

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Тольяттинский государственный университет»

Институт машиностроения

(наименование института полностью)

Кафедра Проектирование и эксплуатация автомобилей

(наименование)

15.04.01 Машиностроение

(код и наименование направления подготовки)

Эксплуатация транспортных средств

(направленность (профиль))

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА  
(МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)**

на тему Оптимизация конструкции рамы гоночного автомобиля класса  
«карт»

Студент

В.С. Грицук

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Научный  
руководитель

канд. техн. наук, доцент И.В. Турбин

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

Тольятти 2021

## Оглавление

Введение.....	3
Глава 1 Анализ состояния вопроса.....	5
1.1 Анализ конструктивных особенностей картов .....	5
1.2 Обзор технических решений.....	8
Глава 2 Конечно-элементная модель .....	26
2.1 Компоновка карта.....	26
2.2 Подготовка расчетной модели .....	29
Глава 3 Конструкционная прочность рамы карта .....	36
3.1 Анализ конструкционной прочности рамы карта.....	36
3.2 Анализ жесткости базовой конструкции рамы .....	44
Глава 4 Оптимизация рамы карта.....	49
4.1 Сравнительный анализ жесткости модернизированных рам .....	49
4.2 Анализ прочности рамы оптимизированной конструкции.....	57
Заключение .....	69
Список используемой литературы .....	70

## Введение

В общем, картинг представляет собой гонки на картах (малолитражных гоночных автомобилях открытого типа). Как вид спорта картинг известен достаточно давно – многие знаменитые гонщики Формулы 1 начинали свою спортивную карьеру в картинге. Но в последнее время картинг набирает популярность и выходит за границы профессионального спорта. В городах появляются пункты проката картов, строятся небольшие гоночные трассы для любителей активного отдыха.

Сейчас карты начинают разделять на две разновидности: дорогостоящие спортивные машины для профессиональных гонщиков и относительно дешевые, для прокатных клубов картинга. Тем не менее, общие черты у них схожи: в качестве основания машины используется рама, двигатель, сиденье пилота, рулевое управление, тормоза. За счет отсутствия подвески езда на машине довольно жесткая, поэтому для трасс требуется идеальный асфальт. На моделях для развлечения не предусмотрена коробка передач – в качестве педалей только газ и тормоз.

Гоночные модели картов снабжаются двухтактными моторами, в отличие от прокатных картов, которые имеют четырехтактные моторы. При этом самые мощные моторы могут выдавать до 40 лошадиных сил, а это достаточно много, учитывая малый вес карта. В результате по разгонной динамике такая машина может соперничать с настоящими «суперкарами» типа Ferrari или Lamborghini. Поскольку эти карты обладают хорошей устойчивостью, то на виражах возникают просто колоссальные боковые перегрузки.

Характеристики карта в целом и, в частности, на трассе связаны с множеством факторов, включая: жесткость шасси, материал шин, конструкцию задней оси и типа рулевого управления. Важно отметить, что автомобиль типа «карт», как известно, не имеет заднего дифференциала, и поэтому относительное вращение между двумя колесами, необходимое для

движения по кривой, сильно зависит от общей жесткости рамы. В этой связи необходимо обратить внимание на жесткость рамы на кручение, которая является фундаментальным параметром, характеризующим различные типы рам. Этот параметр может быть получен путем экспериментальных испытаний прототипов или численного моделирования виртуальных моделей, в основном выполняемого методом конечных элементов. В настоящее время многие структурные конструктивные решения оставлены на усмотрение отдельного производителя, а не вытекают из глубокого изучения влияния различных структурных элементов на конечное поведение карта на трассе.

С другой стороны, как показывает практика, в настоящее время большинство выпускников высших учебных заведений устраиваются на работу не по полученной ими в процессе обучения специальности. В данный момент в сфере производства продукции работодателям необходимы уже готовые специалисты, имеющие не только теоретические знания, но и обладающие практическими навыками работы.

В Тольяттинском государственном университете центр инжиниринга «Формула Студент» является базой для развития таких студенческих проектов как Smart Moto Challenge, Solar Regatta и «Формула Картинг». На базе проекта «Формула Студент» действуют также и школа юного автомоделиста. Проект «Формула Студент» – постоянный участник городских и региональных мероприятий, имеющих социальную, образовательную и развлекательную направленность.

В работе планируется рассмотреть особенности конструкции малолитражных гоночных автомобилей класса карт, рассмотреть вопросы прочности несущей конструкции карта.

## **Глава 1 Анализ состояния вопроса**

### **1.1 Анализ конструктивных особенностей картов**

Карт представляет собой тип малолитражного гоночного автомобиля открытого типа. Карт может развивать скорость от 60 до 260 км/ч, в зависимости от типа и класса [19, 23, 28, 30]. Одним из основных аспектов карта является полное отсутствие традиционной подвески – здесь ось прочно прикреплена к раме, нет дифференциала (оба задних колеса вращаются с одинаковой скоростью), и хотя такие вещи, как развал и поворот, можно регулировать, нет никаких амортизаторов или пружин, а углы развала и кастера включены в конструкцию шасси.

Существует несколько видов картинга, а именно: спортивный (профессиональный) и прокатный. Основное различие данных болидов в области применения. Прокатный картинг доступен человеку без опыта вождения, достаточно только арендовать болид на специально оборудованной трассе. Прокатный картинг управляется двумя педалями (газ, тормоз) и рулем. Спортивный картинг более сложный в конструкции.

Автомобили класса «карт» любительской серии просты в управлении, благодаря отсутствию коробки передач. Устройство стандартного автомобиля класса «карт» включает в себя семь составляющих: рама; элементы защиты (так называемый носовой короб и боковая защита); ходовая часть; рулевая часть; двигатель (обычно двухтактные бензиновые, мощностью от 5 до 7 лошадиных сил); радиатор охлаждения; место водителя, сделанное из жесткого пластика (рисунок 1).

В своем развитии современные карты далеко ушли от своих предков. Сегодня – это спортивный гоночный автомобиль, за рулем которого начинают свою карьеру большинство будущих пилотов Формулы 1.



Рисунок 1 – Общий вид стандартного карта

Стоит отметить, что в последнее время активно развивается направление электрокартинга, которое обладает несомненными плюсами, такими как отсутствие выхлопов, низкий уровень шума, всесезонность, отсутствие необходимости дополнительной вентиляции в помещении картодрома.

Основой всех болидов вне зависимости от класса является рама, к которой крепятся основные узлы: двигатель, рулевое управление, тормозная система и ходовая часть [19-23, 26, 28, 30]. Рама карта всегда стальная, материал должен быть магнитным. Применение углепластиков и титана категорически запрещена. Это сделано для увеличения жесткости конструкции и как следствие для улучшения безопасности болида.

Еще один немаловажный вопрос это развесовка карта – одна из самых главных настроек болида, благодаря которой раскрывается весь потенциал машины. Неправильная развесовка приведет к ухудшению управляемости болидом.

Главные проблемы неправильной развесовки: недостаточная поворачиваемость; плохой зацеп; чрезмерная или недостаточная нагрузка колес карта; неправильное перераспределение веса во время прохождения поворота.

Неправильное распределение веса ведет к неподходящим настройкам шасси и, как следствие, проблемам на трассе. Как правило, вес карта распределяют по следующему принципу: вес на переднюю ось – 43 %; вес на заднюю ось – 57 %; левый и правый вес – 50 %/50 % [25].

Одним из важных этапов развесовки является правильная установка сиденья карта.

Как правило, используется три основных размера (рисунок 2):

- высота сиденья относительно нижнего края труб шасси;
- расстояние от верхнего края сиденья до задней оси карта;
- расстояние от передней части сиденья до передней части шасси.

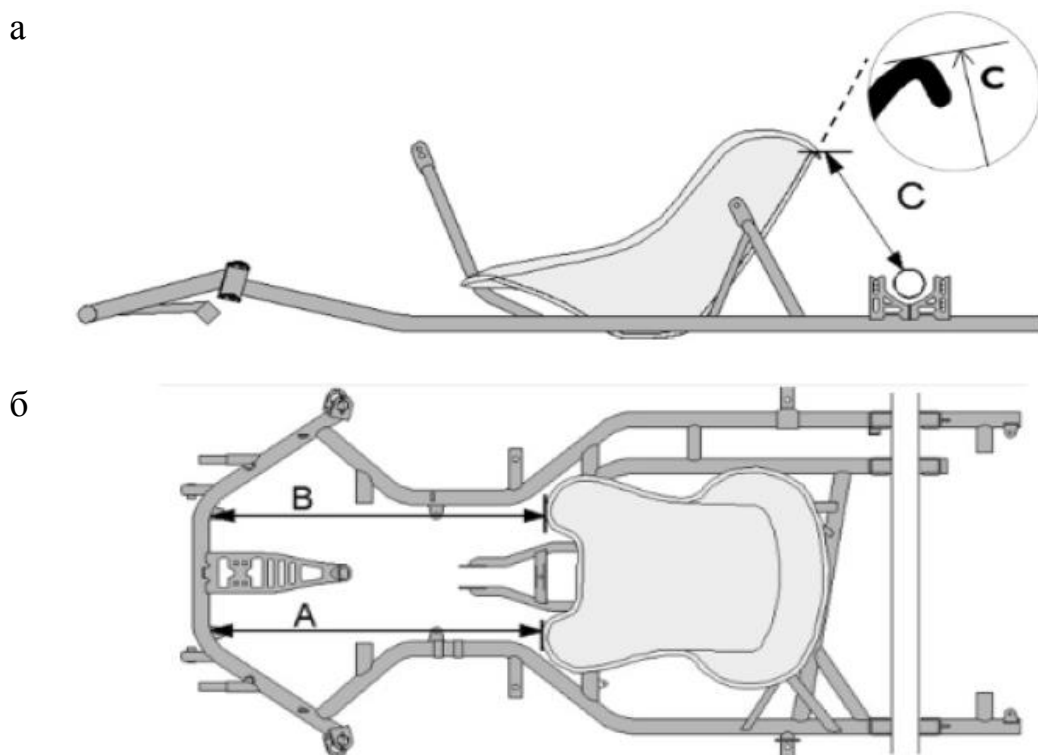


Рисунок 2 – Установка сиденья на раме: а – расстояние от верхнего края сиденья до задней оси карта; б – расстояние от передней части сиденья до передней части шасси

Сиденье влияет на размещение центра тяжести, который оказывает влияние на поведение карта на трассе [29].

Разработка конструкции всегда начинается с анализа уже известных конструктивных решений, выявления преимуществ и недостатков, а также выбора материала и способов фиксации элементов между собой. На основании этих данных создается САД-модель несущей конструкции, учитывающая требования безопасности, надежности и возможности установки всех необходимых узлов карта на раму.

Для выявления слабых мест в конструкции проводится конечно-элементный анализ, под который создается расчетная модель рамы карта. По результатам сравнения смоделированных значений и значений, полученных опытным путем, делается вывод о надежности несущей конструкции. При неудовлетворительных результатах проводится углубленный анализ конструкции несущей системы – выявляются участки подверженные максимальной деформации и участки слабodeформированные. Также проводится анализ напряженного состояния узлов обвязки рамы с целью выявления зон упругой и пластической деформации. Для наглядной оценки рассматривают запас прочности в опасных местах рамы карта.

Далее необходимо изменить конструкцию рамы таким образом, чтобы перераспределить напряженные участки с увеличением конструкционной прочности в проблемных зонах.

Как видно, разработка оптимальной конфигурации несущей системы малолитражного автомобиля класса карт, является одной из основных задач, с которой сталкиваются при конструировании карта.

## **1.2 Обзор технических решений**

Известно, что производство любого автомобиля класса «карт» начинается с рамы – несущей конструкции. Анализ прочности каркаса автомобиля является одним из первых шагов при проектировании



автомобиля любого класса. От правильно сконструированной рамы зависят как динамические характеристики машины, так и непосредственная безопасность пилота. Это подтверждается количеством работ [3, 5-17], в которых основной упор сделан на моделирование и анализ несущей конструкции карта. В данных работах рассматриваются как вопросы наилучшего расположения труб несущей конструкции, то есть непосредственно самой конфигурации рамы, так и материалов рамы, толщины поперечного сечения элементов рамной конструкции и способов крепления основных узлов карта.

Так в работе [11] авторы провели краш-тесты спроектированной конструкции рамы карта (рисунок 3). Были проведены исследования по оптимизации прочности рамы в зависимости от толщины используемых труб и собственно веса рамы. Как показали исследования, даже небольшое изменение в конструкции может привести к проблемам и не обеспечить безопасность пилота.

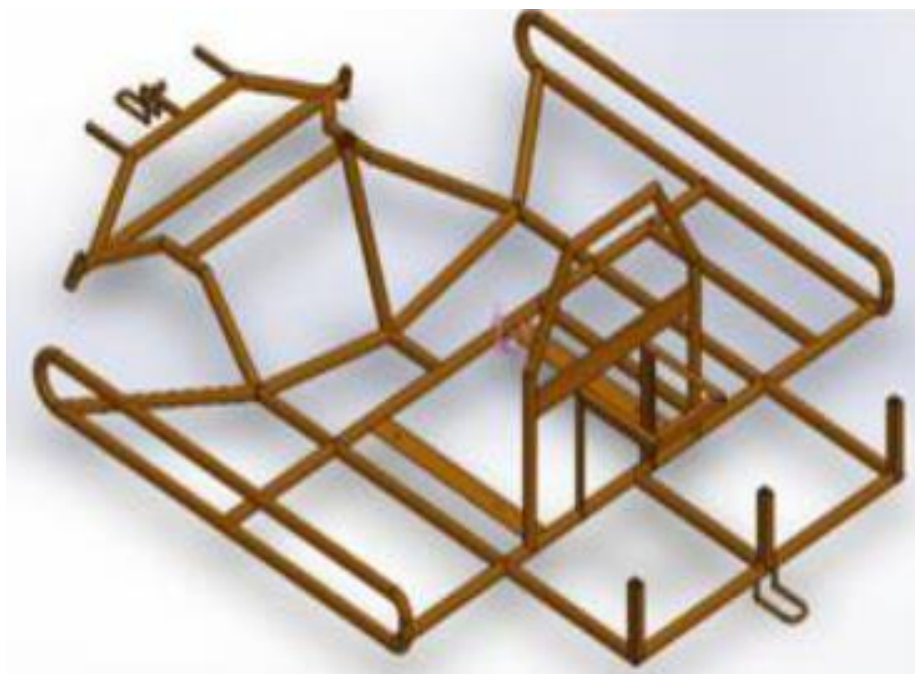


Рисунок 3 – Конструкция рамы карта

В качестве материала рамы использовались трубы из малоуглеродистой стали толщиной 2 мм.

Анализ рамы проводили посредством комплекса конечно-элементного анализа. При этом нагрузку при фронтальном ударе задавали величиной 600 Н, а при боковом и ударе сзади – 400 Н. По результатам моделирования напряжения составили соответственно 124 МПа – фронтальный удар , 137 МПа – боковой удар и 123 МПа – удар сзади, и максимальные деформации при этом в диапазоне от 2,2 до 2,4 мм.

К сожалению, авторы [11] никак не обосновывают свои решения, поэтому сложно оценивать результаты исследования.

Авторы работы [13] также делают акцент на важности подхода к проектированию несущей конструкции. Анализ созданной ими CAD-конструкции с помощью программы SolidWorks (рисунок 4) был проведен посредством метода конечных элементов в программном комплексе ANSYS.

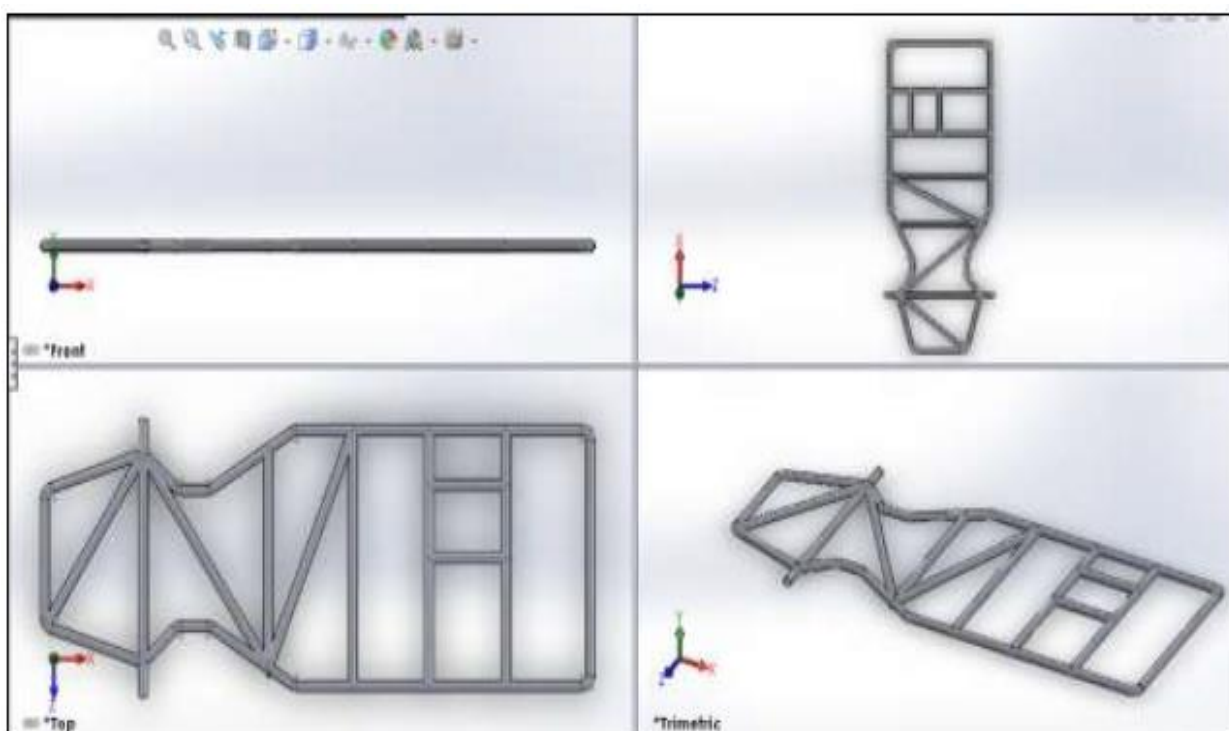


Рисунок 4 – CAD-модель рамы карта

В качестве материала каркаса были использованы трубы из стали AISI 1020 диаметром 25 мм с толщиной стенки 1,4 мм. Моделировали фронтальный, боковой удары и удар сзади.

Для моделирования фронтального удара сила была рассчитана, исходя из перегрузки в момент удара 4g, и составила 4708,8 Н; для бокового удара и удара сзади, исходя из перегрузки 2,5g, сила составила 2943 Н.

При этом максимальные напряжения составили 258 МПа, 23 МПа и 268 МПа соответственно при фронтальном, боковом ударах и ударе сзади. Таким образом, авторы [13], основываясь на пределе текучести стали (350 МПа), делают вывод о безопасности спроектированной конструкции.

Недостатком данной конструкции является то, что вся рама находится в одной плоскости и уже через несколько циклов нагружения при работе в реальных условиях результаты моделирования, приведенные в работе [13] возможно будут неактуальными, так как появятся пространственные деформации, и напряжения при ударах будут концентрироваться в других частях рамы.

Как известно, основная цель каркаса несущей конструкции – обеспечить объемное защищенное пространство вокруг пилота карта. Его второстепенные цели – обеспечить надежные места для установки компонентов, а также быть привлекательным, дешевым и легким. Эти цели в работе [16] достигнуты путем выбора материала каркаса рамы, который обладает хорошей прочностью при небольшом весе за счет включения большего количества непрерывных элементов с изгибами. Моделирование конструкции каркаса рамы выполнили с помощью программного обеспечения Catia V-5 (рисунок 5).

В качестве материала рамы выбрана среднеуглеродистая сталь AISI 1018. Этот материал был выбран из-за хорошего сочетания всех типичных свойств стали – высокой прочности на разрыв, пластичности, легкого веса, хорошей свариваемости и сравнительной простоты обработки.

Конечно-элементный анализ проводили в HyperWorks 11.0. Автор выбрал 2D-анализ оболочки, так как он показывает хорошую точность результата моделирования.

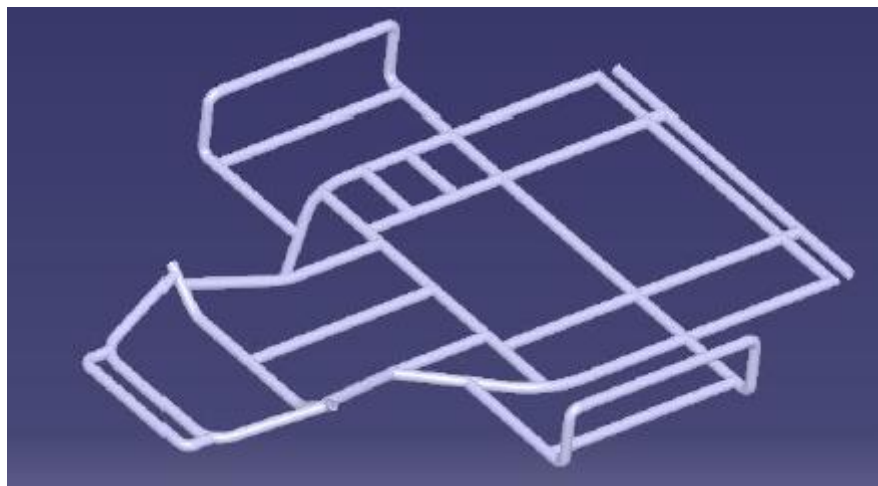


Рисунок 5 – Модель рамы карта в Catia V-5

При испытании на лобовое столкновение моделировали контакт карта с неподвижной жесткой стеной до полной остановки. При предполагаемой массе транспортного средства с водителем в 170 кг сила удара была рассчитана на основе перегрузки 4g и составила 6670 Н. Нагрузку прикладывали к переднему бамперу при ограничении перемещений рамы по центру конструкции под сиденьем пилота. Максимальная деформация составила 1,97 мм, а максимальные напряжения 187 МПа при коэффициенте запаса прочности 1,98, что говорит о надежности конструкции.

Также автором были проведены моделирование удара сзади из расчета перегрузки в 4g и удара сбоку из расчета перегрузки в 2g. При этом коэффициент запаса прочности при ударе сзади составил 1,74, а при ударе сбоку 1,61.

К сожалению, автор [16] не указал параметры труб, используемых в конструкции рамы, что не позволяет оценить представленные результаты.

Авторы работы [12] также использовали в качестве материала рамы сталь AISI 1018, но конечно-элементный анализ проводили в пакете Ansys 14.5. На рисунке 6 представлен результат автоматического создания сетки на твердотельной модели рамы.

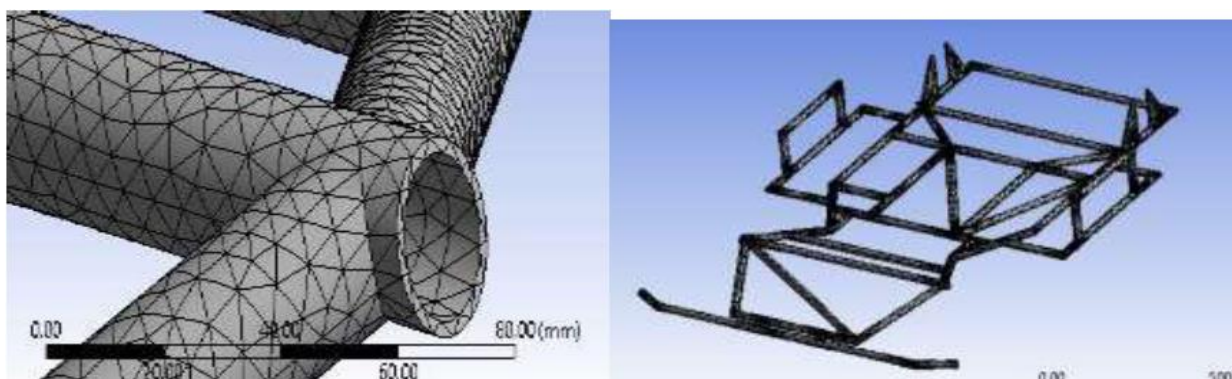


Рисунок 6 – Сетка конечных элементов

Авторы моделировали также 3 ситуации – фронтальный удар, боковой удар и удар сзади. Для фронтального удара и удара сзади нагрузка рассчитывалась, исходя из скорости карта в 60 км/ч, а для бокового удара исходя из скорости в 30 км/ч. Величина перегрузки при этом соответственно составила 5g и 2,5g.

Результаты моделирования выявили максимальный запас прочности при ударе сзади, равный 3. При фронтальном ударе запас прочности составил 1,6 и при боковом – 1,4. Исходя из полученных результатов авторы [12] делают выводы о надежности конструкции.

Недостатком данного исследования является неоптимальный выбор типа конечных элементов для анализа – помимо большого количества времени расчета использование объемных элементов при анализе пространственных рамных конструкций дает пониженную точность расчета.

Авторы работы [15] представили свой вариант конструкции шасси малолитражного гоночного автомобиля класса «карт». В качестве материала использовали трубы, изготовленные из стали AISI 1020. На рисунке 7

представлена 3D-модель разработанной рамы, исходя из эргономических соображений, выполненной в программном пакете 3D-моделирования Solidworks.

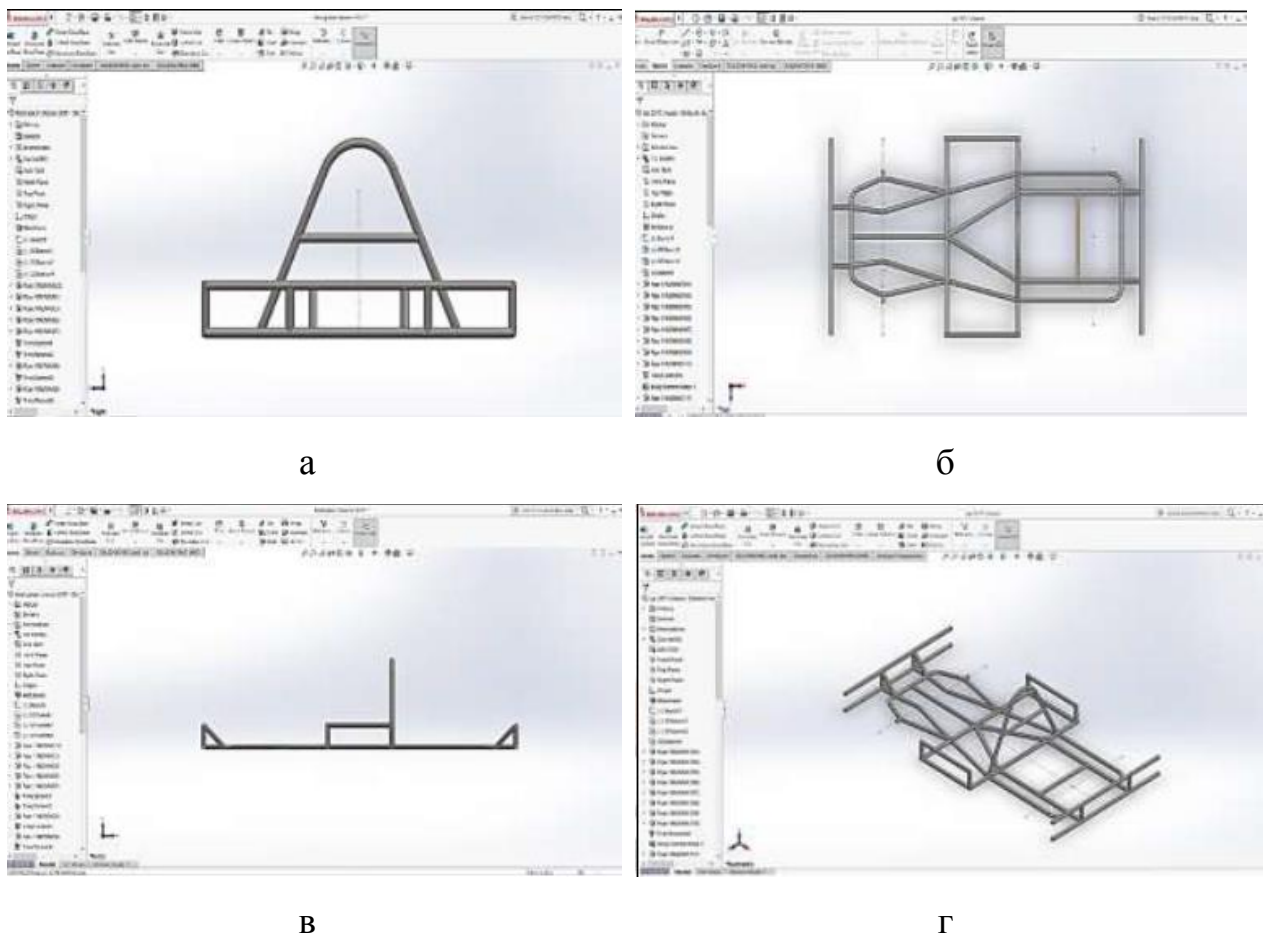


Рисунок 7 – Конструкция рамы: а – фронтальный вид, б – вид сверху, в – вид сбоку, г – изометрический вид

Авторы работы исследовали прочность рамы при ударах фронтальном, боковом и заднем при перегрузке в 2g и общей массе карта 180 кг. Здесь при относительно неплохом получившемся коэффициенте запаса прочности – от 1,8 до 2,3, деформации составили от 5 до 6,5 мм.

Недостатком данной работы является отсутствие пояснений о величине принятой перегрузки в 2g, что как минимум в 2 раза ниже, чем в работах рассмотренных ранее. В этой же связи полученные результаты вызывают серьезные сомнения.

В работе [9] в качестве материала рамы использовали сталь ASTM A106, поскольку она отвечает необходимым требованиям по стоимости, доступности и качеству. Конструкция карта и в частности рамы были смоделированы и проанализированы с использованием таких программ, как SOLIDWORKS и ANSYS. На рисунке 8 представлена объемная модель рамы спроектированного карта.

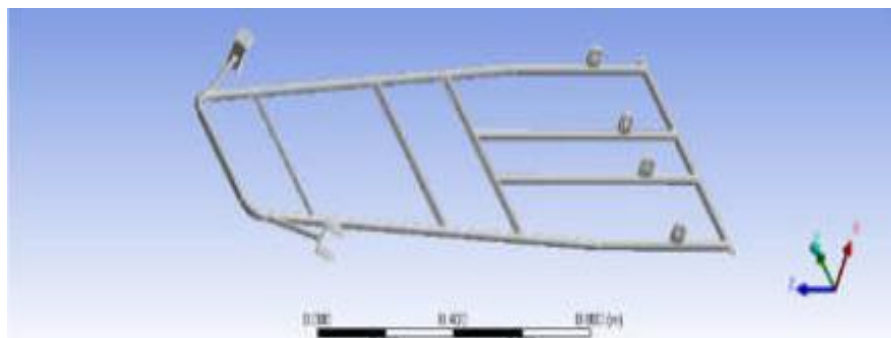


Рисунок 8 – CAD-модель рамы карта

Расчет усилий, воздействующих на раму при фронтальном ударе, рассчитывали, исходя из максимальной скорости 50 км/ч и общей массы карта с пилотом – 190 кг. Максимальная величина деформации рамы составила всего 0,3 мм.

В соревнованиях вероятность полного бокового столкновения практически отсутствует, поэтому скорость автомобиля во время такого столкновения принимается равной  $3/4$  максимальной скорости. И максимальная деформация здесь уже составила 1,2 мм.

Расчет деформации при ударе сзади авторы проводили при условии скорости в 25 км/ч и величина деформации составила 0,01 мм.

Для определения конструктивной жесткости был проведен расчет на кручение. Для этого испытания силу прикладывали к конструктивным узлам по диагонали карта, а фиксированную заделку выполняли на узлах диагональных элементов противоположной силовой. Приложенную силу

приняли в 470 Н, исходя из 1/4 общего веса снаряженного карта. Коэффициент безопасности конструкции варьируется в зависимости от различных испытаний. Максимальная деформация после тестов на кручение составила 10 мм.

Исходя из полученных результатов авторы [9] делают вывод о том, что конструкция отвечает всем требованиям безопасности. С нашей же точки зрения результаты довольно спорные, так как собственно расчетов на коэффициент запаса прочности представлено не было.

Авторы работы [5] CAD-модель рамы карта выполнили в программном обеспечении CREO Parametric 2.0, а анализ конструкционной прочности провели с помощью программного обеспечения ANSYS 15.0.

В качестве материала рамы карта были рассмотрены трубы, изготовленные из нескольких материалов – AISI 1026, AISI 4130, AISI 1020, AISI 1018 и качестве оптимальной с технико-экономической точки зрения выбрана сталь AISI 1018.

На рисунке 9 представлена компоновка карта.



Рисунок 9 – Изометрический вид карта

Моделирование рамы при фронтальном ударе оценивали при приложении усилий в 7500 Н. При этом, для повышения прочности на



участках с максимальной концентрацией напряжений, были приварены косынки. В итоге максимальные напряжения составили 118 Н (рисунок 10) при деформации в 1,27 мм. Соответственно коэффициент запаса прочности составил 3,11.

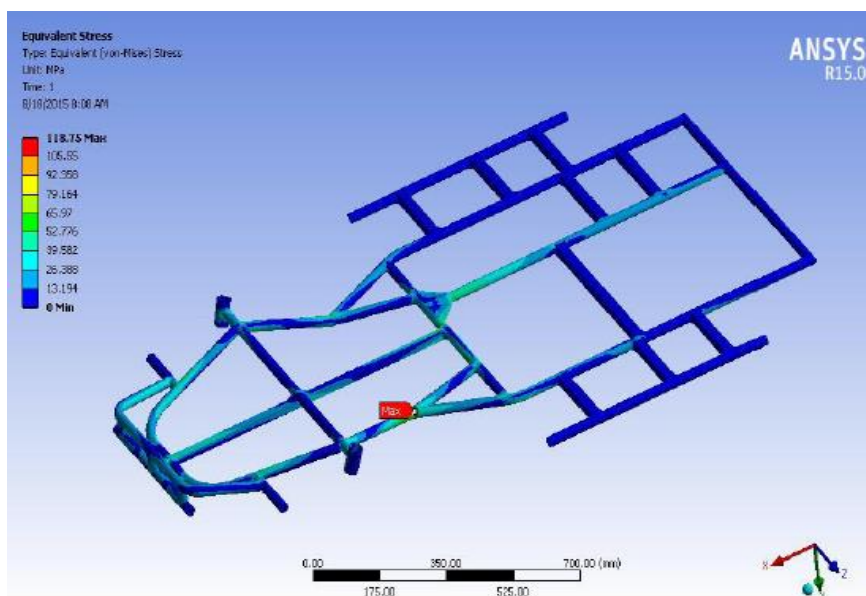


Рисунок 10 – Анализ эквивалентных напряжений

Анализ при боковом ударе оценивали, исходя из перегрузки 2g. Была приложена сила 3650 Н, и наблюдаемая деформация составила 0,91 мм, то есть она находится в допустимых пределах. Коэффициент запаса прочности составил 3,28.

При анализе удара сзади перегрузку принимали равной 3g, то есть к задним элементам рамы прикладывали силу 5450 Н, при этом полностью ограничивая степень свободы точек подвески на модели рамы карта. Деформация составила 3,9 мм, что также находится в допустимой зоне. Коэффициент запаса прочности при этом составил 3,64.

Результаты данного исследования трудно оценить, так как авторы первоначально исследовали несколько вариантов труб с различной толщиной стенок, а на каком варианте они в итоге остановились в работе [5] не указано.

Автор работы [7] проектировал шасси карта с учетом стандартов спецификации Всемирной ассоциации картинга Super Kart. Общий вид карта представлен на рисунке 11.

Шасси Super Kart HD 250 построено из труб малоуглеродистой стали, диаметром 32 мм и толщиной 2 мм. Из-за отсутствия дифференциала и системы подвески рама обеспечивает надлежащую жесткость и жесткость на кручение карту, а также обеспечивает передачу нагрузки во время прохождения поворотов. Рама карта была спроектирована в SolidWorks. Далее были исследованы две концепции дизайна для улучшения жесткости рамы карта на кручение. Первый – это размещение дополнительных элементов в подходящих местах на раме. Изучаются разные типы каркасов. Второй – увеличить ширину между двумя шкворнями.



Рисунок 11 – Super Kart HD 250

В процессе исследований была определена жесткость на кручение каждого типа рам и произведено сравнение их между собой. Результат показал, что жесткость на кручение рам с большей шириной между шкворнями лучше, чем у рам с дополнительными элементами. В частности, наилучшим типом рамы является рама шириной 828 мм.

Недостатком данной работы является отсутствие данных по испытанию карта на кручение с размещением дополнительных элементов. Неясно как проводились испытания, какие дополнительные элементы и где размещали на раме карта. Также нет данных по значениям жесткости в численном выражении.

Авторы работы [14] провели наиболее полное исследование рамы карта при проектировании и рассмотрели основные шаги при анализе конструктивной прочности рамы карта.

Конструктивное исполнение рамы карта представлено на рисунке 12. Такой тип рамы в основном предназначен для соревнований по категориям с двигателями до 100 кубических сантиметров. Рама состоит из труб толщиной 2 мм: основной каркас рамы имеет внешний диаметр труб – 32 мм, а некоторые другие второстепенные элементы имеют диаметр 28, 20 и 14 мм соответственно. Используемая сталь – конструкционная легированная 25CrMo4.

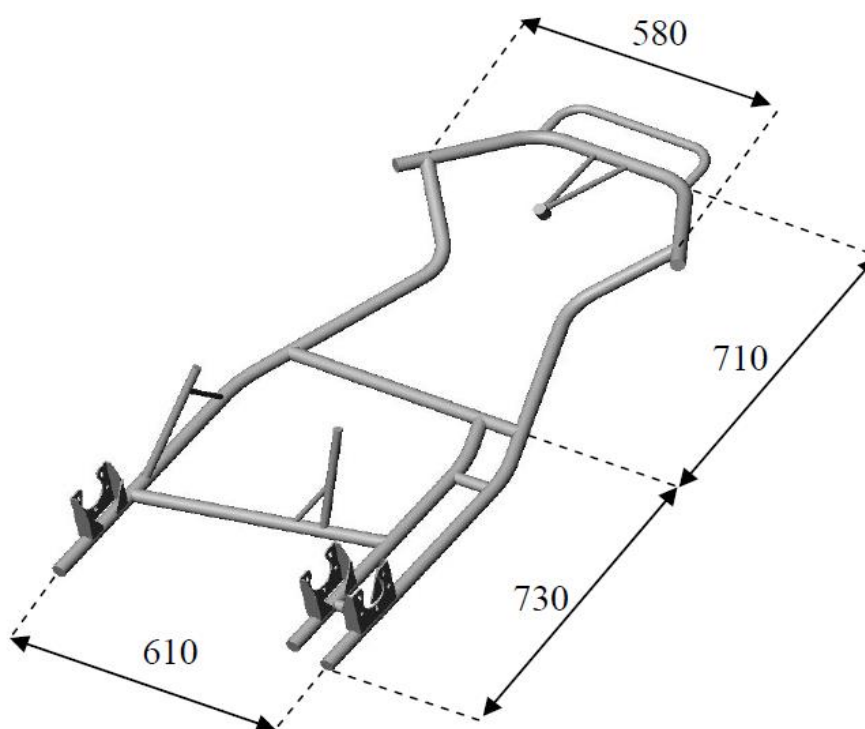


Рисунок 12 – Габариты рамы карта

Определение жесткости рамы на кручение было получено путем проведения специальных экспериментальных испытаний. В частности, рама была закреплена в задней части конструкции, имеющей повышенную жесткость, а в передней центральной части раму устанавливали на шаровую опору, таким образом, чтобы имитировать шарнир (рисунок 13). Нагрузки прикладывали к кронштейнам для крепления осей передних колес, а смещения фиксировали на конце специального стержня, который служил также и усилителем.

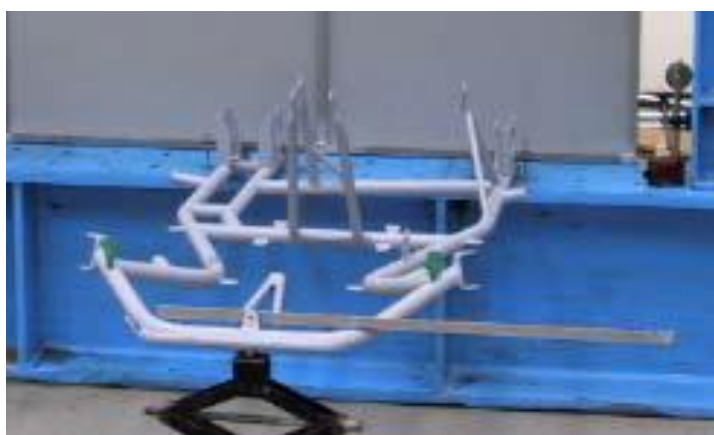


Рисунок 13 – Общий вид экспериментальной установки

Экспериментальные испытания проводили путем приложения различных нагрузок (100, 200 и 300 Н) к одному из кронштейнов. Эти испытания позволили выявить, что жесткость рамы составляет порядка 175 Н·м/град, значение, которое сопоставимо со значениями, найденными в литературе (160-190 Н·м/град) [3, 10, 14, 17]. Испытания также позволили подтвердить то, что в пределах диапазонов нагрузок, определенных выше рама демонстрирует по существу линейное поведение жесткости при кручении, полученной как отношение между приложенным крутящим моментом и скручиванием рамы, а также демонстрирует симметрию деформации конструкции при кручении по отношению к продольной оси рамы.

Весь анализ проводили в зоне упругой деформации с использованием линейных элементов. Для анализа использовались следующие программы: Strauss (элементы балочного типа) и Algor (элементы пластинчатого типа). На первом этапе особое внимание было уделено созданию надежной конечно-элементной сетки, способной максимально точно воспроизводить результаты экспериментальных испытаний, проведенных ранее. В частности, модель, выполненная в программном обеспечении Strauss, состоит из примерно 400 конечных элементов и позволяет получить точность по отношению к экспериментальному значению, равную 5 %, а модель для программного обеспечения Algor состоит из примерно 26000 пластинчатых элементов и здесь результаты моделирования отличаются от экспериментальных результатов на величину, равную примерно 2 %.

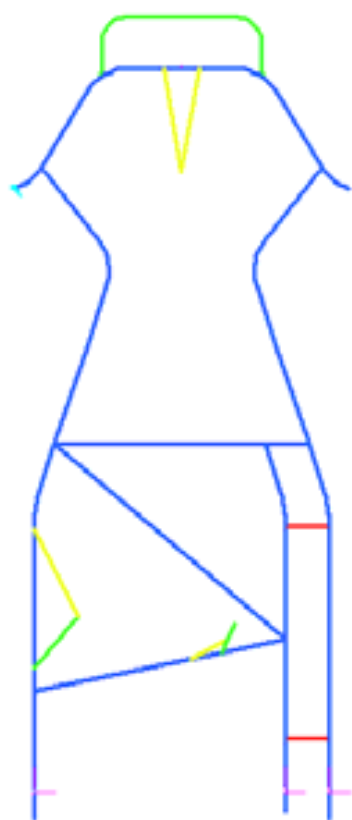
На втором этапе были изучены различные варианты конструкции рамы и варианты материалов ее изготовления и произведено сравнение с базовой моделью рамы, изготовленной из стали 25CrMo4. При этом анализировались различные параметры, включающие массу конструкции, ее жесткость на кручение, а также, для наглядности, отклонения от значений, относящихся к конструкции исходной рамы.

На рисунке 14 представлены конфигурации базовой рамы и различные варианты модификации ее конструкции. Как видно, модификация заключалась в изменении кривизны некоторых элементов рамы или вставке других элементов в определенные места конструкции.

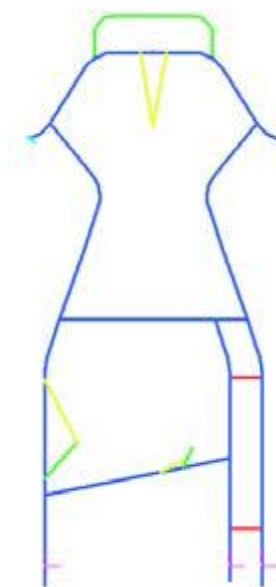
Таким образом, были рассмотрены варианты увеличения жесткости рамы на кручение путем внедрения дополнительных распорных элементов в конструкцию.

В таблице 1 приведены значения массы рамы и жесткости на кручение различных модификаций конструкции базовой рамы карта. Сравнивая значения этих величин со значениями базовой конструкции карта, очевидно, что изменение геометрии центральной области компоновки, вносит значительный вклад в итоговое значение жесткости рамы и, как видно,

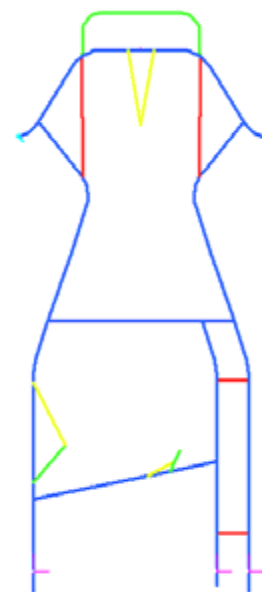
наибольшие изменения произошли в модифицированных компоновках № 10, 7 и 6.



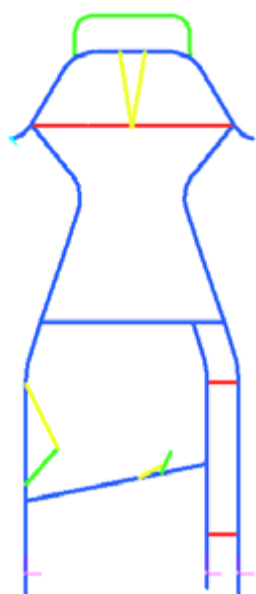
а



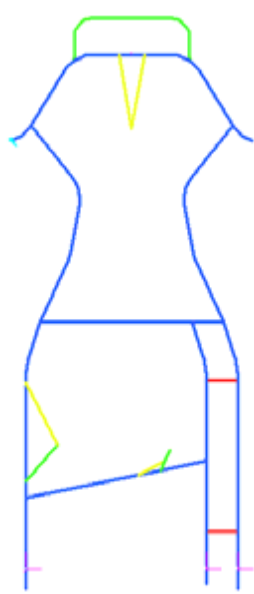
б



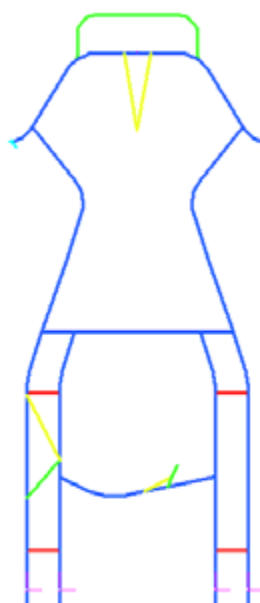
в



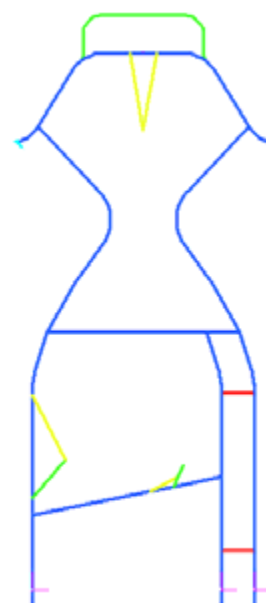
г



д



е



ж

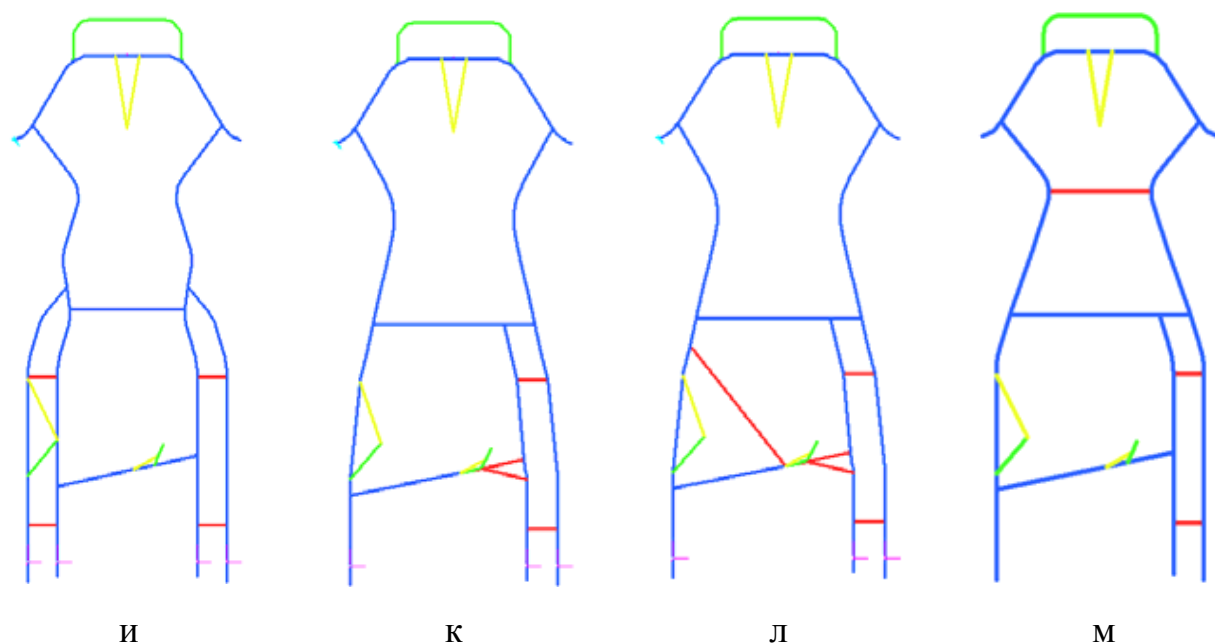


Рисунок 14 – Базовая модель рамы и варианты ее модификации: а – базовый вариант конструкции рамы, б-л – варианты модификации от 1 до 10 соответственно

Таблица 1 – Сравнение различных компоновок

№ модификации конструкции	Масса, кг	Жесткость рамы, Н·мм/град	Изменение веса, %	Изменение жесткости рамы, %
Базовая конструкция	9,49	1,763Ехр+05	–	–
1	10,39	1,936Ехр+05	+9,5	+9,8
2	10,30	2,031Ехр+05	+8,5	+15,2
3	10,25	1,834Ехр+05	+8,0	+4,0
4	9,50	1,740Ехр+05	+0,1	-1,3
5	10,64	1,970Ехр+05	+12,1	+11,7
6	9,84	1,480Ехр+05	+3,7	-16,0
7	11,00	2,089Ехр+05	+15,9	+18,5
8	9,41	1,795Ехр+05	+0,8	+1,8
9	9,96	1,951Ехр+05	+4,9	+10,7
10	9,87	2,107Ехр+05	+4,0	+19,5

Параллельно с изменениями, описанными выше, были проведены исследования с целью выявления, как толщина и, следовательно, жесткость отдельных элементов конструкции влияет на общую жесткость рамы карта. На рисунке 15 показана компоновка базовой конструкции рамы карта с

выделенными элементами, принадлежащими к разным группам, характеризующимися одинаковой толщиной, а основные результаты представлены в таблице 2, где базовая конструкция принимается за точку отсчёта с толщиной стенок 2 мм по всей раме.

Таблица 2 – Основные результаты, полученные при изменении толщины

№ модификации конструкции	Группа	Толщина, мм	Масса, кг	Жесткость рамы, Н·мм/град	Изменение веса, %	Изменение жесткости рамы, %
Базовая конструкция	–	–	9,49	$1,76E_{xp+05}$	–	–
1	1	3	11,55	$2,07E_{xp+5}$	+19,6	+13,5
2	2	3	11,06	$1,83E_{xp+5}$	+5,8	+8,6
3	5	3	11,34	$1,83E_{xp+5}$	+5,8	+11,4
4	4	3	11,18	$1,85E_{xp+5}$	+6,9	+9,8
5	1 и 5	3 и 3	12,05	$2,12E_{xp+5}$	+22,5	+18,4
6	4 и 5	3 и 3	11,69	$1,88E_{xp+5}$	+8,7	+14,8
7	1 и 4	3 и 3	11,90	$2,14E_{xp+5}$	+23,7	+16,9
8	1 и 2	3 и 1	11,33	$2,03E_{xp+5}$	+17,3	+11,3

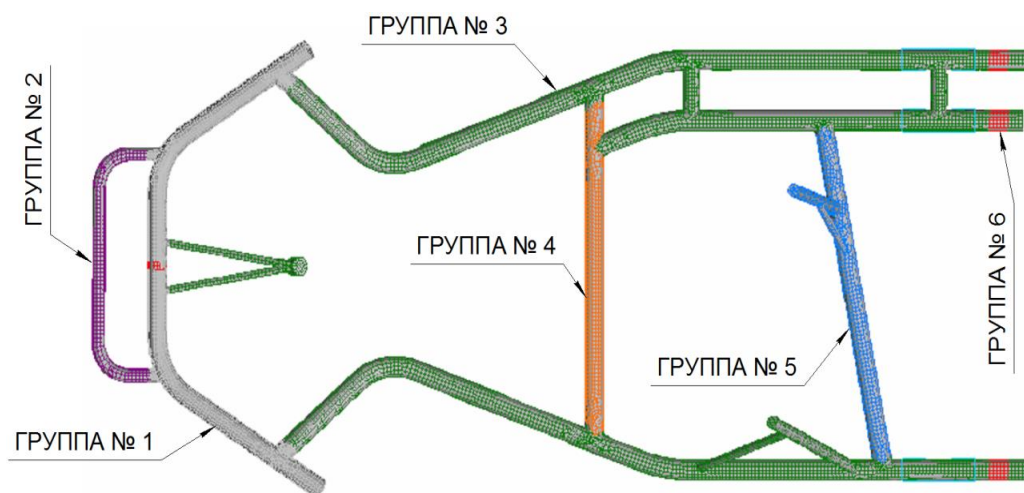


Рисунок 15 – Идентификация различных групп структурных элементов одинаковой толщины

На основе проведенного анализа видно, что наиболее очевидные изменения, относящиеся к жесткости при кручении рамы, связаны с изменением именно компоновки рамы.



Важным преимуществом здесь также является незначительное увеличение массы по сравнению с вариантами, где изменяли толщину стенок выбранных компонентов согласно рисунку 15 и таблицы 2 при схожей жесткости.

Выводы по главе: проведен анализ конструктивных особенностей малолитражного гоночного автомобиля открытого типа. Рассмотрены виды картинга, устройство картов, основные методы проектирования рамы карта с учетом его развесовки. Показано, что разработка оптимальной конфигурации несущей системы малолитражного автомобиля, является одной из основных задач, с которой сталкиваются при конструировании карта.

Проведен обзор технических решений, применяемых при конструировании рамы карта. Рассмотрены как вопросы наилучшего расположения труб несущей конструкции, то есть непосредственно самой конфигурации рамы, так и материалов рамы, толщины поперечного сечения элементов рамной конструкции и способов крепления основных узлов карта.

Выявлены недостатки существующих конструкций, что позволяет нам исключить их при дальнейшем проектировании рамы. Также отмечены и достоинства, которые по возможности будут нами использованы.

## Глава 2 Конечно-элементная модель

### 2.1 Компоновка карта

В первую очередь необходимо составить компоновку будущего малолитражного гоночного автомобиля, ведь рама является несущей конструкцией и ее конструкция должна предусматривать возможность установки всех компонентов будущего автомобиля. Так на рисунках 16-19 представлена 3D-модель стандартной компоновки автомобиля класса «кارت», разработанная при помощи пакета моделирования Компас 3D.

Данная компоновка в полной мере позволяет установить на раме двигатель, сиденье пилота и рулевое управление. Передние колеса на карте выполняют меньшего диаметра по сравнению с задними, а из-за отсутствия системы подвесок амортизаторами выступают как раз рама карта и его шины.

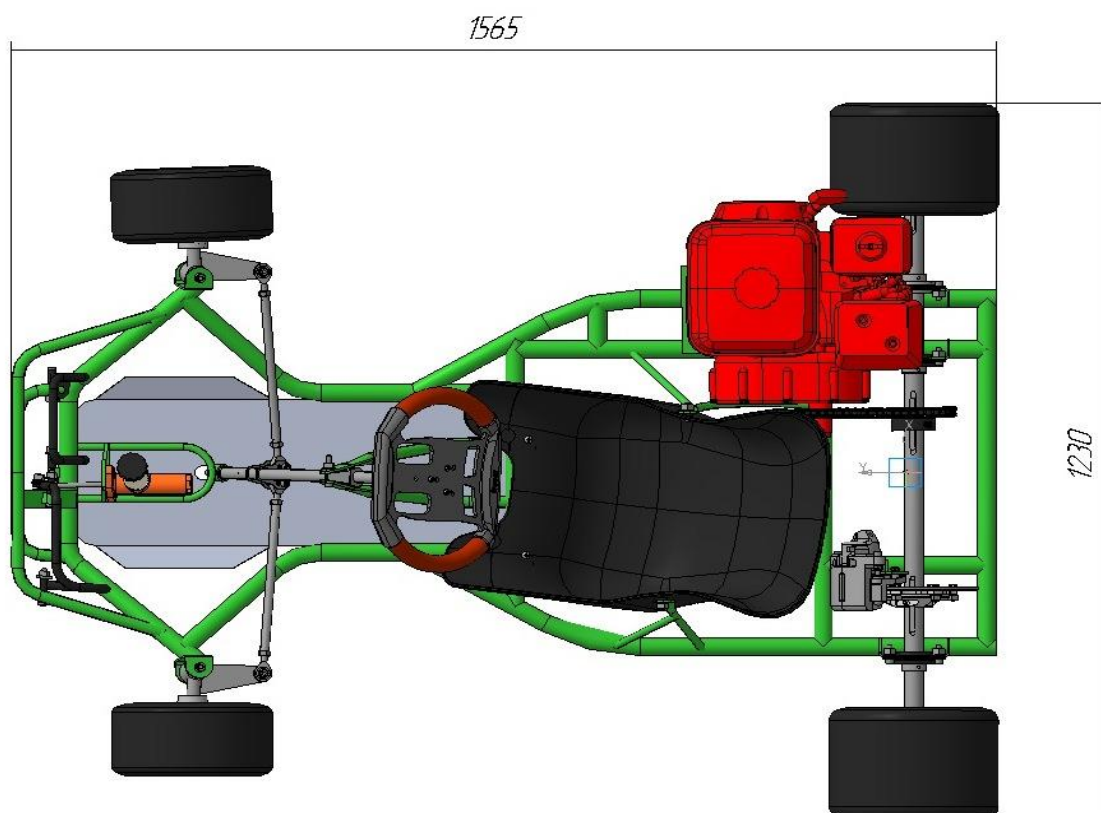


Рисунок 16 – Вид сверху на автомобиль

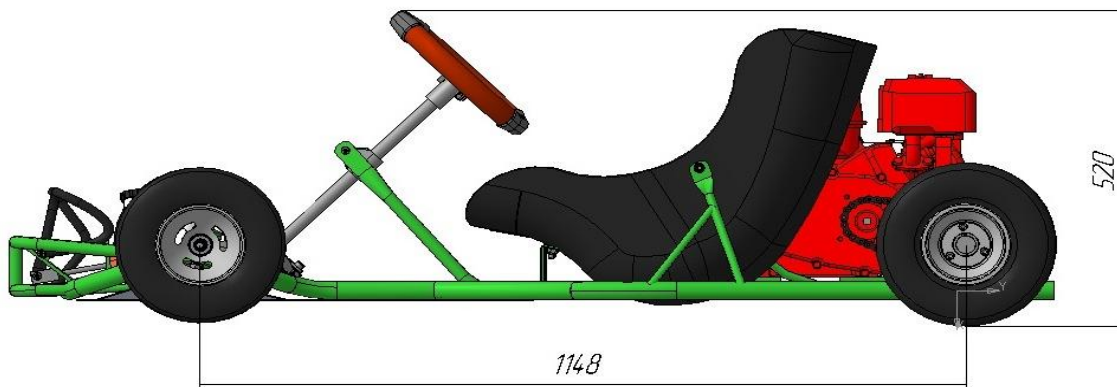


Рисунок 17 – Вид сбоку на автомобиль

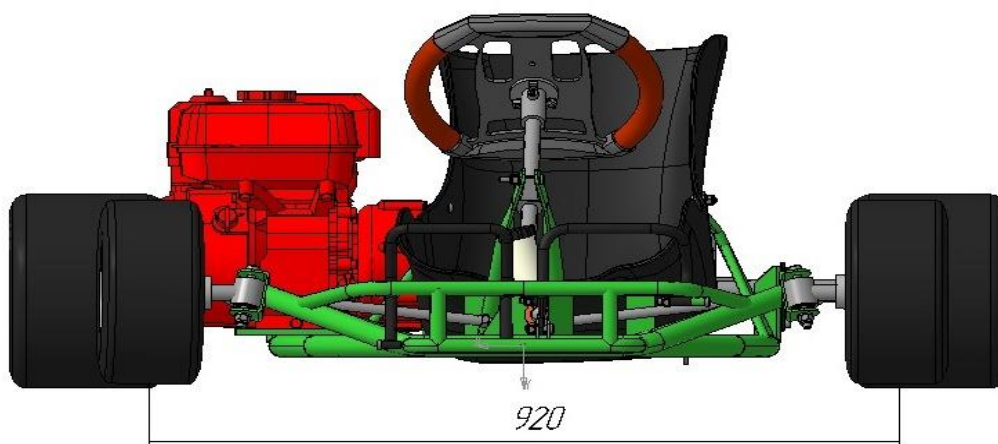


Рисунок 18 – Вид спереди на автомобиль

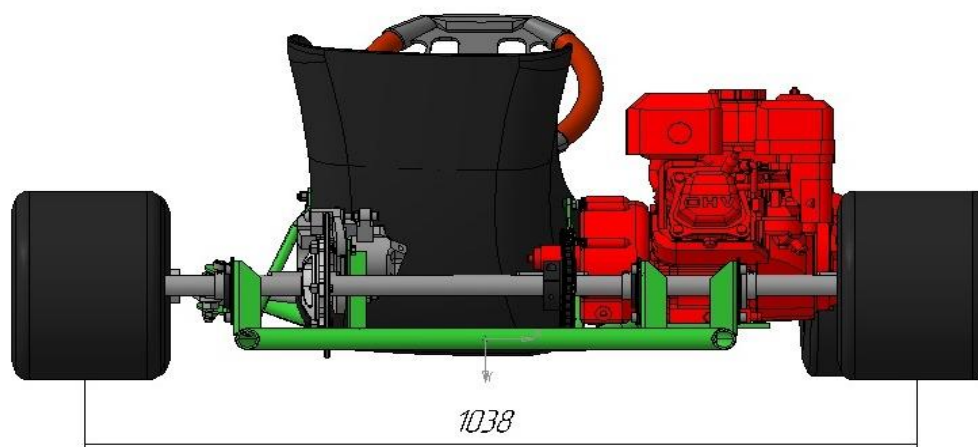


Рисунок 19 – Вид сзади на автомобиль

То есть поведение автомобиля класса «карт» на трассе, его управляемость во многом зависит от конструкции рамы. В настоящее время рамы таких автомобилей изготавливают из стальных труб. На рисунке 20 представлена компоновка рамы автомобиля класса «карт», которая была спроектирована с использованием пакета Компас 3D.

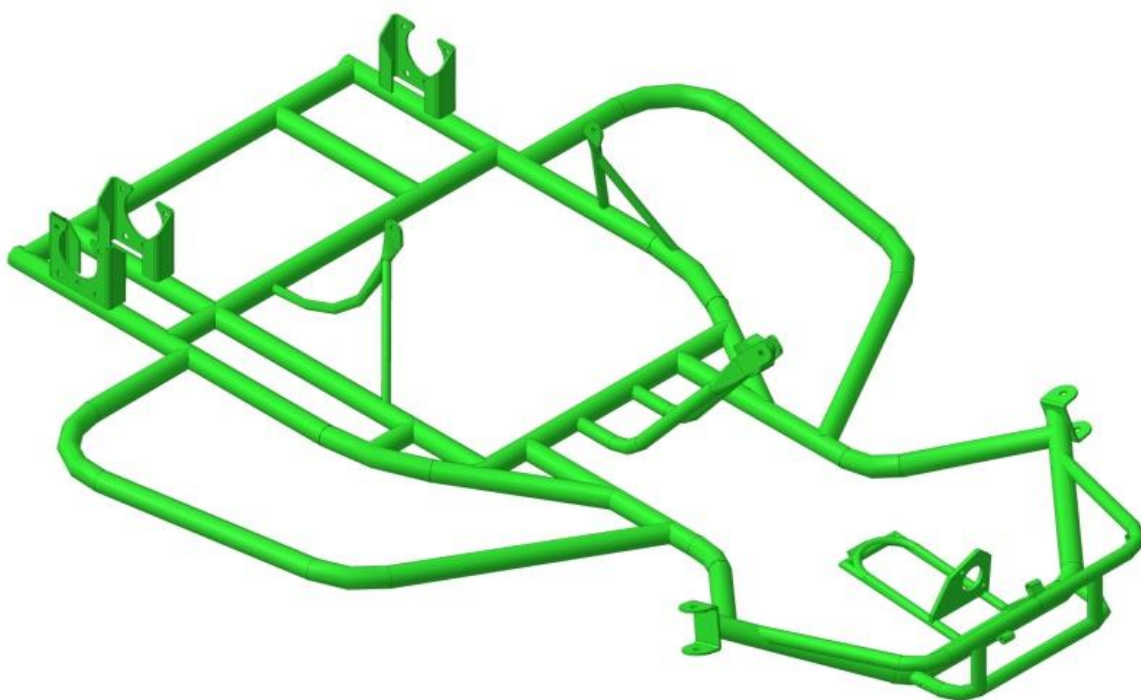


Рисунок 20 – 3D-модель каркаса рамы

Выбор материала несущей конструкции имеет основополагающее значение с точки зрения обеспечения безопасности пилота и надежности транспортного средства. Для прототипа в качестве материала рамы малолитражного гоночного автомобиля используем трубный прокат из стали 20, которая по справочникам [18, 24] является аналогом конструкционной стали AISI 1020.

В данной конструкции предполагается использовать трубы сортового проката с размерами: 30×3 мм (основная рама), 30×1,5 мм (боковые защитные конструкции), 20×2 мм (остальные элементы).

## 2.2 Подготовка расчетной модели

Пространственные рамные конструкции, примером которых является рама малолитражного гоночного автомобиля, как правило, рассчитывают через одномерные конечные элементы, то есть стержневые.

Для исследования на конструкционную прочность раму нужно экспортировать из пакета Компас 3D в формате IGES или STEP. В этом случае будут экспортированы также и направляющие, вдоль которых были протянуты сечения труб, а именно они нам и будут нужны для конечно-элементного моделирования.

Перед непосредственным исследованием необходимо подготовить расчетную модель. В качестве среды моделирования выбираем пакет Ansys Mechanical, являющимся совокупностью передовых инструментов для решения широкого спектра задач механики деформируемого твердого тела с учетом нелинейных свойств материалов, пластичности и контактного взаимодействия [1, 2].

Расчет будем проводить в модуле Static Structural (рисунок 21), предназначенного для решения задач механики деформируемого твердого тела в статической постановке.

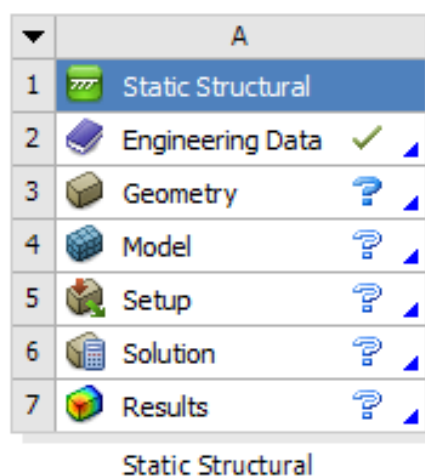


Рисунок 21 – Блок «Static Structural»

Как видно, блок «Static Structural» состоит из шести структурных частей (элементов).

Первым структурным элементом блока «Static Structural» является «Engineering Data». Данный структурный элемент позволяет задать свойства материалов геометрической модели проекта.

Для решения поставленной задачи мы отредактировали некоторые свойства установленного по умолчанию материала – «Structural Steel». Результат представлен на рисунке 22.

The image shows two screenshots from the ANSYS Workbench software. The top screenshot is titled 'Outline of Schematic A2: Engineering Data' and displays a table with columns A, B, C, D, and E. Row 3 is highlighted and shows 'Structural Steel' material with a source of 'General\_Materials.xml' and a description: 'Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1'. The bottom screenshot is titled 'Properties of Outline Row 3: Structural Steel' and shows a table of material properties. A mouse cursor is pointing at the 'Compressive Yield Strength' property.

	A	B	C	D	E
1	Contents of Engineering Data			Source	Description
2	Material				
3	Structural Steel			General_Materials.xml	Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1
*	Click here to add a new material				

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Material Field Variables	Table			
3	Density	7850	kg m <sup>-3</sup>		
4	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion				
6	Isotropic Elasticity				
7	Derive from	Young's Mod...			
8	Young's Modulus	2E+11	Pa		
9	Poisson's Ratio	0,3			
10	Bulk Modulus	1,6667E+11	Pa		
11	Shear Modulus	7,6923E+10	Pa		
12	Strain-Life Parameters				
20	S-N Curve	Tabular			
24	Tensile Yield Strength	2,5E+08	Pa		
25	Compressive Yield Strength	2,5E+08	Pa		
26	Tensile Ultimate Strength	4,6E+08	Pa		
27	Compressive Ultimate Strength	0	Pa		

Рисунок 22 – Окно «Engineering Data»

Далее необходимо создать геометрическую модель либо встроенными средствами моделирования, либо импортировать уже готовую геометрическую модель, созданную в сторонней САД-системе, как в нашем случае. Импортированную модель можно доработать под дальнейшие действия, либо оставить неизменной. При импорте геометрической модели важно учитывать свойства структурного элемента «Geometry». Окно данных свойств появляется на месте панели «Properties of Schematic» (рисунок 23).

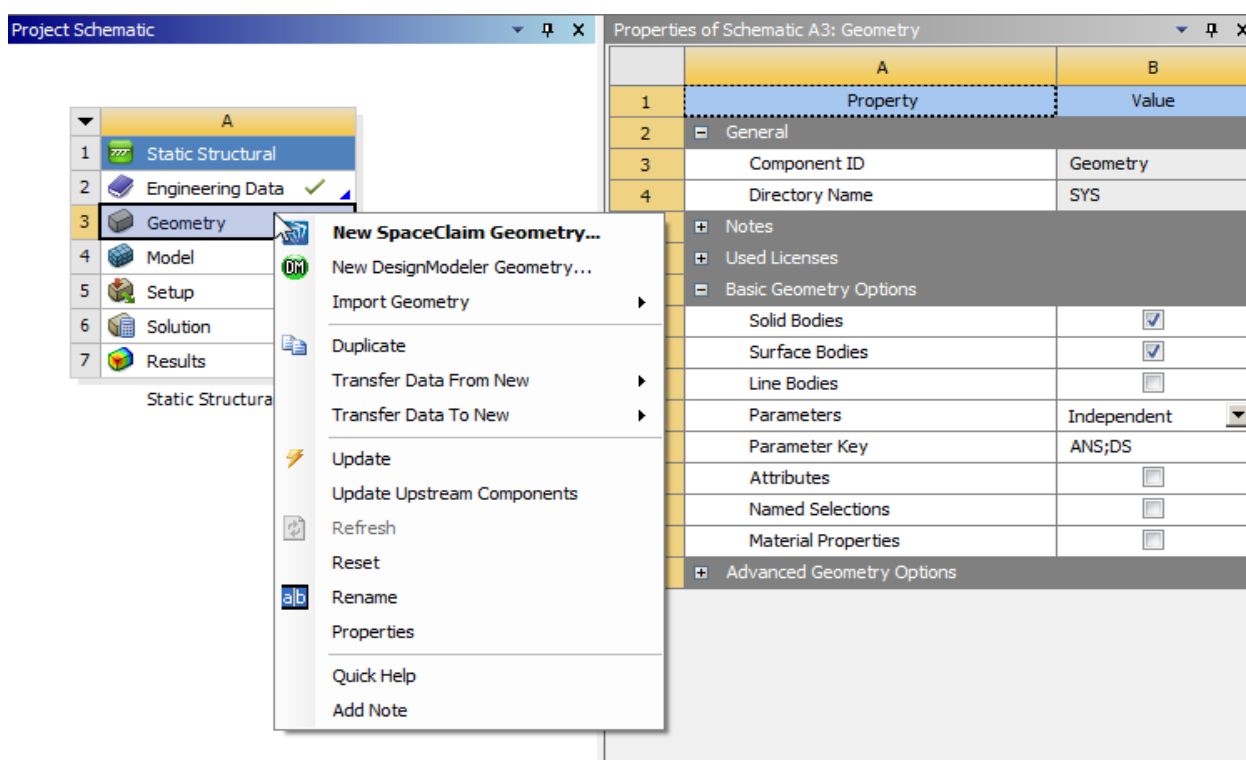


Рисунок 23 – Окно «Properties of Schematic»

Как видно, в разделе «Basic Geometry Options» можно указать размерность импортируемых объектов – 3D (Solid Bodies), 2D (Surface Bodies) либо 1D «Line Bodies», а также опции импорта параметризованных САД-моделей. Так как у нас стержневая модель необходимо активировать опцию «Line Bodies», отключенную по умолчанию.

На рисунке 24 представлена импортированная в модуль Design Modeler стержневая модель карта.

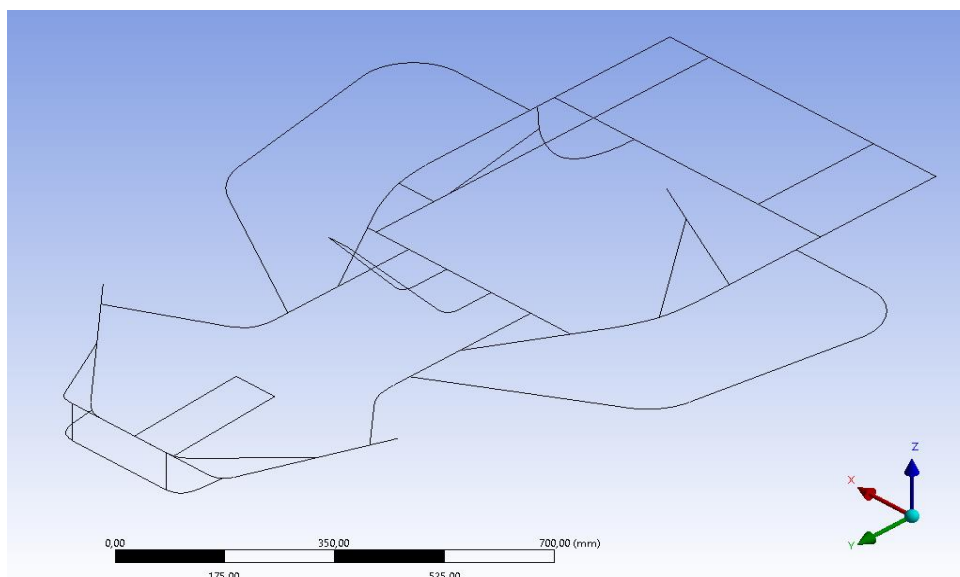


Рисунок 24 – Стержневая модель карта

Следующим шагом необходимо сгруппировать разрозненные линейные тела путем их объединения посредством булевой операции. Объединять тела нужно по сечениям реальной твердотельной модели. Так на рисунке 25 желтым цветом подсвечено объединенной тело, толщина стенок труб которого будет 3 мм.

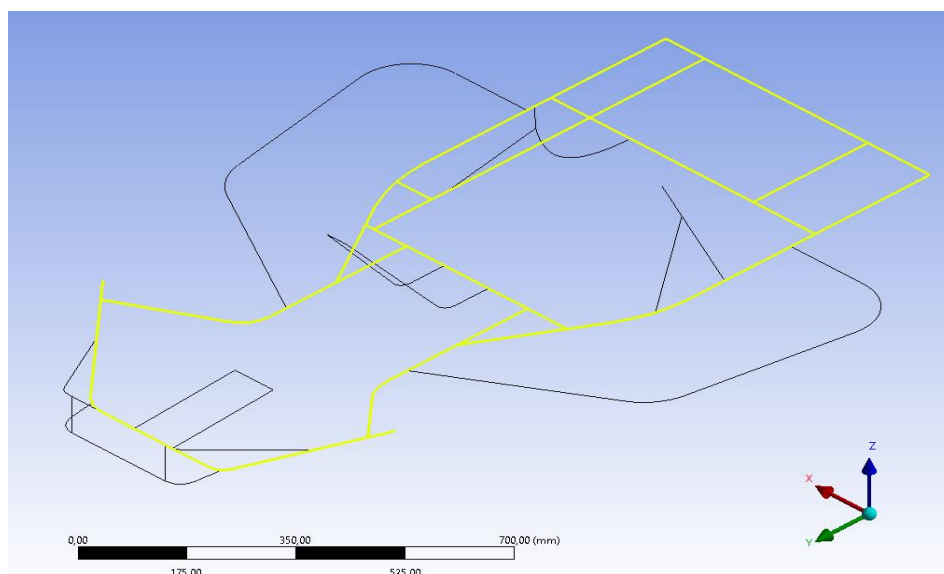


Рисунок 25 – Объединенное тело



После того, как все тела будут сгруппированы необходимо создать сечения для направляющих, которыми собственно являются созданные тела. Делается это посредством команды «Cross Section», где выбираем трубное сечение и задаем соответствующие радиусы. Так на рисунке 26 представлен пример создания сечения диаметром 30 мм с толщиной стенки 3 мм.

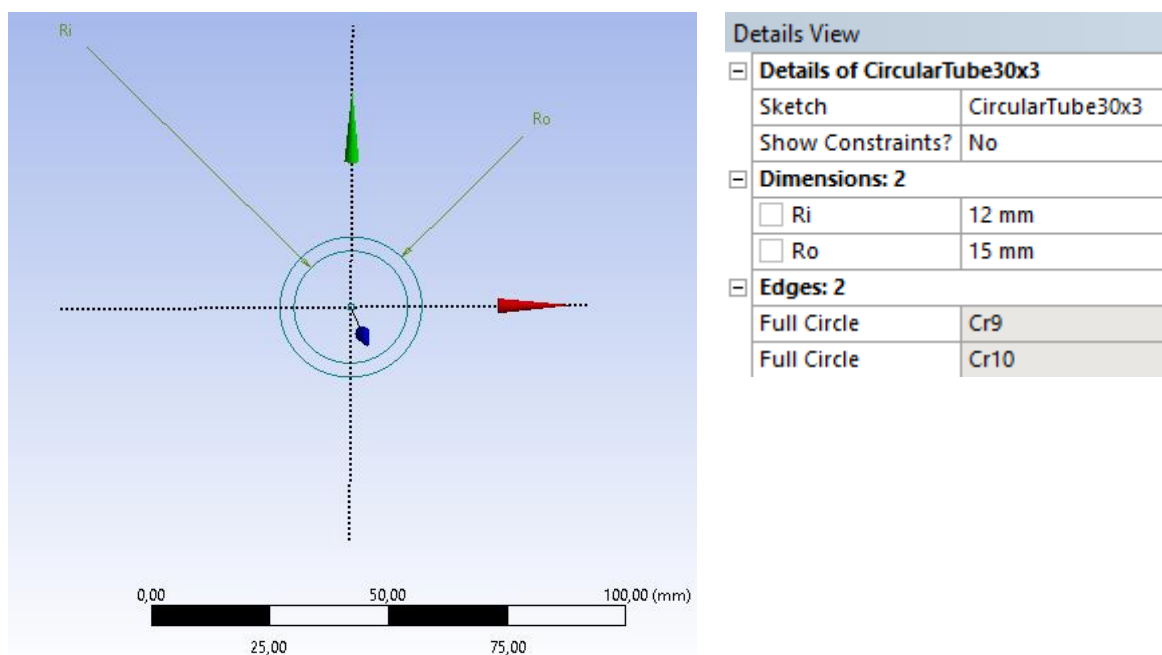


Рисунок 26 – Параметры сечения

После создания всех сечений присваиваем их в соответствии с изначальной CAD-моделью созданным нами линейным телам.

На рисунке 27 представлена стержневая модель карта с присвоенными сечениями.

Для того, чтобы наши разрозненные тела с разными сечениями работали как одно целое необходимо их объединить посредством команды «Form New Part».

На этом создание геометрии в модуле Design Modeler можно считать завершенной.

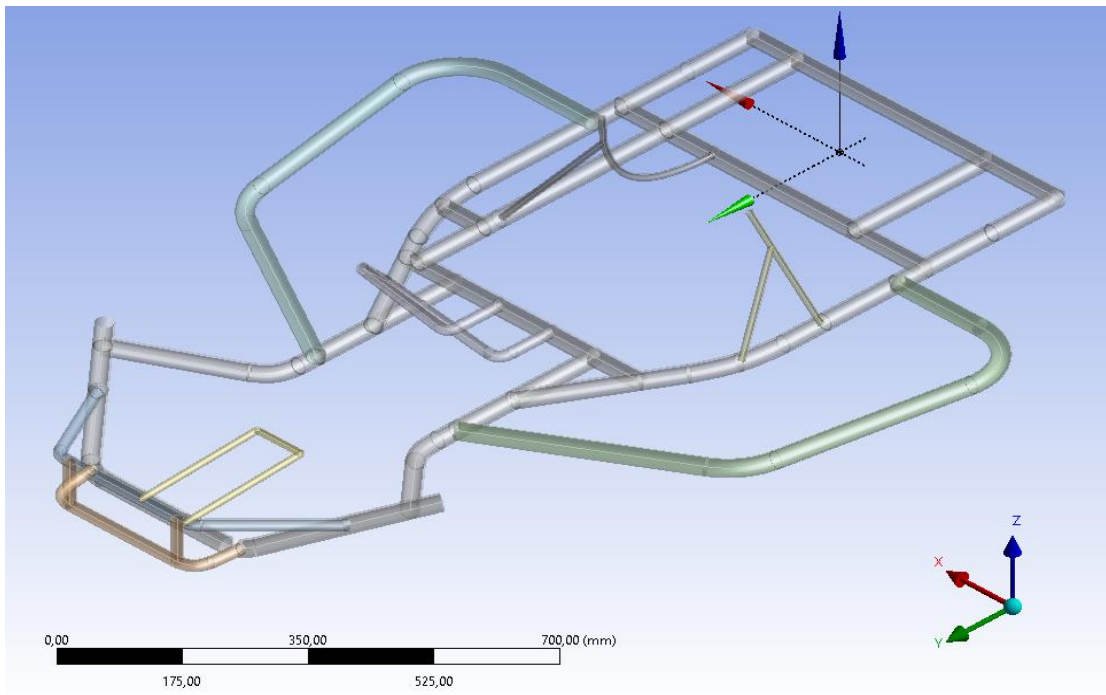


Рисунок 27 – Сечения карта

Далее переходим в следующий структурный элемент блока «Static Structural» – «Model».

На рисунке 28 представлено дерево проекта, где наглядно видно какие шаги необходимо проделать до завершения моделирования.

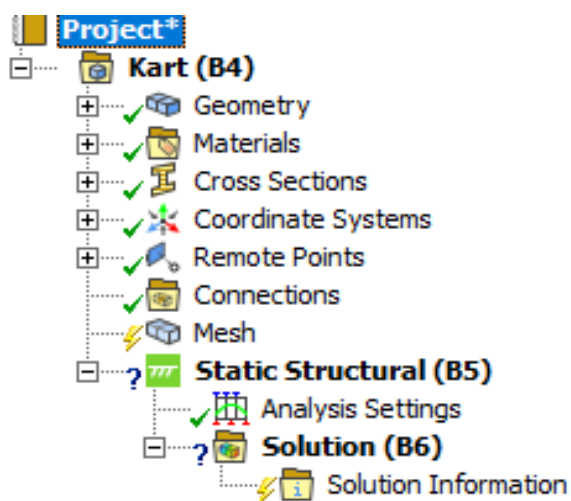


Рисунок 28 – Дерево проекта

Масса нашей конструкции составила 17,75 кг.

Как видно по рисунку 28 все этапы до разбиения конструкции на конечные элементы нами выполнены.

Зададим размер конечного элемента 5 мм и проведем генерацию конечно-элементной сетки. Конечный результат представлен на рисунке 29.

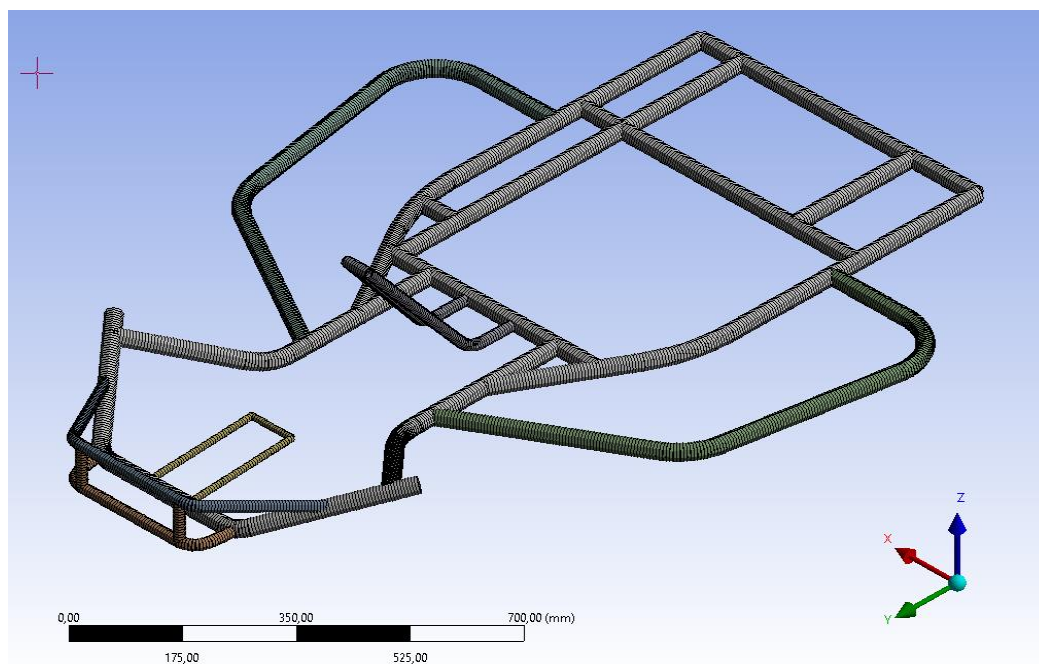


Рисунок 29 – Конечно-элементная модель

На этом создание конечно-элементной модели можно считать выполненным.

Выводы по главе: представлена 3D-модель стандартной компоновки автомобиля класса «кارت». В качестве материала рамы карта выбрана Сталь 20, как аналог конструкционной стали AISI 1020.

Представлена стержневая модель рамы карта с заданными сечениями трубной конструкции и ее конечно-элементная модель.

## Глава 3 Конструкционная прочность рамы карта

### 3.1 Анализ конструкционной прочности рамы карта

Анализ конструкционной прочности начинается с установления граничных условий. Собственно для этого нужно активировать следующий структурный элемент блока «Static Structural» – «Setup».

Направления приложения нагрузок, прикладываемых к элементам рамы при анализе конструкционной прочности, были выбраны, исходя из проведенного обзора существующих конструктивных решений [3, 5-17].

Величина усилий определялась из расчета предельных перегрузок при столкновении. Точного значения, какие перегрузки должен выдерживать пилот карта не определены – в различных источниках они варьируются от 2g до 5g.

Масса снаряженного карта, в нашем случае, составляет 135 кг. Величину перегрузки варьировали в пределах от 2g до 4g при различных условиях моделирования.

Так на рисунке 30 представлены точки фиксации рамы при расчетах и вектора приложения нагрузки при анализе конструкционной прочности рамы от усилий, приложенных вдоль продольной оси автомобиля класса «карт» к передней балке.

Причем, граничное условие – фиксация смещения по осям X, Y и Z и вращения нижних узлов в местах пересечения труб внешней обвязки под креслом пилота относится ко всем моделируемым случаям, кроме анализа жесткости.

Здесь точки приложения нагрузки – действительные точки по периметру передней балки. Величина силы, исходя из массы карта в 135 кг и перегрузки в 4g, получилась 5292 Н.

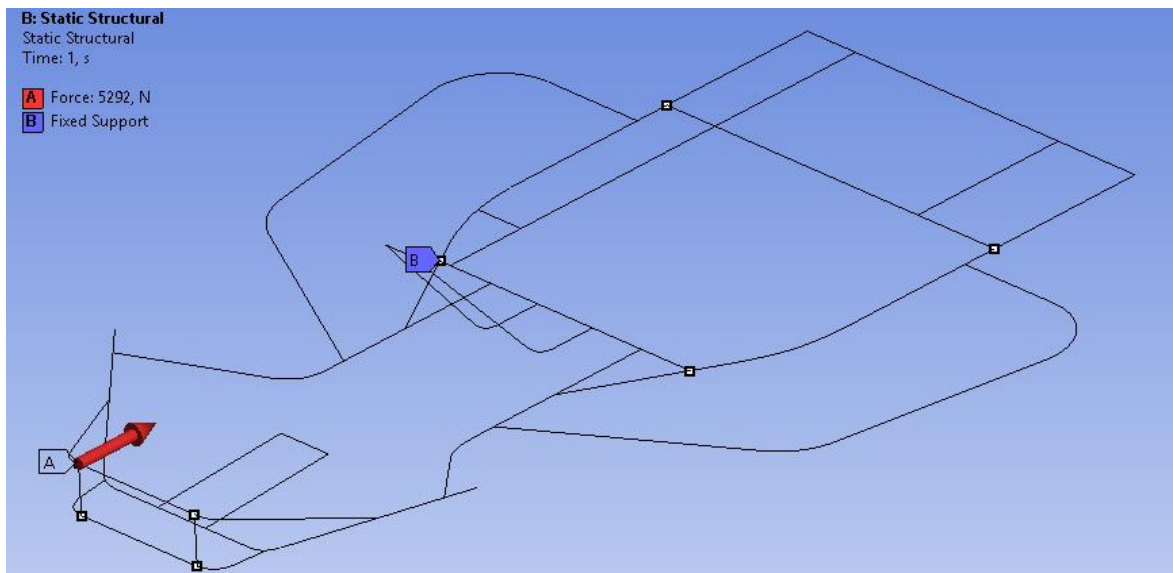


Рисунок 30 – Точки фиксации и вектор усилия

Анализировать непосредственно конструкционную прочность будем по общим деформациям (перемещениям) и по суммарным напряжениям [4], то есть сумме осевых и изгибных напряжений.

Так на рисунке 31 представлена картина деформации рамы под влиянием приложенных нагрузок.

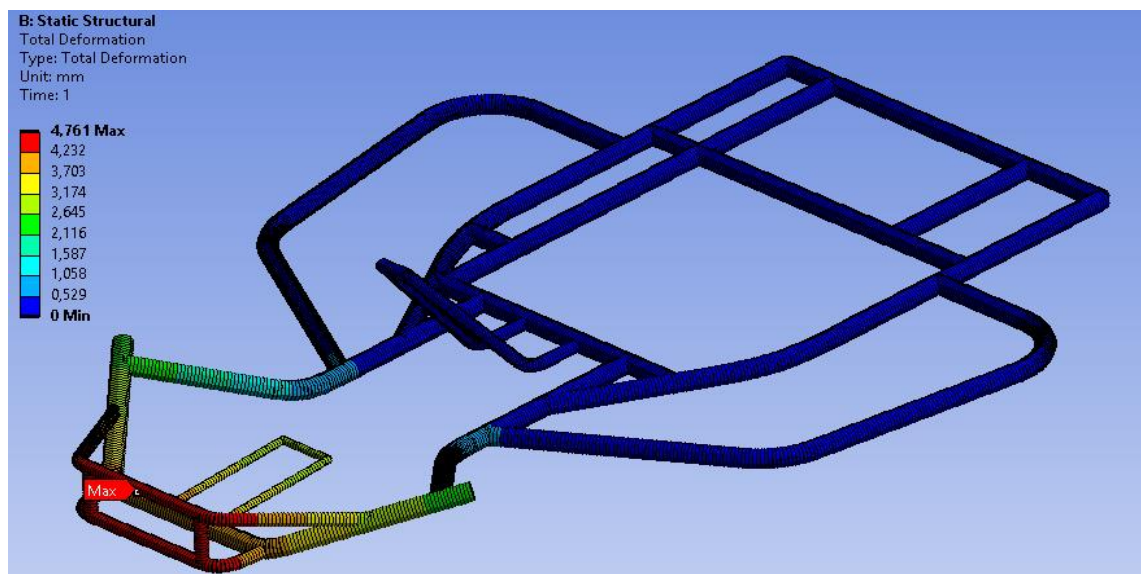


Рисунок 31 – Деформация конструкции при нагружении передней балки по оси

Как видно, деформация рамы составила 4,76 мм, что, с точки зрения безопасности пилота, является допустимой величиной.

На рисунке 32 представлена картина распределения напряжений под влиянием приложенных нагрузок.

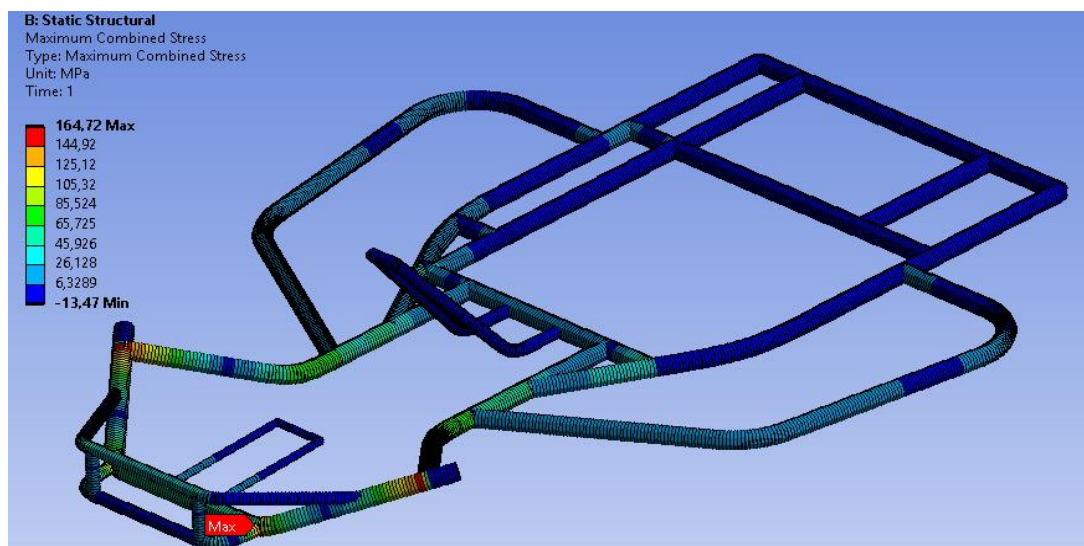


Рисунок 32 – Распределение напряжений при нагружении передней балки по оси

Как видим, максимальные напряжения составили 164,7 МПа.

Для оценки данных напряжений рассчитаем коэффициент запаса прочности как отношение предела текучести материала к величине максимальных напряжений в конструкции. Чем выше значения полученного коэффициента запаса прочности, тем больше готовое изделие способно сопротивляться внешним нагрузкам.

Так как предел текучести Стали 20 составляет 250 МПа (рисунок 22) то запас прочности выходит 1,5 единицы, что является достаточным результатом.

Но фронтальный удар вдоль оси, с учетом трассы картинга является маловероятным, поэтому следующим шагом приложим такую же нагрузку на переднюю балку, но уже под углом к оси симметрии карта.

На рисунке 33 представлены точки фиксации рамы при расчетах и

вектор приложения нагрузки, направленный под углом  $30^\circ$  к оси симметрии.

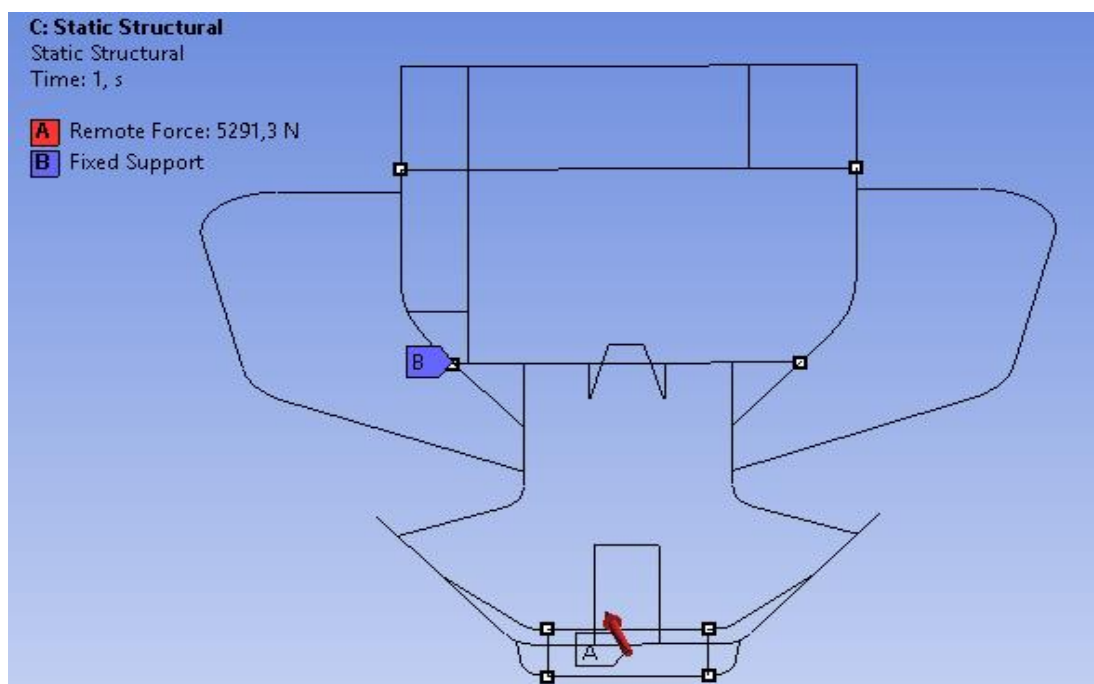


Рисунок 33 – Точки фиксации и вектор усилия

На рисунке 34 представлена картина деформации рамы под влиянием приложенных нагрузок.

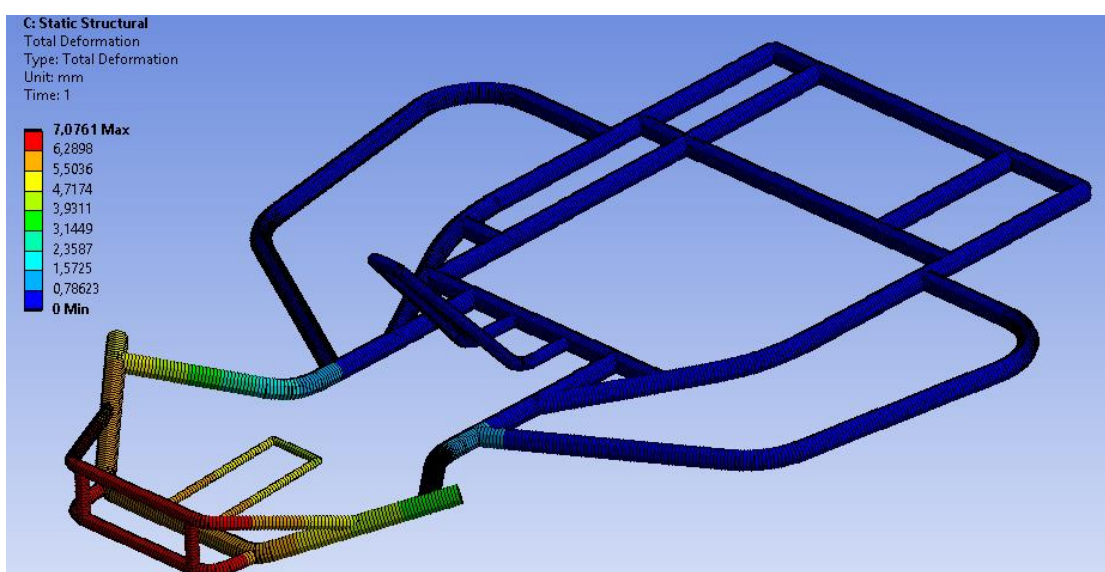


Рисунок 34 – Деформация при нагружении передней балки вне оси

Здесь уже деформация рамы больше и составляет 7,07 мм, что по-прежнему в целом не критично.

На рисунке 35 представлена картина распределения напряжений под влиянием приложенных нагрузок.

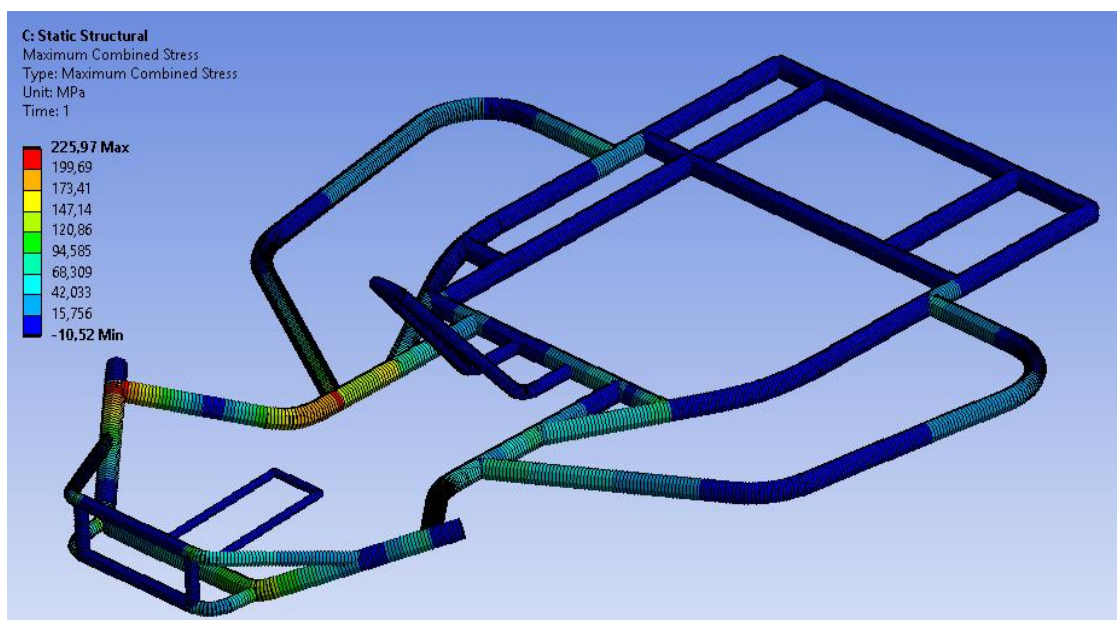


Рисунок 35 – Распределение напряжений при нагружении передней балки вне оси

Как видим, величина максимальных деформаций находится, все еще, в упругой зоне, но коэффициент запаса прочности составляет всего 1,1, что предполагает необходимость оптимизации конструкции, в соответствии с минимально рекомендуемым – 1,5 единицы.

И еще одним довольно частым явлением являются боковые удары в гонках. Согласно литературным данным [5-13] величина усилий при боковом ударе, как правило, принимают в половину величины от силы фронтального удара. Тогда усилие составит – 2446 Н.

На рисунке 36 представлены граничные условия при приложении усилий на боковую дугу рамы автомобиля класса «карт».



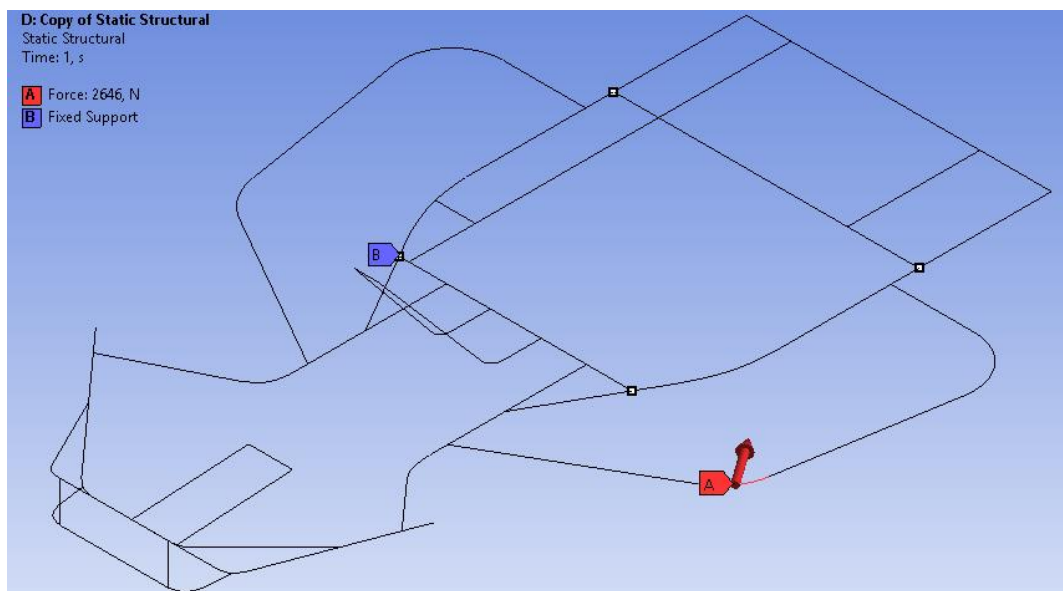


Рисунок 36 – Точки фиксации и прикладываемое усилие при боковом ударе

На рисунке 37 представлена картина деформации рамы под влиянием приложенных нагрузок при боковом ударе.

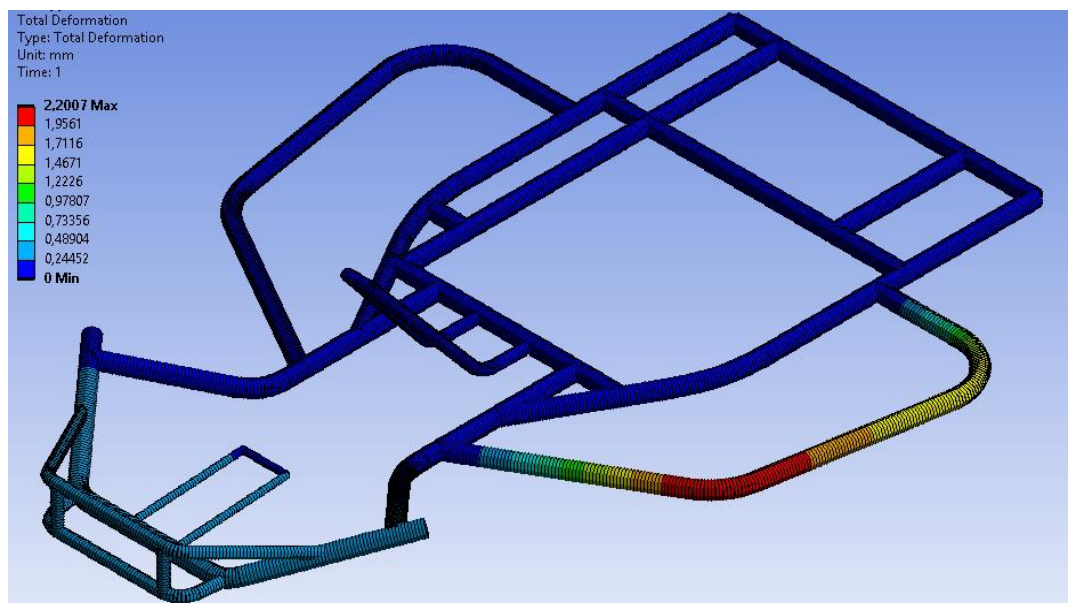


Рисунок 37 – Деформация конструкции при нагружении боковой дуги рамы

Как видно, величина деформации составила всего 2,2 мм.

На рисунке 38 представлена картина распределения напряжений под

влиянием приложенных нагрузок.

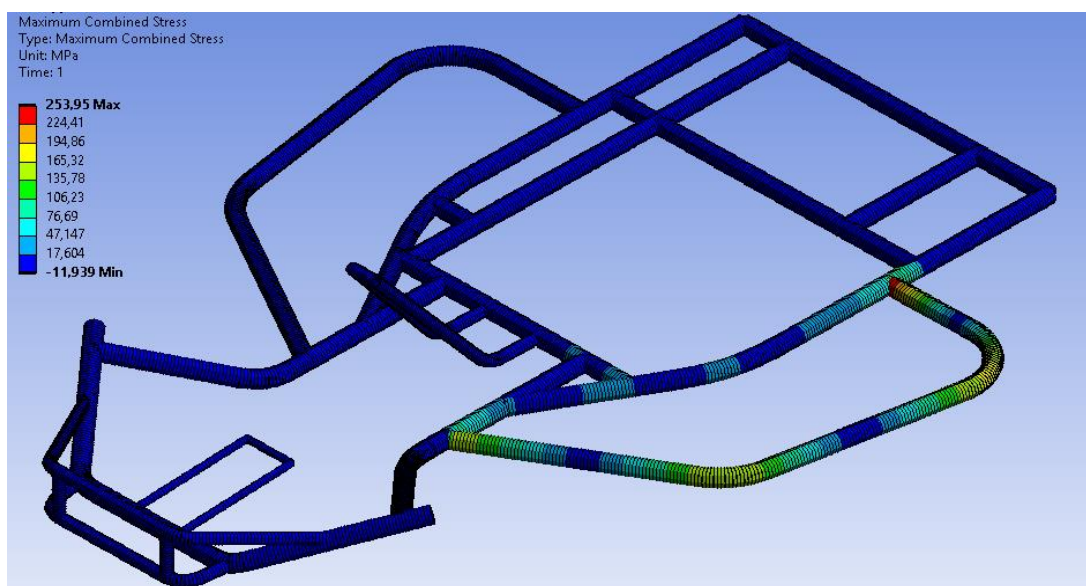


Рисунок 38 – Распределение напряжений при нагружении боковой дуги рамы

Как видим, максимальные напряжения сконцентрировались в месте крепления дуги к основной раме и их величина составляет 253,95 МПа, что уже является критичным, потому как превышает предел текучести используемой стали.

Также наиболее часто встречается исследование на удар сзади. Нагрузки здесь опять варьируются в зависимости от источника от 2g до 4g. Примем в этом случае по максимуму, то есть такой же величины, как и при фронтальном ударе – 5292 Н.

На рисунке 39 представлены точки фиксации рамы при расчетах и вектор приложения нагрузки при анализе конструкционной прочности рамы от усилий, приложенных вдоль продольной оси автомобиля напротив места крепления двигателя.

На рисунке 40 представлена картина деформации рамы под влиянием приложенных нагрузок при ударе сзади.

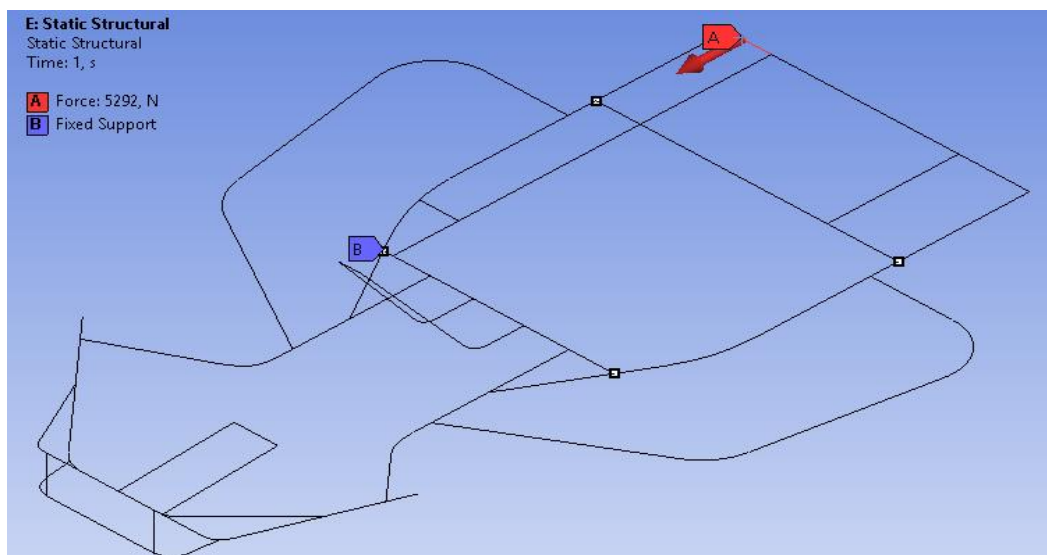


Рисунок 39 – Точки фиксации и прикладываемое усилие при ударе сзади

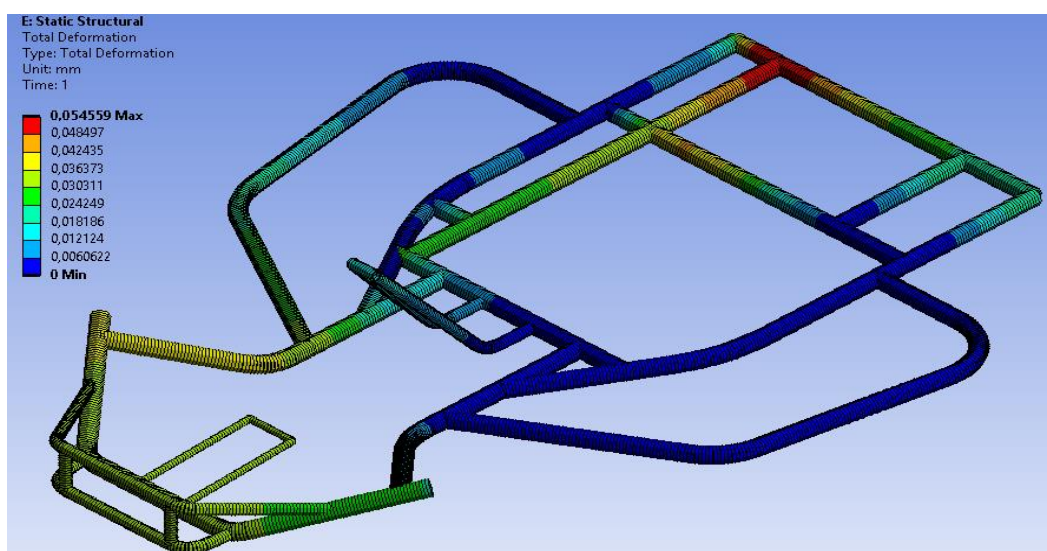


Рисунок 40 – Картина деформации конструкции рамы при моделировании удара сзади

Как видно, деформация практически полностью отсутствуют по сравнению с предыдущими нагрузками и составляет 0,05 мм. Но как показало моделирование бокового удара небольшая деформация не гарантирует конструкционной прочности.

На рисунке 41 представлена картина распределения напряжений под влиянием приложенных нагрузок.

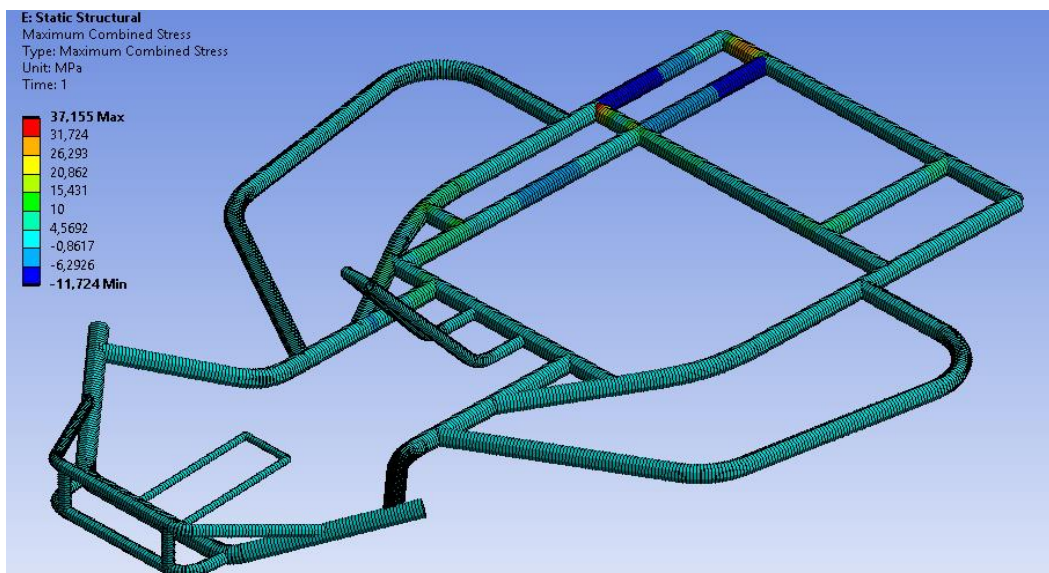


Рисунок 41 – Распределение напряжений при моделировании удара сзади

Как видно, наибольшая концентрация напряжений формируется в местах крепления труб между собой, но ее величина всего 37,15 МПа, что дает практически семикратный запас прочности.

### 3.2 Анализ жесткости базовой конструкции рамы

Заключительным этапом моделирования данной конструкции будет исследование на жесткость. Данное исследование является основным для всех типов несущих конструкций.

В соответствии с источниками [3, 10, 14, 17] при исследовании жесткости ограничивают раму от всех типов перемещений в местах крепления заднего вала, а силу прикладывают к кронштейнам для крепления осей передних колес. Величина нагрузки варьировалась от 100 до 500 Н. По сути для анализа жесткости сама величина не имеет решающего значения, так как в разных случаях будет соответствующая приложенной нагрузке величина смещения. В нашем случае усилие 500 Н разложим на составляющие и приложим его в противоположных направлениях, моделируя скручивание рамы. На рисунке 42 представлены граничные условия и

вектора сил, приложенные в местах крепления кронштейнов

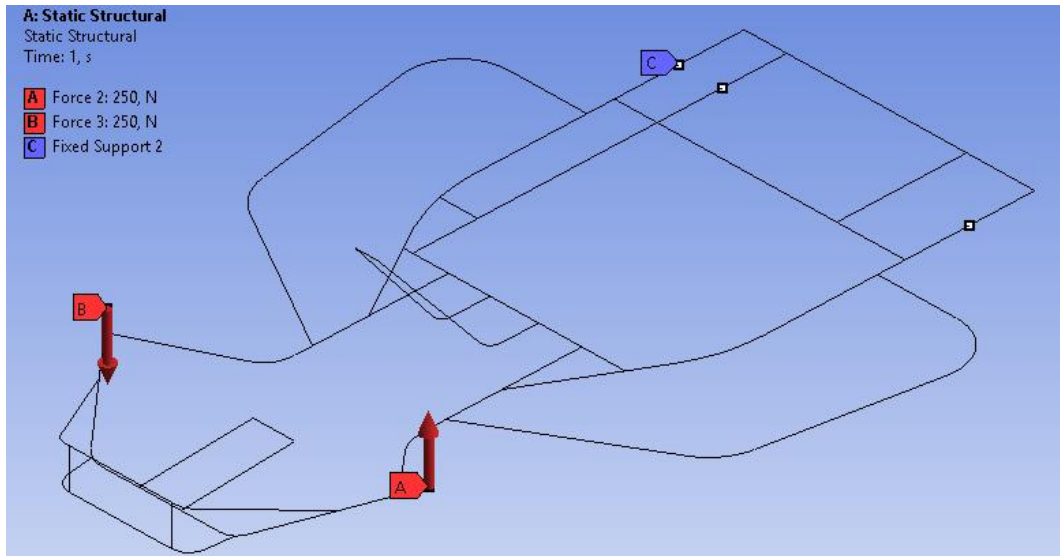


Рисунок 42 – Граничные условия и вектора сил при расчете на жесткость

Расчет жесткости будем проводить по общеизвестной формуле [14]:

$$c_p = \frac{M}{\alpha}, \quad (1)$$

где  $c_p$  – жесткость, Н·м/град;

$M$  – крутящий момент, Н·м;

$\alpha$  – угол поворота при кручении, град.

Крутящий момент рассчитаем по формуле:

$$M = P \cdot 0,5 \cdot t, \quad (2)$$

где  $P$  – общая величина нагрузки, Н;

$t$  – расстояние между кронштейнами для крепления осей передних колес, м.

Схема нагружения при расчете жесткости представлена на рисунке 43.

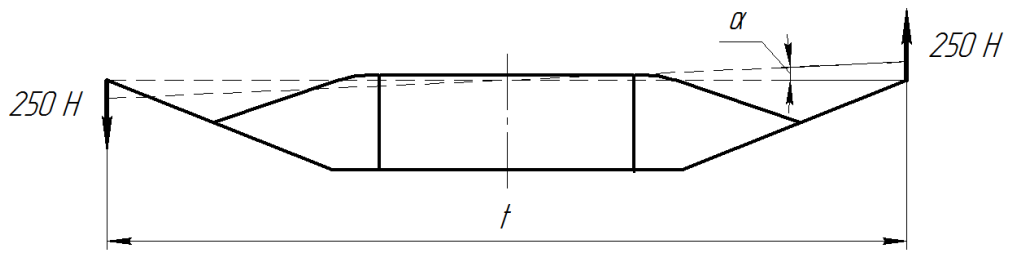


Рисунок 43 – Схема нагружения

На рисунке 44 представлены направления осей системы координат.

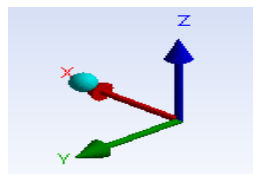


Рисунок 44 – Система координат

На рисунке 45 представлена картина общих перемещений по всем трем координатным осям, а на рисунках 46-47 картина перемещений по осям Z и X соответственно.

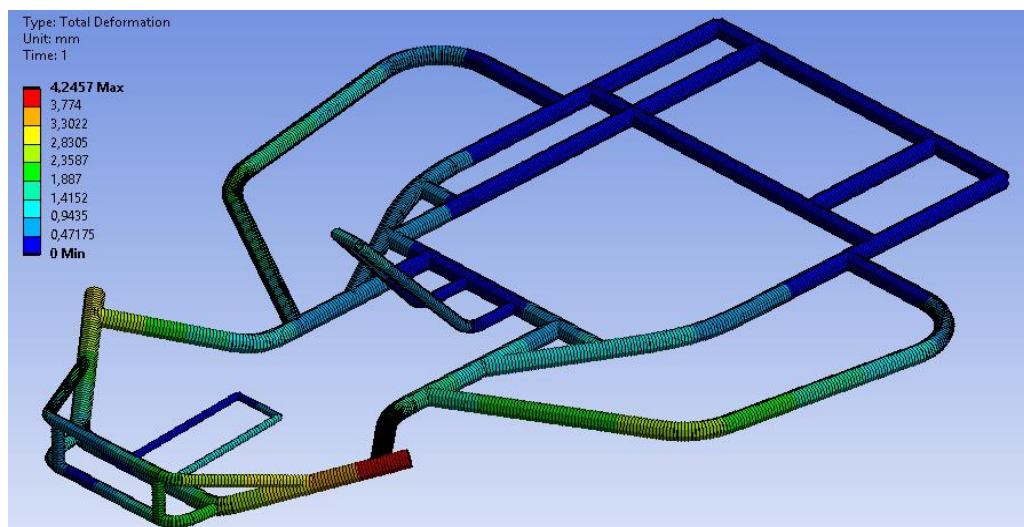


Рисунок 45 – Общие перемещения при расчете на жесткость

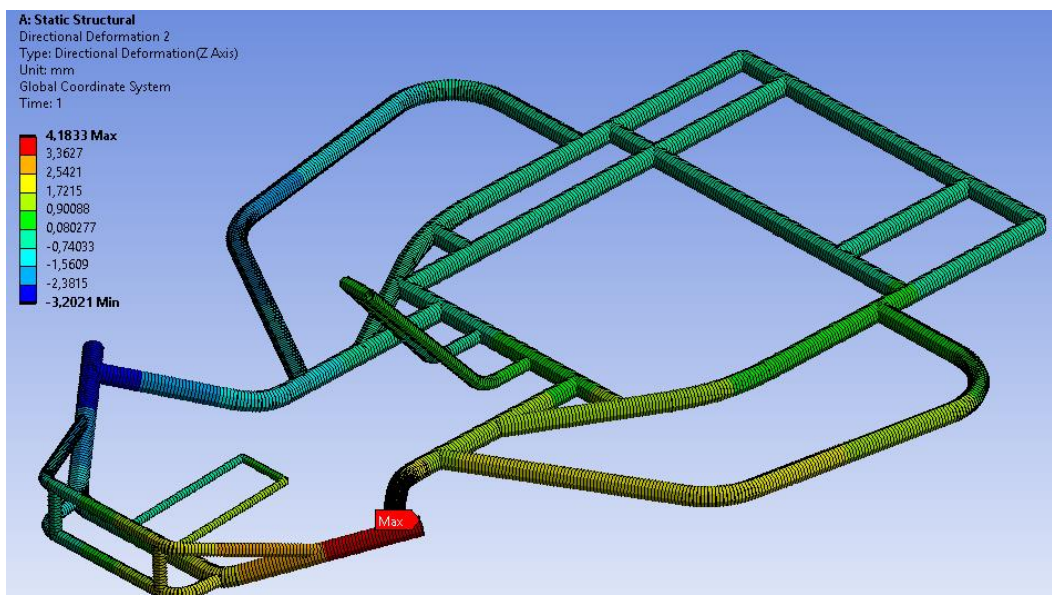


Рисунок 46 – Перемещения вдоль направления оси Z

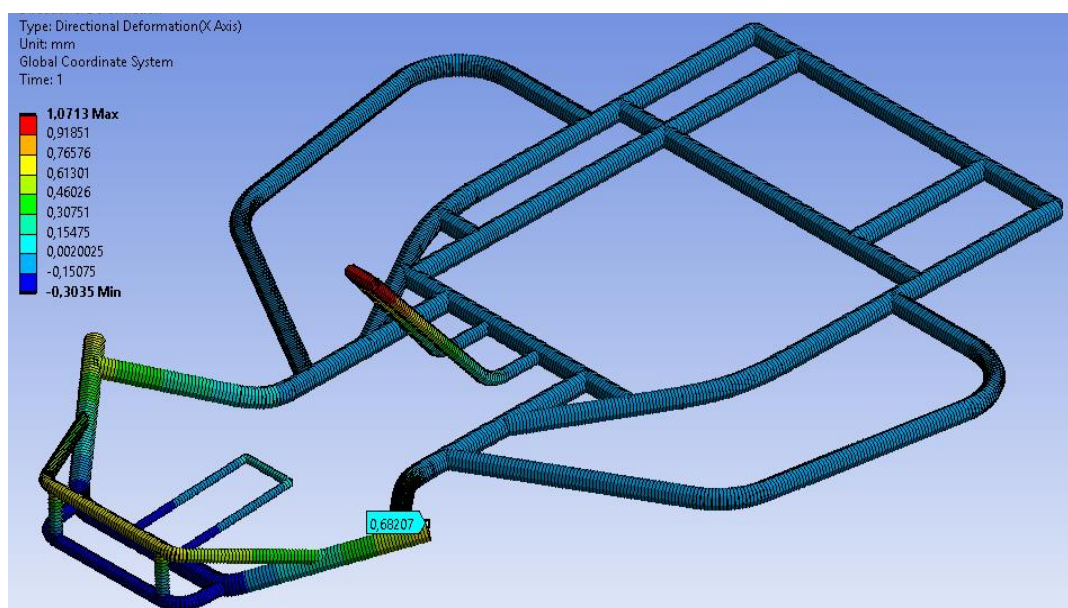


Рисунок 47 – Перемещения вдоль направления оси X

Для определения угла  $\alpha$  нам необходимы значения максимального смещения точки по оси Z – 4,18 мм и смещение этой же точки по оси X – 0,68 мм. Далее методом построения, согласно схеме рисунка 43 определяем угол  $\alpha$  равный 0,75 град.

Далее по формулам 1 и 2 произведем расчет жесткости рамы при

кручении:

$$c_p = \frac{500 \cdot 0,66 \cdot 0,5}{0,75} = 220 \text{ Н} \cdot \text{м/град}$$

Данная величина жесткости является избыточной. Согласно исследованиям для удобства вождения карта жесткость должна находиться в диапазоне от 160 до 190 Н·м/град [3, 10, 14].

Выводы по главе: согласно проведенным расчетам были получены противоречивые результаты. С одной стороны жесткость рамы на кручение получилась избыточной. С другой стороны при моделировании удара передней балки вне оси рамы карта запас прочности практически отсутствует, а при моделировании бокового удара наблюдаются пластические деформации.

Помимо всего прочего вес рамы составляет 17,75 кг, что является довольно большой величиной.

В целом данная конструкция рамы подойдет для использования карта в прокатных целях, где скорости относительно небольшие и величина перегрузки составляет от 2g до 3g.

Но для использования карта в профессиональных гонках необходимо оптимизировать конструкцию рамы, что устранить выявленные недостатки.

Во-первых, нужно подобрать другую сталь, имеющую более высокие прочностные характеристики и попытаться как можно больше снизить массу рамы, оптимизировав сортамент используемых труб.

Во-вторых, нужно оптимизировать компоновку рамы с целью получения необходимой жесткости и прочности.



## Глава 4 Оптимизация рамы карта

### 4.1 Сравнительный анализ жесткости модернизированных рам

Отталкиваясь от проведенного конструкционного анализа прочности рамы в предыдущей главе, было принято решение изменить ее компоновку. Помимо прочего, материалом основной части рамы решено выбрать конструкционную легированную сталь 30ХГСА [27], которую с успехом применяли для рам картов на профессиональных гонках [22, 26]. Выбор данной марки стали позволил изменить сечение основного каркаса рамы с труб диаметром 30 мм и толщиной стенки 3 мм на трубы аналогичного диаметра с толщиной стенки 2 мм.

На рисунке 48 представлены свойства стали 30ХГСА.

1	Contents of Engineering Data			Source	Description
2	Material				
3	30ХГСА			G	Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5 -110.1
4	Structural Steel			G	Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5 -110.1
*	Click here to add a new material				

Properties of Outline Row 3: 30ХГСА				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	7850	kg m <sup>-3</sup>	
4	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion			
6	Isotropic Elasticity			
7	Derive from	Young's Modu...		
8	Young's Modulus	2,15E+11	Pa	
9	Poisson's Ratio	0,3		
10	Bulk Modulus	1,7917E+11	Pa	
11	Shear Modulus	8,2692E+10	Pa	
12	Strain-Life Parameters			
20	S-N Curve	Tabular		
24	Tensile Yield Strength	4,9E+08	Pa	
25	Compressive Yield Strength	4,9E+08	Pa	
26	Tensile Ultimate Strength	6,86E+08	Pa	

Рисунок 48 – Свойства стали 30ХГСА

Также было принято решение проанализировать на жесткость помимо основной компоновки модернизированной рамы с расстоянием в средней части 275 мм (рисунок 49 а) еще два ее варианта – с расширенным расстоянием между трубами средней части рамы на 50 мм (рисунок 49 б) и с зауженным расстоянием на 50 мм (рисунок 49 в).

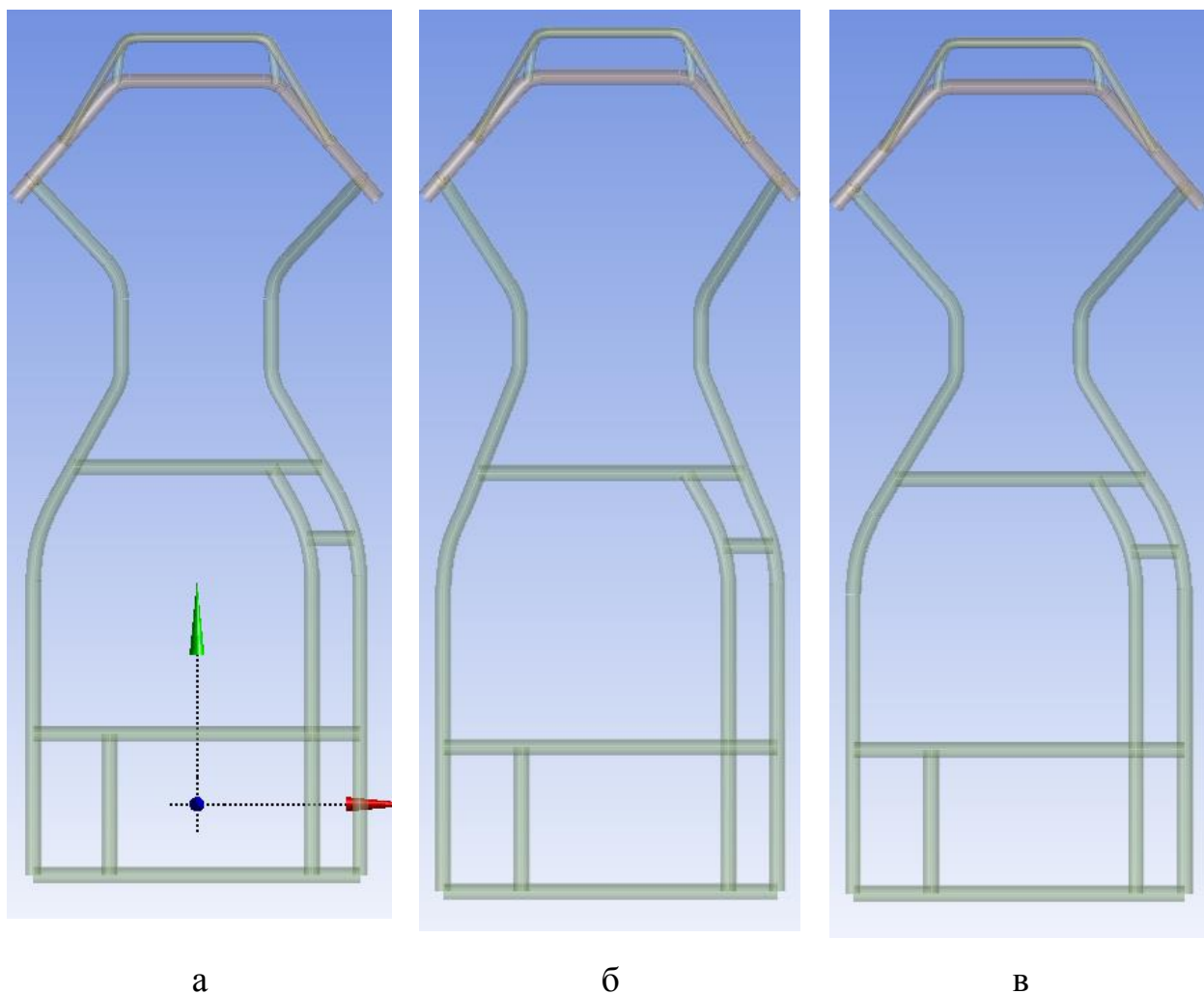


Рисунок 49 – Модифицированная конструкция рамы: а – 275 мм; б – 325 мм;  
в – 225 мм

На рисунке 50 представлены граничные условия, наложенные в местах крепления заднего вала и вектора сил, приложенные в местах крепления кронштейнов для модернизированной рамы с шириной 275 мм.

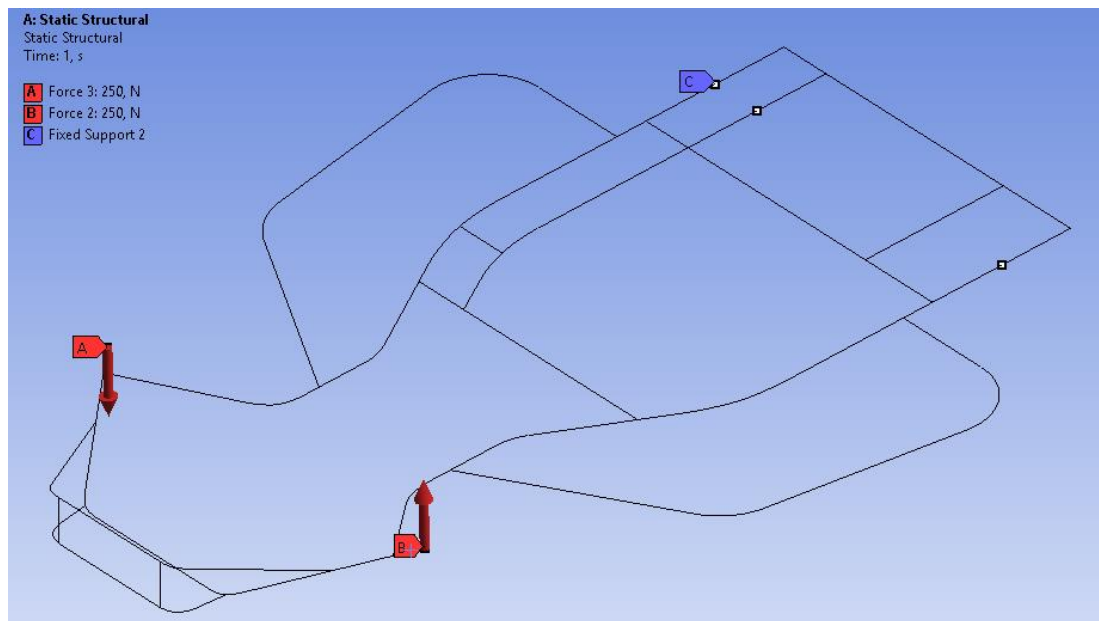


Рисунок 50 – Граничные условия и вектора сил при расчете на жесткость

На рисунке 51 представлена картина общих перемещений по всем трем координатным осям, а на рисунках 52-53 картина перемещений по осям Z и X соответственно.

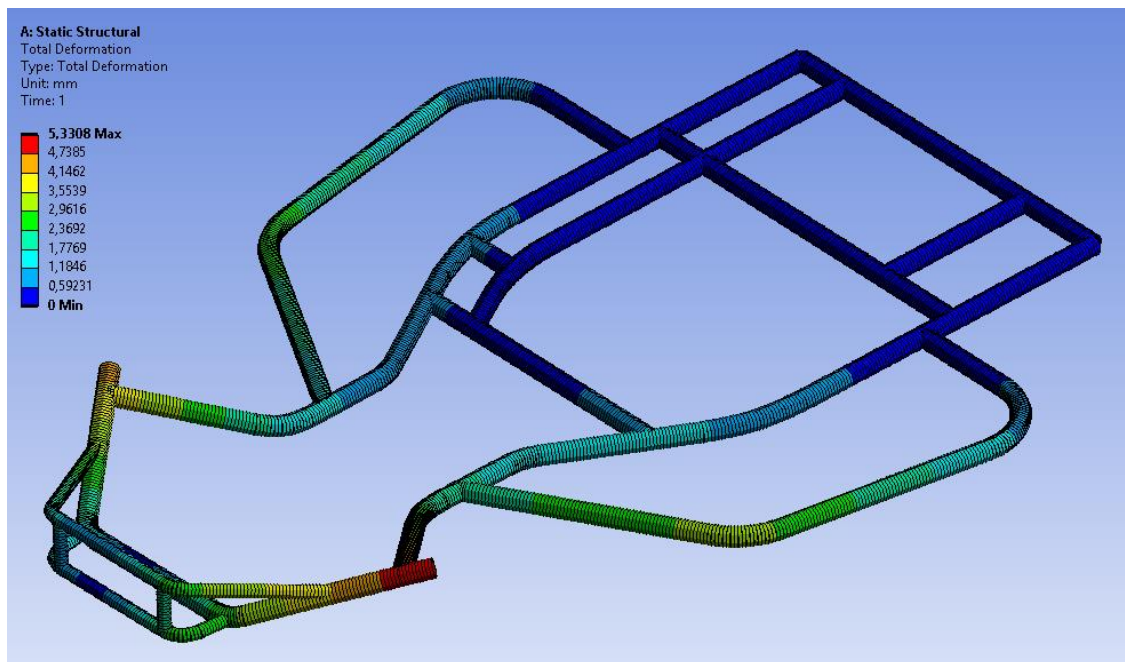


Рисунок 51 – Общие перемещения при расчете на жесткость

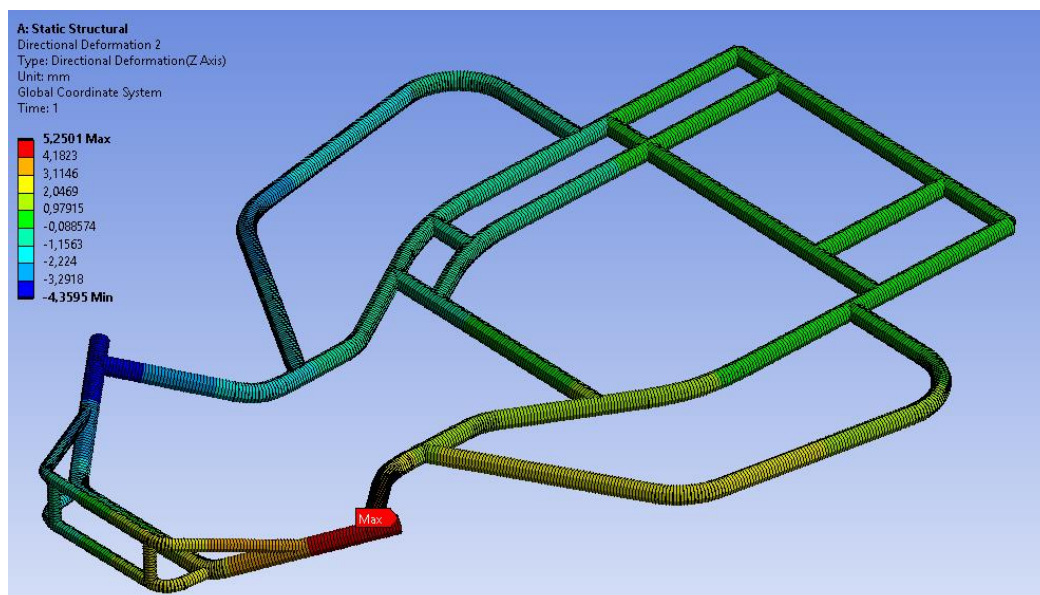


Рисунок 52 – Перемещения вдоль направления оси Z

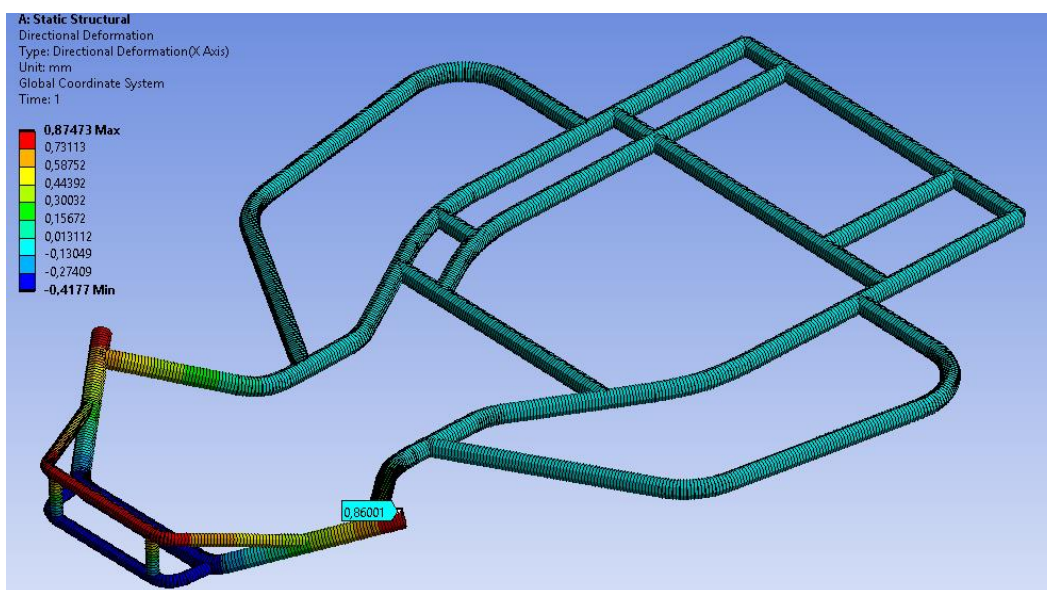


Рисунок 53 – Перемещения вдоль направления оси X

Для определения угла  $\alpha$  анализируем картину общих перемещений, определяем элементы с максимальной деформацией. Затем нам необходимы значения максимального смещения точки по оси Z – 5,25 мм и смещение этой же точки по оси X – 0,86 мм. Направления осей согласно рисунку 44. Далее методом построения, согласно схеме рисунка 43 определяем угол  $\alpha$

равный 0,91 град.

Далее по формулам 1 и 2 произведем расчет жесткости рамы при кручении:

$$c_p = \frac{500 \cdot 0,66 \cdot 0,5}{0,91} = 181,3 \text{ Н} \cdot \text{м/град.}$$

Данная величина жесткости попадает в диапазон от 160 до 190 Н·м/град, а значит является допустимой для изготовления рамы карта. При этом масса конструкции составляет 12,3 кг, что практически на 5,5 кг меньше массы предыдущей конструкции.

Далее проведем анализ рамы с расширенным расстоянием между трубами в переходной части – 325 мм.

Граничные условия и вектора сил соответствуют рисунку 50.

Тогда перейдем к анализу деформаций. Так на рисунке 54 представлена картина общих перемещений по всем трем координатным осям, а на рисунках 55-56 картина перемещений по осям Z и X соответственно.

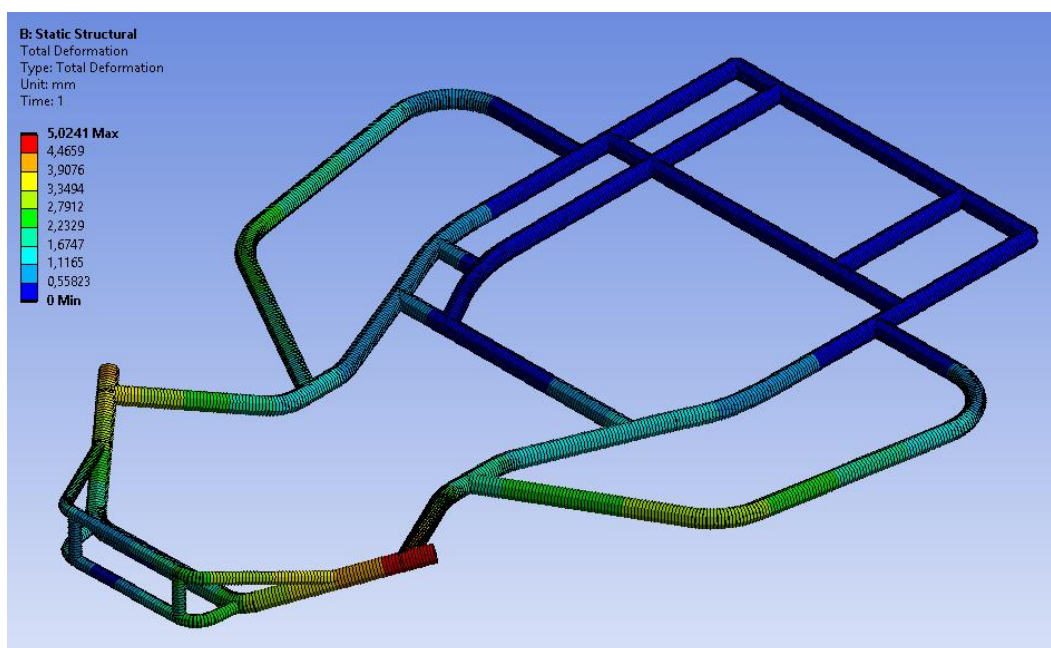


Рисунок 54 – Общие перемещения при расчете на жесткость (ширина 325 мм)

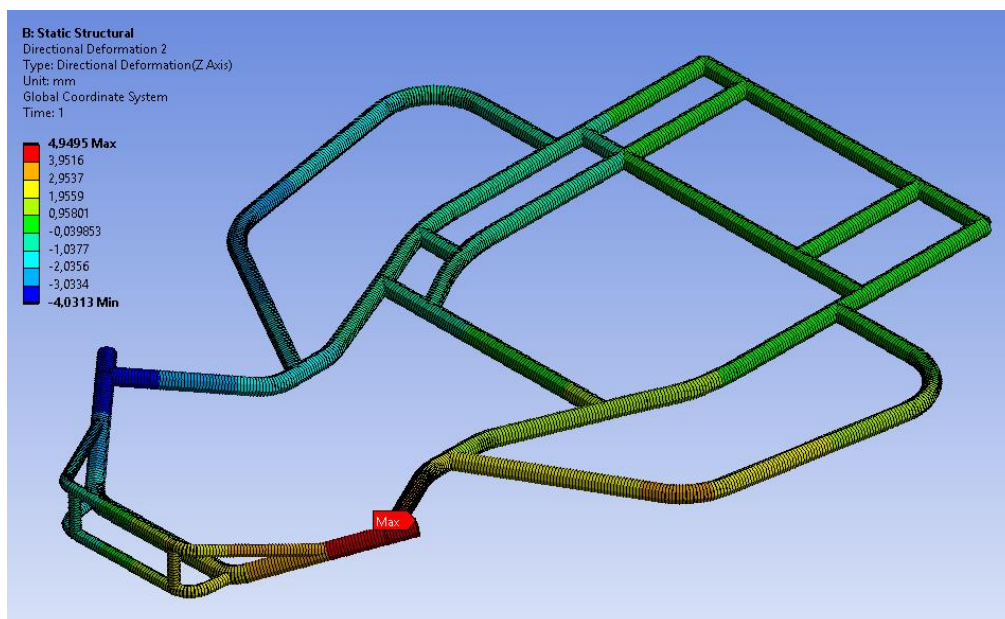


Рисунок 55 – Перемещения вдоль направления оси Z (ширина 325 мм)

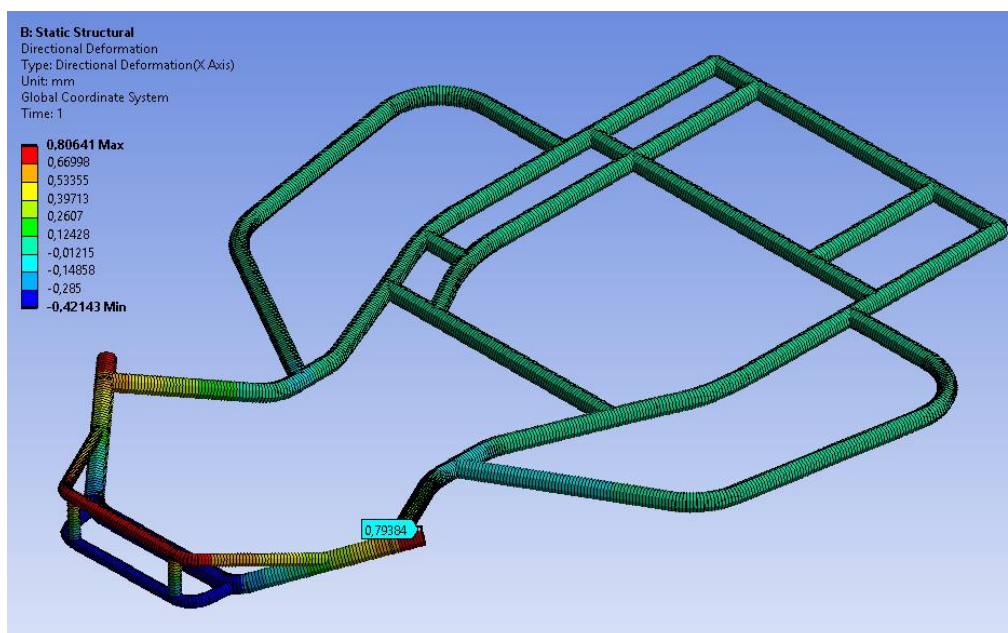


Рисунок 56 – Перемещения вдоль направления оси X (ширина 325 мм)

Получаем значения максимального смещения точки по оси Z – 4,9 мм и смещение этой же точки по оси X – 0,79 мм. Направления осей согласно рисунку 44. Далее методом построения, согласно схеме рисунка 43 определяем угол  $\alpha$  равный 0,85 град.

Далее по формулам 1 и 2 произведем расчет жесткости рамы при кручении:

$$c_p = \frac{500 \cdot 0,66 \cdot 0,5}{0,87} = 189,7 \text{ Н}\cdot\text{м/град.}$$

Данная величина жесткости также попадает в диапазон от 160 до 190 Н·м/град, а значит, является допустимой для изготовления рамы карта. При этом масса конструкции составляет 12,1 кг, что на 0,2 кг меньше массы конструкции рамы с шириной в средней части 275 мм.

Ну и наконец, рассмотрим третью компоновку рамы с зауженным расстоянием между трубами в переходной части – 225 мм.

Граничные условия и вектора сил соответствуют рисунку 50.

Перейдем к анализу деформаций. Так на рисунке 57 представлена картина общих перемещений по всем трем координатным осям, а на рисунках 58-59 картина перемещений по осям Z и X соответственно.

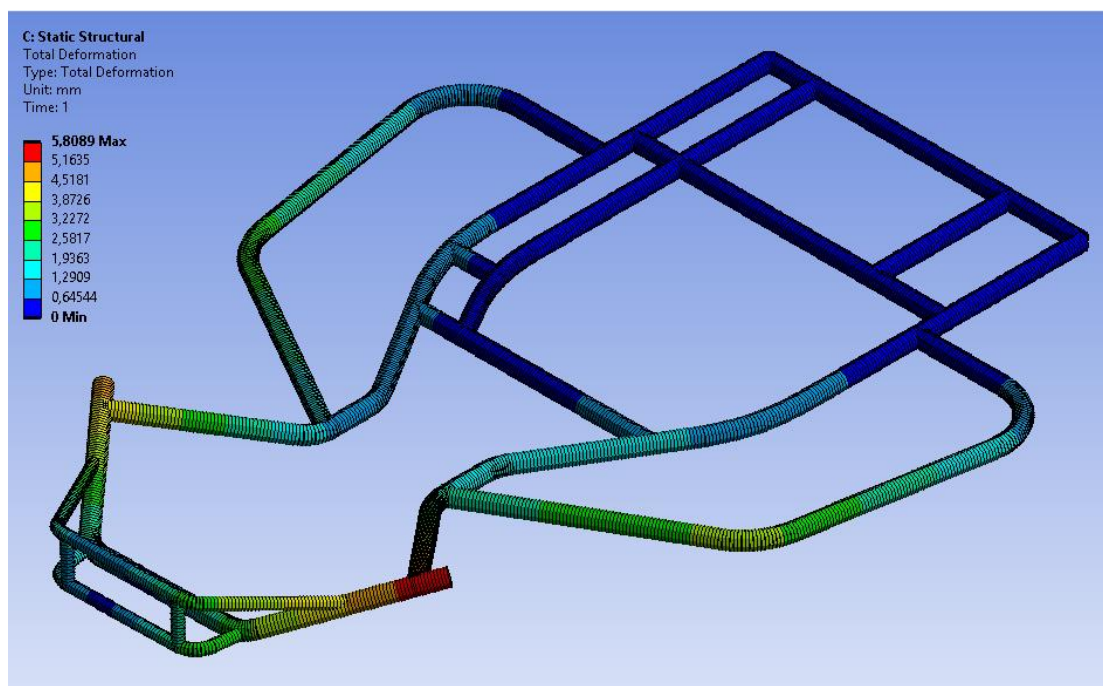


Рисунок 57 – Общие перемещения при расчете на жесткость (ширина 225 мм)

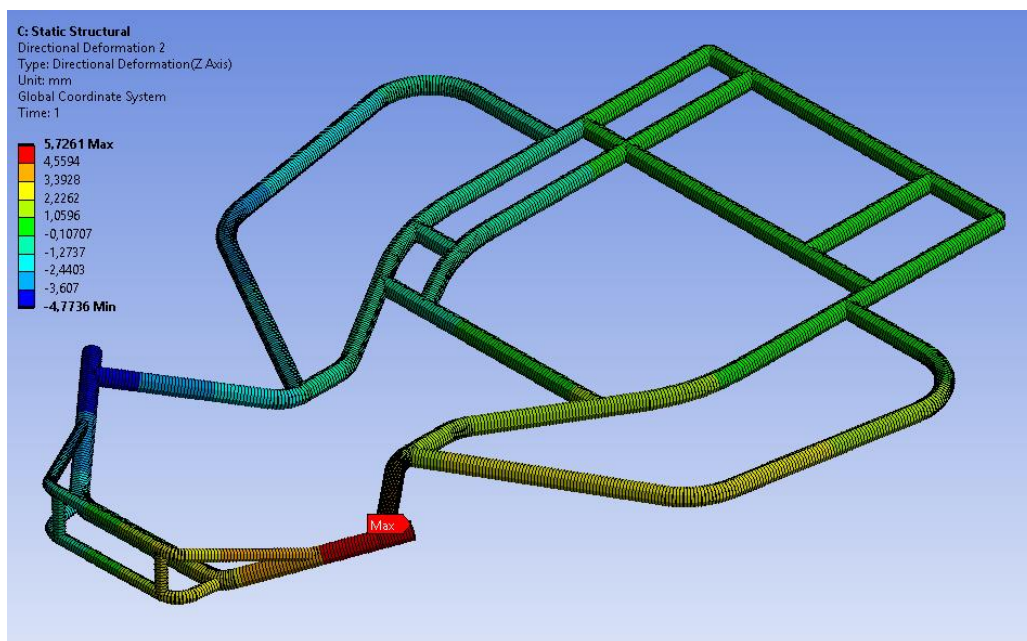


Рисунок 58 – Перемещения вдоль направления оси Z (ширина 225 мм)

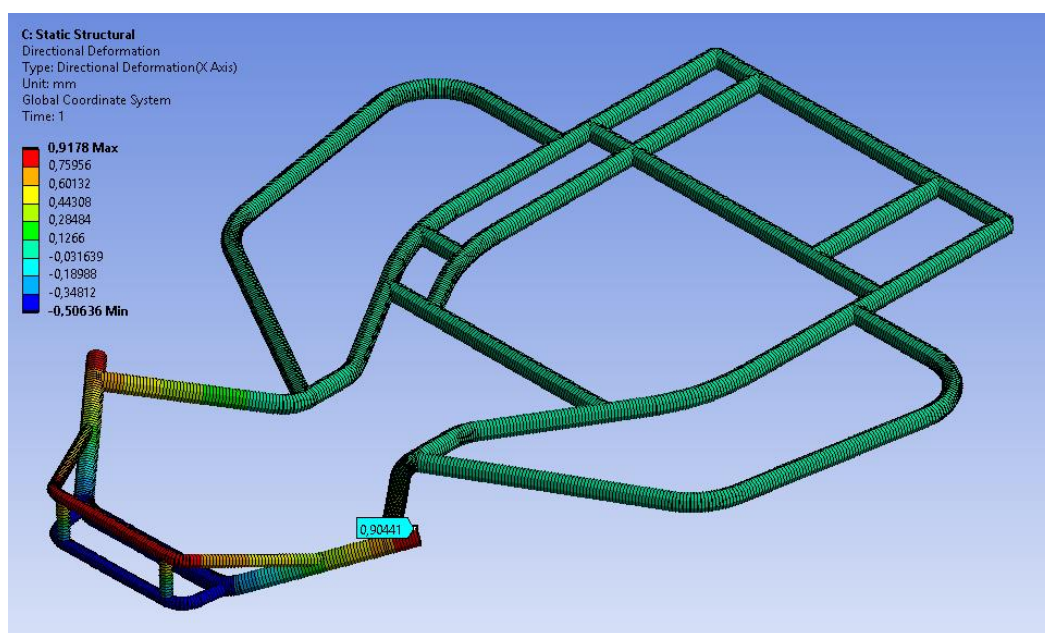


Рисунок 59 – Перемещения вдоль направления оси X (ширина 225 мм)

Получаем значения максимального смещения точки по оси Z – 5,7 мм и смещение этой же точки по оси X – 0,9 мм. Направления осей согласно рисунку 44. Далее методом построения, согласно схеме рисунка 43 определяем угол  $\alpha$  равный 0,99 градусов.



Далее по формулам 1 и 2 произведем расчет жесткости рамы при кручении:

$$c_p = \frac{500 \cdot 0,66 \cdot 0,5}{0,99} = 166,7 \text{ Н}\cdot\text{м/град.}$$

И в третьем случае величина жесткости попадает в диапазон от 160 до 190 Н·м/град, а значит, является допустимой для изготовления рамы карта. Но масса конструкции здесь составляет 12,4 кг, что на 0,1 кг больше массы конструкции рамы с шириной в средней части 275 мм.

Таким образом, проведя анализ этих трех конструкций рамы, приходим к выводу, что наиболее перспективной конструкцией является рама с более широким расположением труб в средней части – 325 мм. Эта конструкция обладает наименьшей массой и при этом имеет самую высокую жесткость – 189,7 Н·м/град, которая укладывается в рекомендуемый диапазон.

Поэтому принимаем данный вариант конструкции как окончательный и проведем полноценный численный анализ конструкционной прочности рамы карта.

#### **4.2 Анализ прочности рамы оптимизированной конструкции**

Направления приложения нагрузок, прикладываемых к элементам рамы при анализе конструкционной прочности, в части случаев повторят исследования главы 3, а в части случаев будут дополнены.

Величину усилий определяли из расчета предельных перегрузок при столкновении, но несмотря на то, что масса снаряженного карта уменьшилась, по крайней мере на 5 кг, оставим для сравнения предыдущий порядок сил. То есть отталкиваемся от 135 кг и величину перегрузки варьируем в пределах от 2g до 4g при различных условиях моделирования.

Так как геометрия рамы немного изменилась, то представим точки фиксации рамы при расчетах и вектора приложения нагрузки при анализе конструкционной прочности рамы от усилий, приложенных вдоль продольной оси автомобиля класса «карт» к передней балке на рисунке 60.

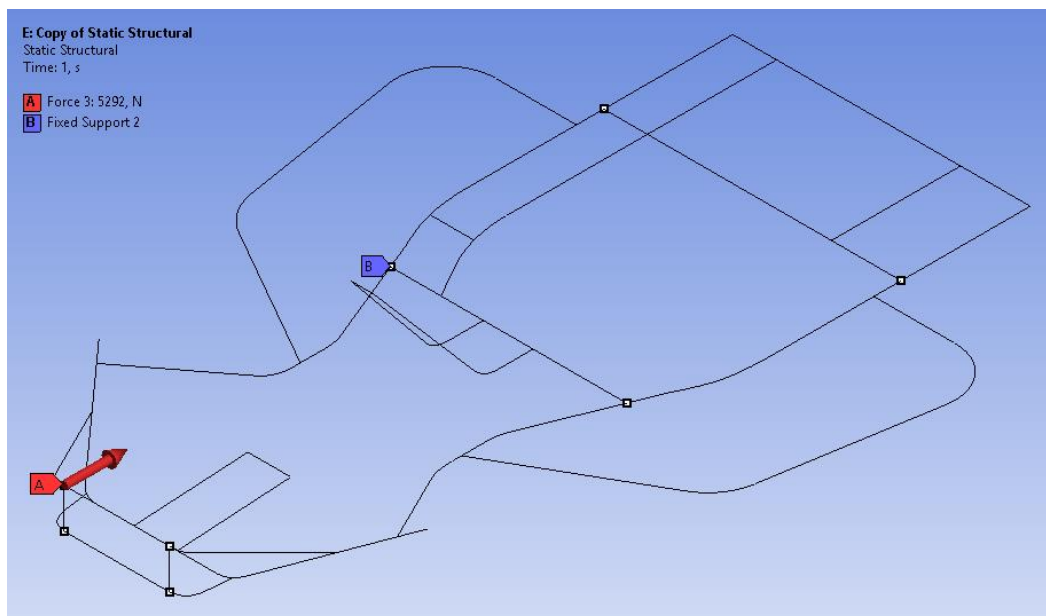


Рисунок 60 – Граничные условия оптимизированной рамы

При этом граничное условие – фиксация смещения по осям X, Y и Z и вращения нижних узлов в местах пересечения труб внешней обвязки под креслом будет повторяться для всех типов исследований.

Здесь точки приложения нагрузки – действительные точки по периметру передней балки. Величина силы будет не 5092 Н (при массе карта 130 кг), а, как и ранее – 5292 Н.

Анализировать конструкционную прочность будем также по совокупности данных анализа общих деформаций (перемещений) и суммарных напряжений.

Картина деформации модернизированной конструкции рамы малолитражного гоночного автомобиля под влиянием приложенных нагрузок представлена на рисунке 61.

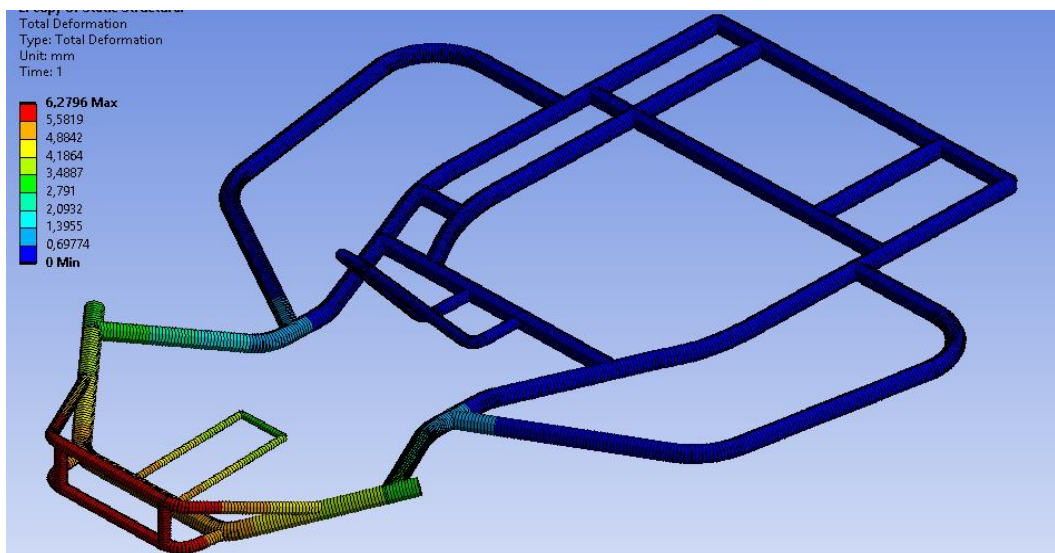


Рисунок 61 – Деформация оптимизированной конструкции при нагружении передней балки по оси

Видно, что деформация рамы составила 6,28 мм, что на 1,5 мм выше, чем при анализе базовой конструкции, но, тем не менее, с точки зрения безопасности пилота, является допустимой величиной.

Картина распределения напряжений под влиянием приложенных нагрузок представлена на рисунке 62.

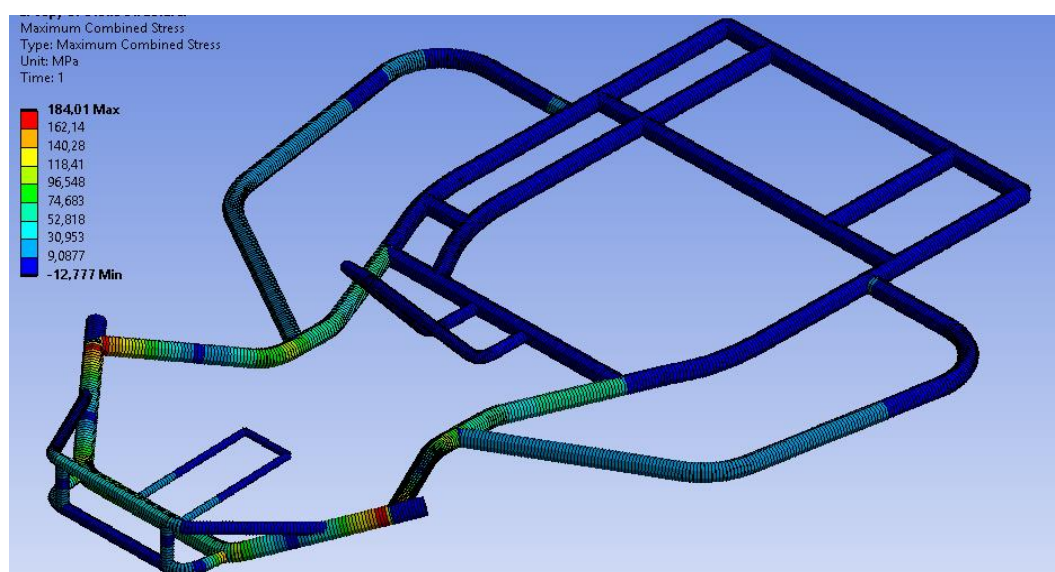


Рисунок 62 – Распределение напряжений оптимизированной конструкции рамы при нагружении передней балки по оси

Максимальные напряжения в 184 МПа также превышают значения базовой конструкции на 20 МПа.

Но так как предел текучести стали 30ХГСА составляет 490 МПа (рисунок 48) то запас прочности получается 2,6 единицы, что уже практически на 60 % выше, чем в базовом варианте.

Следующим шагом приложим нагрузку на переднюю балку, но уже под углом 30° к оси симметрии карта.

На рисунке 63 представлены точки фиксации рамы при расчетах и вектор приложения нагрузки.

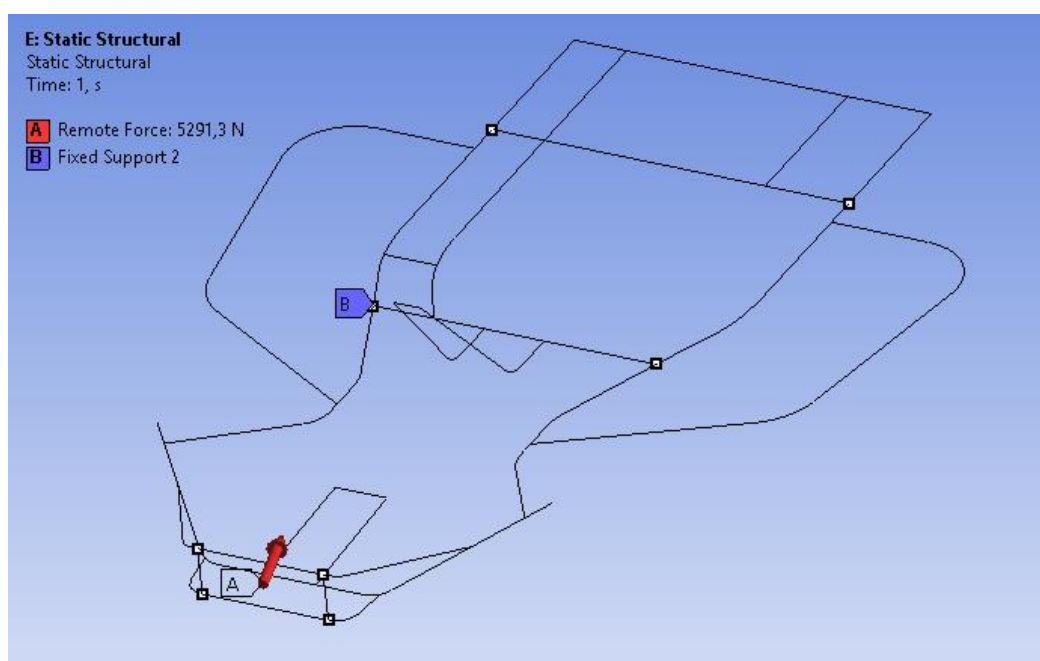


Рисунок 63 – Точки фиксации и направление вектора силы

Силу прикладывали через команду «Remote Force», что дало возможность равномерно распределить усилие на переднюю балку и учесть действительные деформации рамы.

Картина деформации рамы под влиянием приложенных нагрузок представлена на рисунке 64.

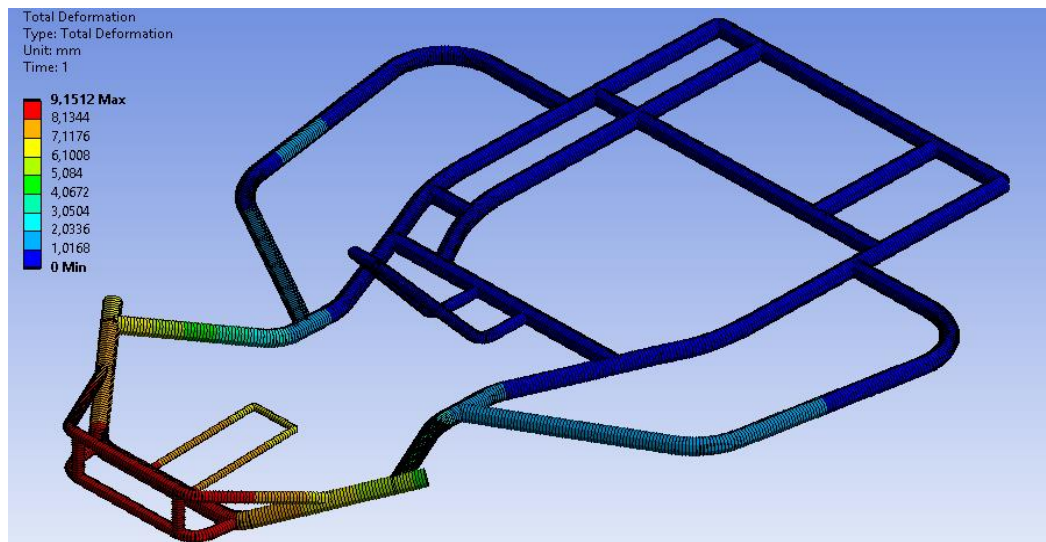


Рисунок 64 – Деформация оптимизированной конструкции рамы при нагружении передней балки вне оси

Здесь деформация рамы составляет 9,15 мм, что также на 2 мм выше чем было при анализе базовой конструкции, но по-прежнему в целом не критично.

Картина распределения напряжений под влиянием приложенных нагрузок представлена на рисунке 65.

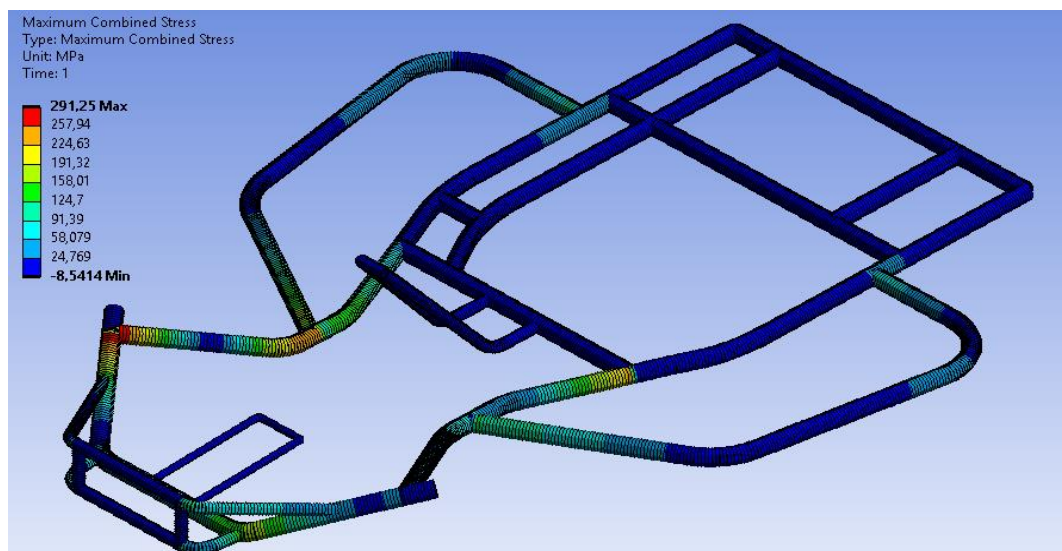


Рисунок 65 – Распределение напряжений оптимизированной конструкции рамы при нагружении передней балки по оси

Как видим, величина максимальных напряжений здесь также на 65 МПа превышает данные анализа базового варианта конструкции. Но здесь, величина максимальных деформаций мало того, что находится в упругой зоне, так и коэффициент запаса прочности составляет 1,68 единицы, что на 65 % выше, чем в базовом варианте конструкции, что уже является вполне достаточным результатом.

Следующим шагом проведем анализ конструкции от приложения усилий на боковую дугу рамы, имитируя боковые удары. Причем в этот раз проведем расширенный по сравнению с базовым вариантом анализ – рассмотрим удары с разных сторон.

Усилие оставим таким же – 2446 Н.

На рисунке 66 представлены точки фиксации рамы при расчетах и вектор приложения нагрузки при имитации удара передней частью боковой дуги.

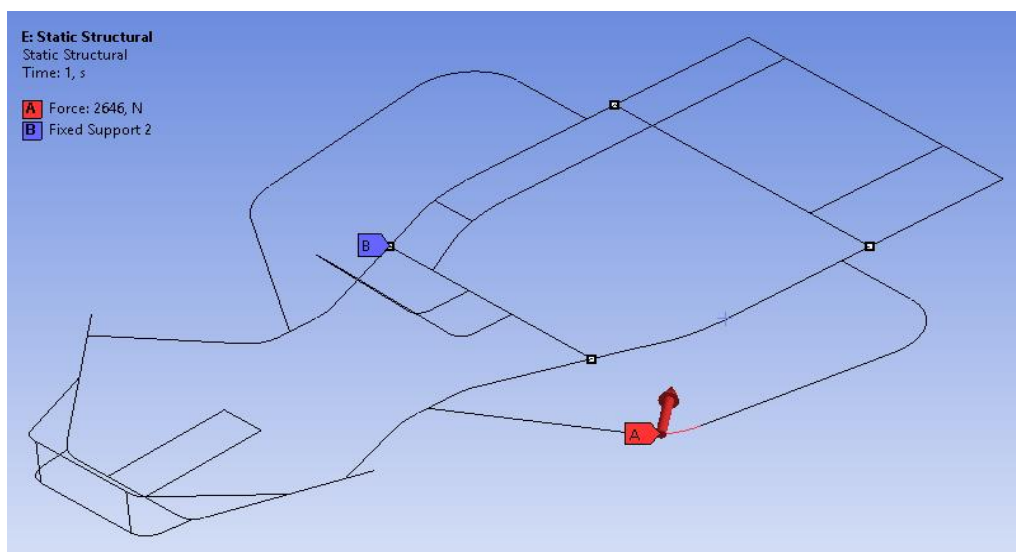


Рисунок 66 – Точки фиксации и прикладываемое усилие при имитации удара передней частью боковой дуги

Картина деформации модернизированной рамы под влиянием приложенных нагрузок при имитации удара передней частью боковой дуги представлена на рисунке 67.

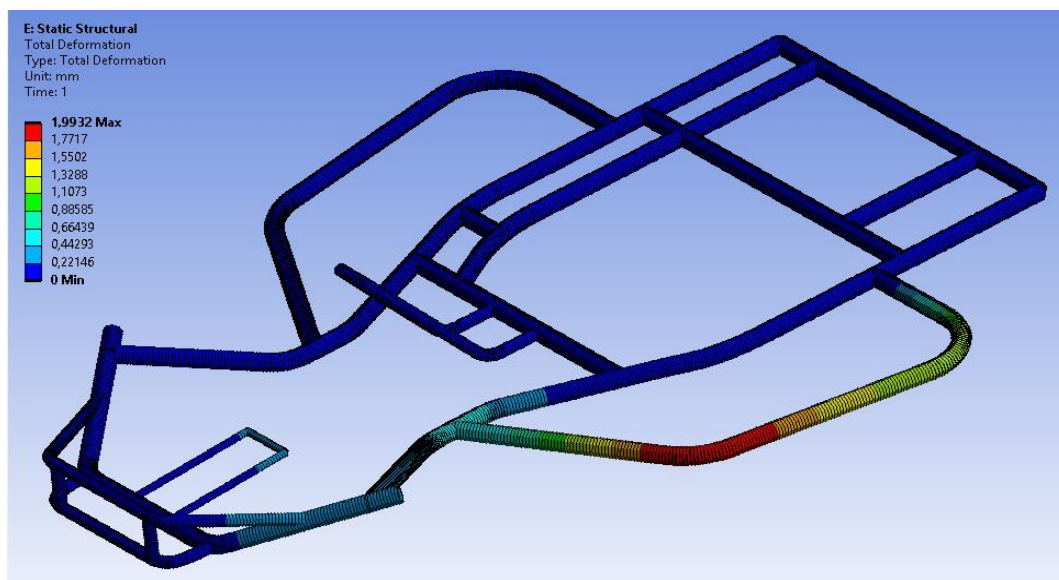


Рисунок 67 – Деформация оптимизированной конструкции рамы при имитации удара передней частью боковой дуги

Величина деформации модернизированной конструкции составила всего 2 мм, что ненамного, но меньше чем в базовом варианте.

Картина распределения напряжений под влиянием приложенной нагрузки представлена на рисунке 68.

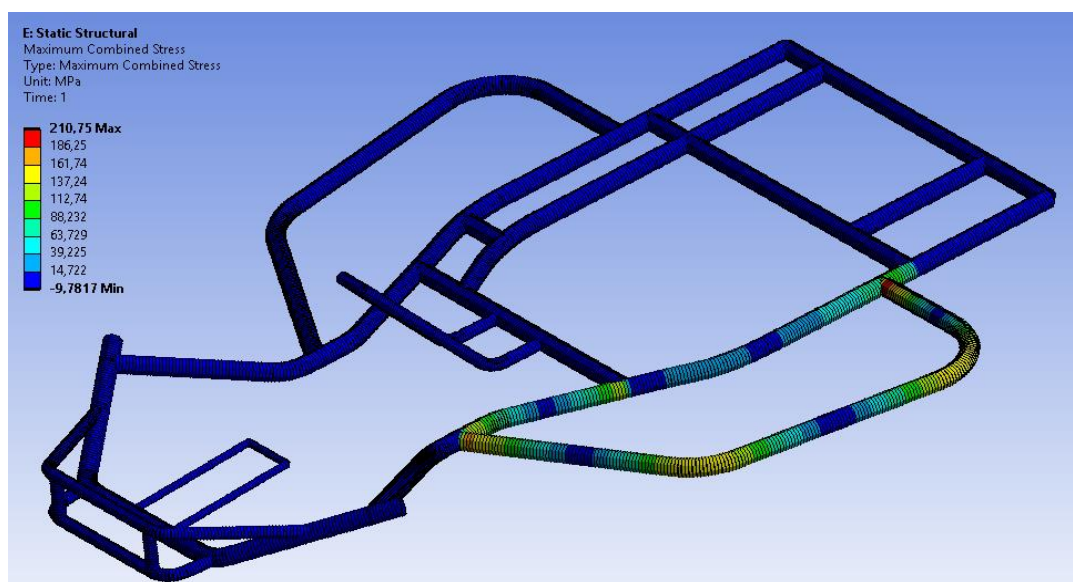


Рисунок 68 – Распределение напряжений оптимизированной конструкции рамы при имитации удара передней частью боковой дуги

Максимальные напряжения все также концентрируются в месте крепления дуги к основной раме, но их величина составляет 210,75 МПа, что более чем на 40 МПа ниже, чем в базовом варианте.

Коэффициент запаса прочности здесь составляет 2,3 единицы, а в базовом варианте он не рассчитывался, так как напряжения превысили предел текучести.

Проведем еще один анализ прочности конструкции рамы при ударе сбоку, но уже при имитации удара в заднюю часть боковой дуги.

Так на рисунке 69 представлены точки фиксации рамы и вектор приложения нагрузки.

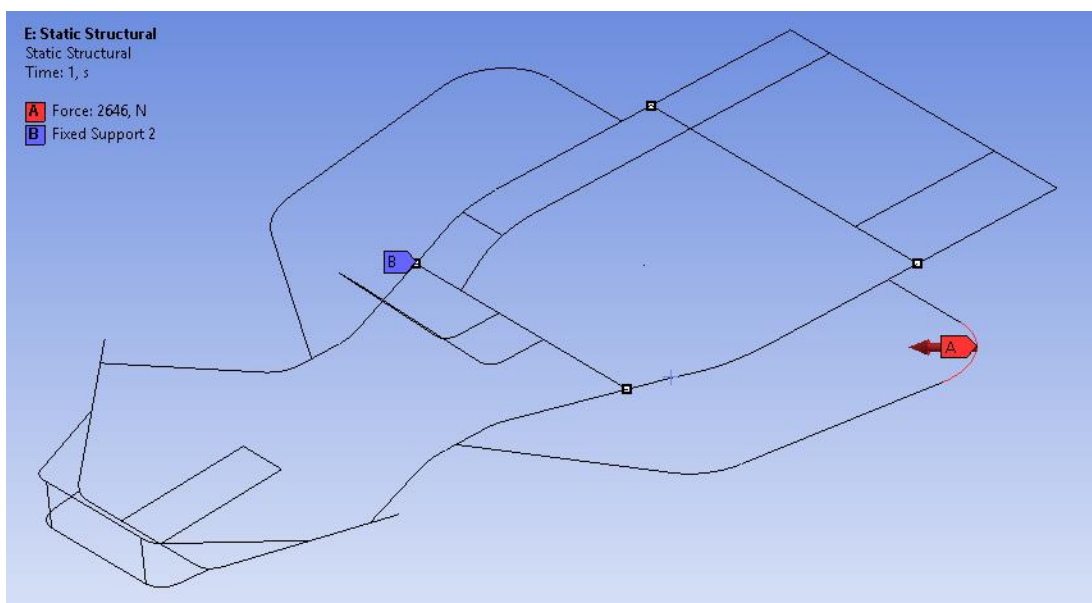


Рисунок 69 – Точки фиксации и вектор силы при имитации удара в заднюю часть боковой дуги

Картина деформации модернизированной рамы под влиянием приложенных нагрузок при имитации удара в заднюю часть боковой дуги представлена на рисунке 70.



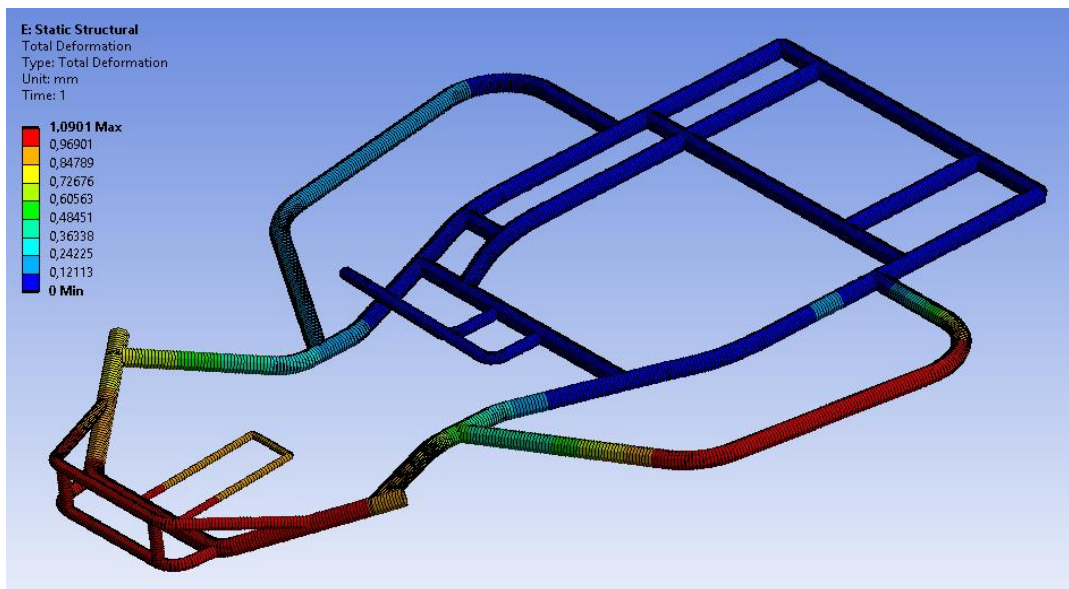


Рисунок 70 – Деформация оптимизированной конструкции рамы при имитации удара в заднюю часть боковой дуги

Величина деформации модернизированной конструкции составила всего 1 мм, но при этом деформация распространилась и на основную раму.

Картина распределения напряжений под влиянием приложенной нагрузки представлена на рисунке 71.

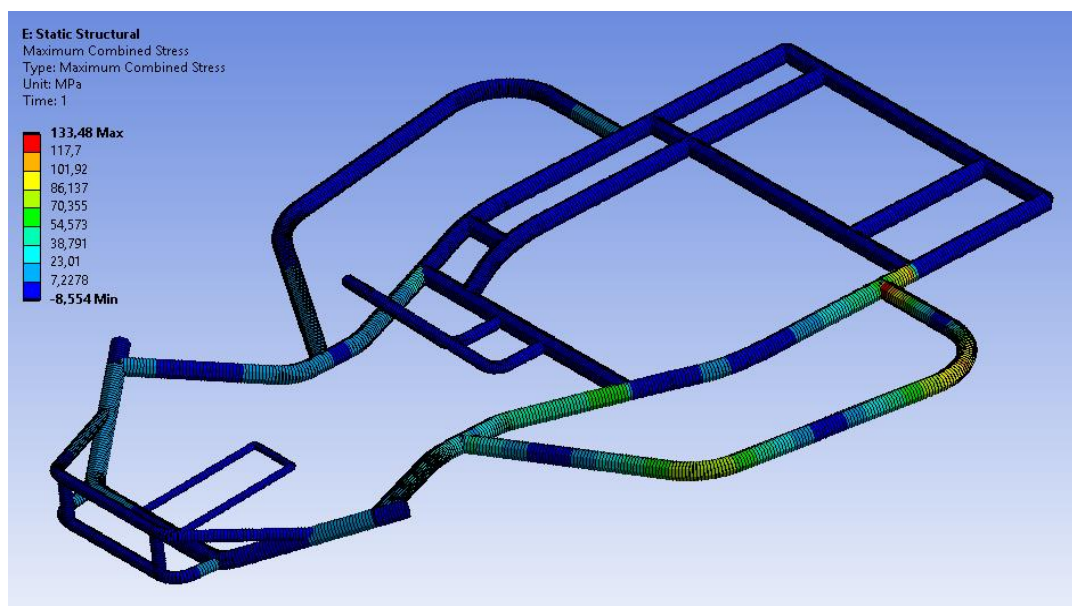


Рисунок 71 – Распределение напряжений оптимизированной конструкции рамы при имитации удара в заднюю часть боковой дуги

Максимальные напряжения составили 133,48 МПа, а коэффициент запаса прочности – 3,67 единицы

Следующим шагом проведем анализ деформации конструкции от удара сзади, но в отличие от моделирования базового варианта усложним условия и приложим не только усилие в 5292 Н вдоль продольной оси автомобиля напротив места крепления двигателя, а также и такое усилие с противоположной стороны задней части карта.

На рисунке 72 представлены точки фиксации рамы при расчетах и вектора приложения нагрузок.

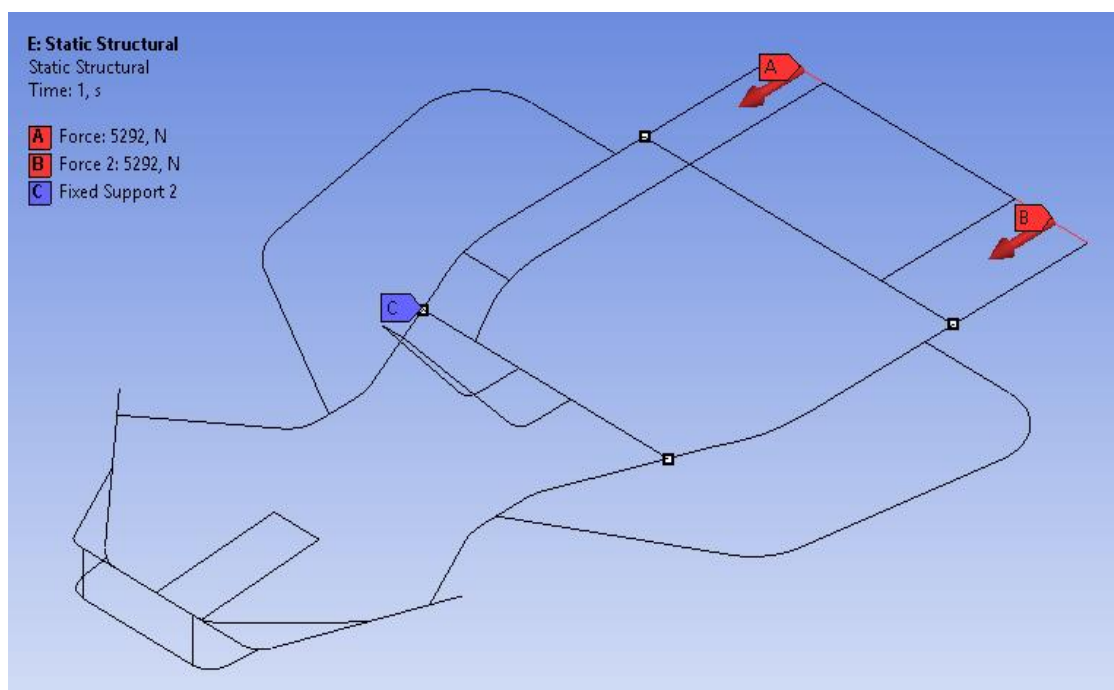


Рисунок 72 – Точки фиксации и вектора сил при ударе сзади

Картина деформации рамы под влиянием приложенных нагрузок при ударе сзади представлена на рисунке 73.

Как видно, деформация составляет всего 0,23 мм, и сосредоточена в левой части рамы. В той же части, где крепится двигатель, деформации все также составляют сотые доли миллиметра.

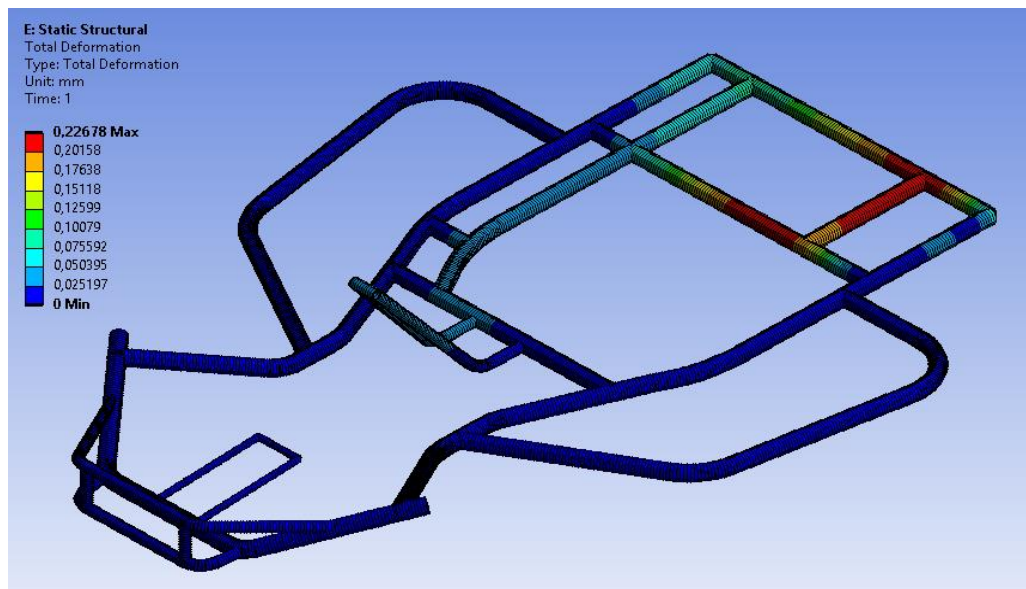


Рисунок 73 – Деформация оптимизированной конструкции рамы при имитации удара сзади

Картина распределения напряжений под влиянием приложенных нагрузок представлена на рисунке 74.

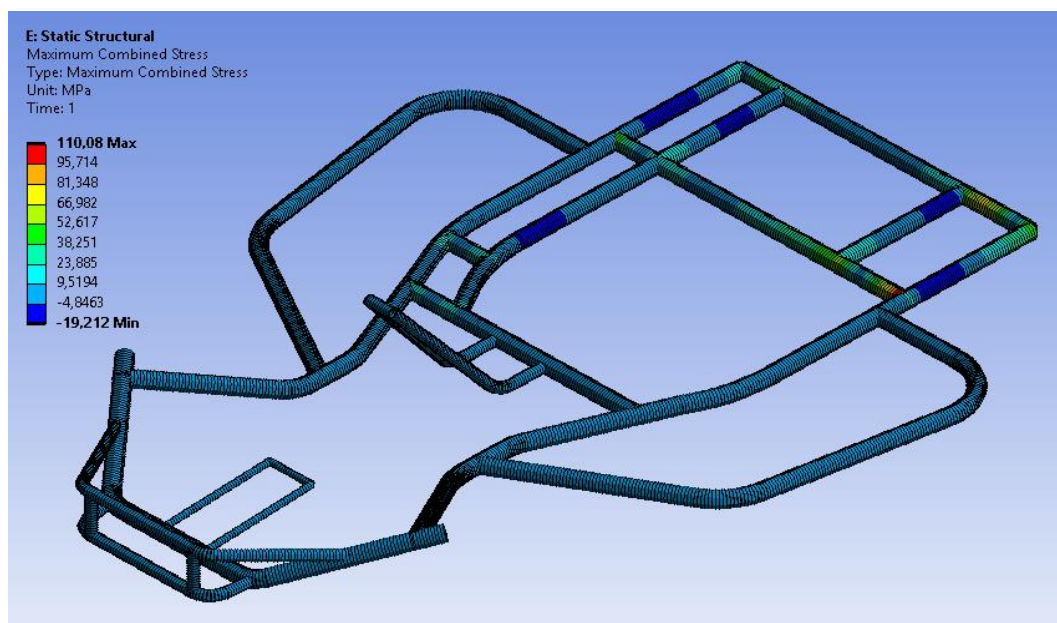


Рисунок 74 – Распределение напряжений оптимизированной конструкции рамы при имитации удара сзади

Наибольшая концентрация напряжений формируется в местах

крепления труб между собой, и ее величина составляет 110 МПа, что дает запас прочности в 4,45 единицы.

То есть, выявленная с точки зрения жесткости оптимальная компоновка рамы, обладает необходимыми прочностными характеристиками.

Выводы по главе: проведена оптимизация компоновки рамы малолитражного гоночного автомобиля. Проведен анализ жесткости компоновки трех модификаций рамы, отличающихся расстоянием между трубами в средней части рамы.

Выявлено, что наиболее перспективной конструкцией является рама с более широким расположением труб в средней части – 325 мм. Эта конструкция обладает наименьшей массой и при этом имеет самую высокую жесткость – 189,7 Н·м/град.

Проведен анализ конструкционной прочности лучшей модификации рамы, причем, несмотря на то, что масса снаряженного карта уменьшилась, по крайней мере, на 5 кг, оставили для сравнения предыдущий порядок сил. То есть основывались на весе карта в 135 кг и величину перегрузки варьировали в пределах от 2g до 4g.

Запас прочности при анализе конструкции нагружением передней балки по оси составил 2,6 единицы, а при нагружении вне оси – 1,7 единицы, что более чем на 60 % выше, чем в базовом варианте конструкции.

Запас прочности при имитации бокового удара составил от 2,3 до 3,7 единиц в зависимости от места приложения усилия.

При имитации удара сзади запас прочности составил 4,45 единицы.

Таким образом, проведенный прочностной анализ подтвердил правильность принятых решений при модернизации рамы малолитражного гоночного автомобиля класса «карт».

## Заключение

В работе проведен анализ конструктивных особенностей малолитражных гоночных автомобилей открытого типа класса «карт».

Проведен обзор технических решений, применяемых при конструировании рамы карта. Рассмотрены как вопросы наилучшего расположения труб несущей конструкции, то есть непосредственно самой конфигурации рамы, так и материалов рамы, толщины поперечного сечения элементов рамной конструкции и способов крепления основных узлов карта.

Представлена 3D-модель стандартной компоновки автомобиля класса «карт», а также стержневая модель рамы карта с заданными сечениями трубной конструкции и ее конечно-элементная модель.

Проведенный численный анализ позволил выявить недостатки базовой конструкции. Проведена оптимизация компоновки рамы малолитражного гоночного автомобиля, а также анализ жесткости компоновки трех модификаций рамы.

Выявлено, что наиболее перспективной конструкцией является рама с более широким расположением труб в средней части – 325 мм. Эта конструкция обладает наименьшей массой и при этом имеет самую высокую жесткость – 189,7 Н·м/град.

Проведен анализ конструкционной прочности лучшей модификации рамы. Запас прочности при анализе конструкции нагружением передней балки по оси составил 2,6 единицы, а при нагружении вне оси – 1,7 единицы, что более чем на 60 % выше, чем в базовом варианте конструкции. Запас прочности при имитации бокового удара составил от 2,3 до 3,7 единиц в зависимости от места приложения усилия. При имитации удара сзади запас прочности составил 4,45 единицы.

Доказана эффективность предложенной компоновки рамы с точки зрения оптимальной жесткости и необходимых прочностных характеристик.

## Список используемой литературы

1. Ansys [Электронный ресурс] // URL: <https://www.ansys.com/> (дата обращения: 14.05.2021).
2. Ansys Mechanical [Электронный ресурс] // URL: <https://www.cadfecis.ru/products/ansys/structures/mechanical> (дата обращения: 14.05.2021).
3. Baudille R., Biancolini M.E., Brutti C., Reccia L., Analisi integrata multy-body FEM del comportamento dinamico di un kart / XXX Convegno Nazionale AIAS. Alghero, 2001. PP 1795-1803.
4. Bryan J. Mac Donald. Practical Stress Analysis with Finite Elements (3rd Edition). Machdohnil Limited, 2020. 454 p.
5. Chauhan A., Naagar L., Chawla S. Design and Analysis of a Go-Kart // International Journal of Aerospace and Mechanical Engineering. 2016. № 5. PP 29-37.
6. Go Kart Plans [Электронный ресурс] // URL: <https://kartfab.com/go-kart-plans> (дата обращения: 01.05.2021).
7. Hemank D. Design and Fabrication of Superkart HD-250 // International Journal of Recent Trends in Engineering. 2009. № 5. PP 125-128.
8. Il laboratorio prove [Электронный ресурс] // URL: <http://www.torvergata-karting.it/article/articleview/4/1/6> (дата обращения: 01.05.2021).
9. Johnson J., Kumar K. D., Praneeth S., Yathiraj, Shankar R. Design, Modeling and Development of a Go-Kart Vehicle // International Journal of Engineering Development and Research. 2017. № 7. PP 104-109.
10. Muzzupappa M.; Matrangolo G.; Vena G. Structural Numerical Analysis of Go-Kart Frames: Comparison Between H and P Formulation and Between Stand Alone and Cad-Embedded FEM Systems / AIAS. Calabria, 2006. PP 1-15.
11. Ramini S., Rentala M., Tech M., Gulab Mane S. Design and Structural Analysis of a Go-Kart Vehicle Chassis // International journal & magazine of engineering technology management and research. 2015. № 10. PP 1373-1378.

12. Sannake A. S., Shaikh S. R., Khandare S. A., Nehatrao S. A. Design and Analysis of Go-kart Chassis // International Journal of Advance Research and Innovative Ideas in Education. 2017. № 2. PP 2763-2769.

13. Singh A., Deol A., Singh G., Grewal A., Singh Sembhi A. Design and Simulation of Go Kart Chassis // International Journal for Innovative Research in Science & Technology. 2017. № 10. PP 74-78.

14. Solazzi L., Matteazzi S. Analisi e Sviluppi Strutturali di un Telaio per Kart da Competizione // Associazione Italiana per l'Analisi delle Sollecitazioni XXXI Convegno Nazionale. 2002. PP 1-10.

15. Ujjal Kalita, Yenduru Surya Teja, Darisi Sri Veera Venkata Manikanta Design and Analysis of Go-kart Chassis // International Journal of Engineering Development and Research. 2018. № 2. PP 290-295.

16. Virendra Mr., Pattanshetti S. Design and Analysis of Go-Kart Chassis // International Journal of Mechanical and Industrial Technology. 2016. № 1. PP 150-164.

17. Vitale E., Frenzo F., Ghelardi E., Leoncini A. A lumped parameters model for the analysis of kart dynamics / 7th International Conference of the ATA. Florence, 2001.

18. Аналоги российских и зарубежных сталей [Электронный ресурс] // URL: <https://metalltehservis.ru/spravochniki/analogi-rossiiskih-i-zarubezhnih-stalei/> (дата обращения: 01.05.2021).

19. Волков О. А., Дуганова Е. В., Пушкарева А. Г. Анализ существующих конструкций болидов для картинга // Материалы XII Международной студенческой научной конференции «Студенческий научный форум», 2020. URL: <https://files.scienceforum.ru/pdf/2020/5dfc9e057ce22.pdf> (дата обращения: 30.04.2021).

20. Как сделать картинг своими руками [Электронный ресурс] // URL: <http://kartingacademy.ru/kak-sdelat-karting-svoimi-rukami.html> (дата обращения: 01.05.2021).

21. Как устроен карт? [Электронный ресурс] // URL: <https://primokarting.ru/articles/kak-ustroen-kart/> (дата обращения: 01.05.2021).
22. Картинг красная ракета ver. Cagiva 350 [Электронный ресурс] // URL: <https://www.drive2.ru/l/6849803/> (дата обращения: 01.05.2021).
23. Конструкция карта [Электронный ресурс] // URL: <http://www.cttmotor.edusite.ru/p31aa1.html> (дата обращения: 01.05.2021).
24. Марка стали 20 [Электронный ресурс] // URL: [https://metallischekiy-portal.ru/marki\\_metallov/search/?](https://metallischekiy-portal.ru/marki_metallov/search/?) (дата обращения: 01.05.2021).
25. Развесовка карта [Электронный ресурс] // URL: <http://kartingzone.com/articles/kartweight> (дата обращения: 30.04.2021).
26. Самодельный картинг Юниор [Электронный ресурс] // URL: <http://kart.masteraero.ru/kart-3.php> (дата обращения: 01.05.2021).
27. Сталь марки 30ХГСА [Электронный ресурс] // URL: [https://metallischekiy-portal.ru/marki\\_metallov/stk/30XGSA](https://metallischekiy-portal.ru/marki_metallov/stk/30XGSA) (дата обращения: 01.05.2021).
28. Турбин И. В., Угарова Л. А. Технический проект «Картинг» в студенческой деятельности / Перспективное направление развития автотранспортного комплекса: сборник научных трудов. Старый Оскол : ТНТ, 2018. С. 52-58.
29. Установка сиденья [Электронный ресурс] // URL: [https://openkart.ru/seat\\_accessories](https://openkart.ru/seat_accessories) (дата обращения: 30.04.2021).
30. Устройство гоночного автомобиля карт [Электронный ресурс] // URL: <https://kartodrom.com.ua/news/articles/ustroistvo-gonochnogo-avtomobilya-kart> (дата обращения: 01.05.2021).