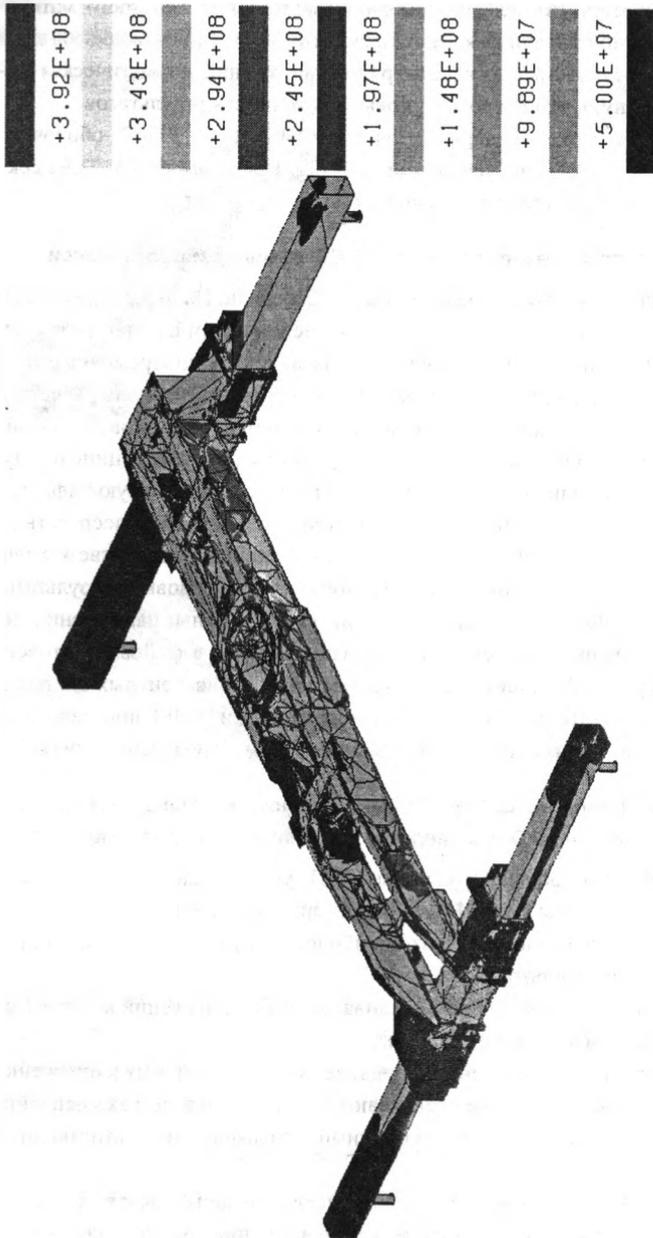
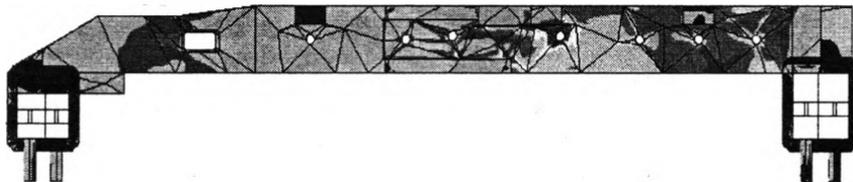


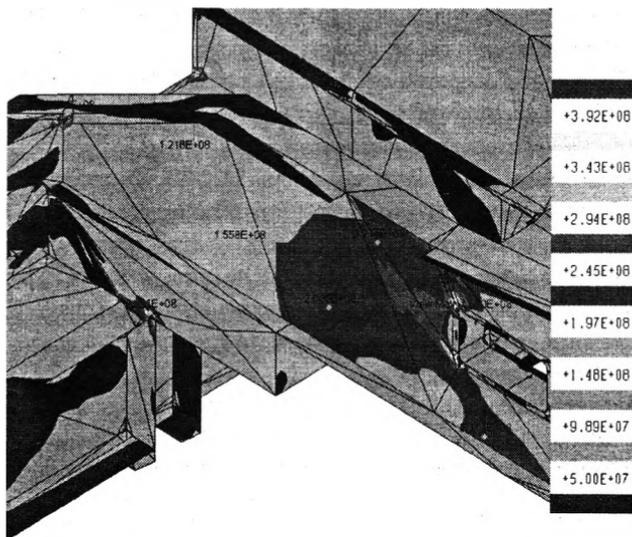
Рис. 2. Распределение эквивалентных напряжений, при направлении стрелы влево: общий вид рамы с выносными опорами

среднем, не превышают 294 МПа и лишь в местах закруглений отверстия превышают предел текучести, что является закономерным для мест концентрации напряжений.

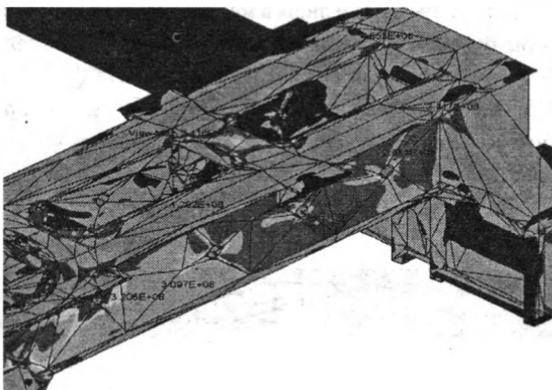
Задняя часть рамы представлена рис. 3 (фигура 3.3). Здесь возникают напряжения до 343 МПа, но на верхней задней поперечине, в местах крепления бокового подкоса к нижней полке и стенке лонжерона, а также в местах крепления труб к стенке лонжерона существуют зоны с напряжением выше предела текучести (392 МПа).



3.1 Распределение эквивалентных напряжений при направлении стрелы влево (вид слева)



3.2 Распределение эквивалентных напряжений при направлении стрелы влево (передняя часть) рамы)



3.3 Распределение эквивалентных напряжений при направлении стрелы влево (задняя часть рамы)

Рис. 3. Распределение эквивалентных напряжений

**Анализ НДС рамы кранового шасси 79081 по результатам расчета МКЭ при работе на выносных опорах (стрела направлена вправо под углом 90°)**

Наиболее нагруженной является задняя и центральная часть правого (наиболее нагруженного) лонжерона, а так же область около правого воротника.

Напряжения в околоротниковой части в среднем не превышают 294 МПа и лишь в местах закруглений отверстия превышают предел текучести, что является закономерным для мест концентрации напряжений.

В задней части рамы возникают напряжения до 343 МПа, но на верхней задней поперечине, в местах крепления бокового подкоса к нижней полке и стенке лонжерона, а также в местах крепления труб к стенке лонжерона существуют зоны с напряжением выше 392 МПа.

Напряжения на поворотном оборудовании не превышают 245 МПа.

На левом лонжероне эквивалентные напряжения не превышают 294 МПа, но в местах крепления поперечин существуют области с довольно высокими напряжениями достигающими предела текучести.

Центральная часть рамы: вид снизу. Особый интерес представляет нижняя полка правого лонжерона: здесь находится область с высокой концентрацией напряжений.

Напряжения в задней балке рамы достаточно велики и достигают предела текучести (392 МПа) в естественных местах концентрации напряжений.

**Анализ НДС рамы кранового шасси 79081 при работе на выносных опорах по результатам расчета МКЭ ( стрела направлена к передней правой опоре)**

Наиболее нагруженной является задняя часть правого (наиболее нагруженного) лонжерона, а так же область около правого воротника. Напряжения в околоротни-

ковой части в среднем не превышают 294 МПа и лишь в местах закруглений отверстия превышают предел текучести, что является закономерным для мест концентрации напряжений.

В задней и центральной части рамы в области концентрации наибольших значений напряжений возникают напряжения до 343 МПа. Но на верхней задней поперечине, в местах крепления бокового подкоса к нижней полке и стенке лонжерона, а также в месте крепления трубы к стенке лонжерона существуют зоны с напряжениями выше 392 МПа. Напряжения на поворотном оборудовании не превышают 245 МПа.

В передней части правого лонжерона напряжения в местах крепления передней балки и в околоротниковой части лонжерона не превышают 294 МПа и лишь в местах закруглений отверстия достигают предела текучести, что является закономерным для мест концентрации напряжений.

#### **Анализ НДС рамы кранового шасси 79081 при работе на выносных опорах по результатам расчета МКЭ ( стрела направлена к левой задней опоре)**

Наиболее нагруженными являются задняя часть левого (наиболее нагруженно-го) лонжерона и центральная часть рамы. Напряжения в околоротниковой части левого лонжерона в среднем не превышают 294 МПа и лишь в местах закруглений отверстия превышают предел текучести, что является закономерным для мест концентрации напряжений. В месте крепления передней балки возникают напряжения до 343 МПа и местный концентратор – 421 МПа.

В задней части рамы возникают напряжения до 343 МПа, но на верхней задней поперечине, в местах крепления бокового подкоса к нижней полке и стенке лонжерона, а также в местах крепления труб к стенке лонжерона существуют зоны с напряжением выше 392 МПа. В задней балке рамы напряжения достигают предела текучести, а в месте крепления переднего левого ребра к задней балке возникает мощный концентратор.

Центральная часть рамы. Особый интерес представляют нижняя полка левого лонжерона и внутренний нижний подкос правого лонжерона: здесь находятся области с высокой концентрацией напряжений. Напряжения на поворотном оборудовании не превышают 245 МПа, что меньше предела текучести (392 МПа).

#### **Анализ НДС состояния рамы кранового шасси 79081 при работе на выносных опорах по результатам расчета МКЭ – стрела направлена вдоль рамы назад**

Наиболее нагруженной является задняя часть рамы и центральная часть внутренних стенок лонжерона. Напряжения в центральной части не превышают 197 МПа, а в местах крепления поперечины и поворотного круга достигают 245 МПа. Задняя часть рамы: здесь возникают напряжения до 99 МПа, а в местах крепления бокового подкоса к верхней полке лонжерона и задней балке существуют зоны с напряжением до 148 МПа, что меньше предела текучести.

## Заключение

В результате расчета рамы кранового шасси МЗКТ-79081 для всех вариантов направления стрелы с испытательным грузом, масса которого превышает массу рабочего груза на 25%, установлено следующее: эквивалентные напряжения в основных несущих элементах (верхних и нижних полках, стенках лонжеронов рамы, в балках подвижных опор и пр.) находятся в допустимых пределах и прочность рамы в целом обеспечивается. В целом конструкция является недогруженной для исследованных режимов. Напряжения выше предела текучести возникают только в местах их концентрации (соединения: поперечин с лонжеронами; ребер, соединяющих элементы поворотного круга со стенками лонжеронов и пр.). Эти напряжения при статических нагрузках незначительно влияют на общее НДС рамы, т.к. концентраторы расположены не в самых нагруженных местах основных несущих элементов и возникающие здесь локальные деформации и напряжения, релаксируя, не приводят к общей существенной деформации всей рамы, снижая, при этом, прочность ряда ее локальных элементов. По результатам проведенного анализа НДС разработаны рекомендации по конструктивной доработке опасных и сильно недогруженных зон и: уменьшения напряжений в них до требуемого уровня, как по критериям статической прочности и жесткости, так и по требуемому ресурсу с учетом усталости; снижения металлоемкости всей конструкции.

УДК 621.833.12

Д.О. Тетерюков

## ВЛИЯНИЕ НА КОНТАКТНУЮ ПРОЧНОСТЬ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОРТОТРОХОИДНОЙ ПЕРЕДАЧИ

*Институт надежности машин АН Беларуси  
Минск, Беларусь*

В настоящее время вследствие совершенствования технологий получения сложного профиля на станках с числовым программным управлением получают широкое применение различные типы трохойдных передач. Ортотрохойдная передача относится к классу передач шестерня-зубчатая рейка. Преимуществом данной передачи является высокая точность позиционирования, большие передаваемые усилия (в зацеплении находится 5-8 цевок-роликов), хорошие массогабаритные характеристики. Исходной кривой для построения профиля зубчатой рейки служит ортотрохойда.

Поскольку большинство трохойдных передач является высоконагруженными, необходим расчет на контактную прочность элементов зацепления. Взаимодействие двух прижатых друг к другу упругих тел (зубчатой рейки и цевки-ролика) сопро-