

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)

23.03.03 Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов

(код и наименование направления подготовки, специальности)

Автомобили и автомобильный сервис

(направленность (профиль)/специализация)

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)**

на тему Разработка конструкции универсального сборно-разборного стапеля
для сварки рам малолитражных гоночных автомобилей класса «карт»

Обучающийся

В.Д. Панасюк

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

В.Е. Епишкин

(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Тольятти 2022

Аннотация

В бакалаврской работе спроектирована конструкция универсального сборно-разборного стапеля для сварки рам малолитражных гоночных автомобилей класса «карт». Проанализирована конструкция гоночного болида и универсального сборно-разборного стапеля.

Проведен обзор работ по разработке конструкции универсального сборно-разборного стапеля и выбрана наиболее подходящая. Проведена работа по разработке расчетной модели рамы

Проанализирована крепость и жесткость конструкции разработанного сборно-разборного стапеля.

Выделены основные параметры универсального сборно-разборного стапеля и геометрического моделирования гоночного карта.

Также представлены предложения по разработке технологической оснастки.

Содержание

Введение	4
1 Построение модели гоночного автомобиля «карт»	5
1.1 Построение объемной модели гоночного автомобиля «карт»	5
1.2 Построение расчетной модели конструкции рамы гоночного автомобиля класса «карта»	8
2 Конструкционная прочность рамы карта любительской серии	16
2.1 Анализ прочности рамы карта любительской серии.....	16
2.2 Анализ крепости каркаса рамы карта на кручение	20
3 Разработка технологической оснастки.....	25
3.1 Разработка стапеля для изготовления гоночного карта	25
3.2 Конструкция стапеля.....	26
3.3 Моделирование конструкционной прочности стапеля	29
Заключение	48
Список используемой литературы и используемых источников	49

Введение

Гоночные болиды спроектированы для участия в кольцевых гонках. Гонки по кольцевой трассе – один из самых зрелищных видов гонок. Не редко в соревнованиях участвуют студенты ВУЗов и колледжей.

Formula Student – это проект гоночного болида студентов ТГУ. Впервые проект начал реализовываться в 2007 году. За все этапы своего существования автомобиль перетерпел множество изменений.

Гоночный автомобиль помимо своих скоростных характеристик должен отвечать требованиям безопасности. Кольцевые гонки очень динамичные и высокоскоростные, поэтому безопасность пилота – это основной критерий которым должен обладать спортивный болид. Во время гонок автомобили часто сталкиваются с препятствиями или друг с другом. В связи с этим необходимо снабдить болид защищающими от столкновения элементами. Ими могут служить энергопоглощающие элементы, установленные на бампера автомобиля. Они способны забрать на себя основную силу удара и защитить пилота от травм.

Основной целью работы является: разработка конструкции универсального сборно-разборного стапеля для сварки рам малолитражных гоночных автомобилей класса «карт».

Задачами работы являются:

- рассмотреть теоретический аспект, основные понятия,
- разработать конечно-элементную модель для геометрического моделирования гоночного карта,
- рассмотреть разные виды универсального сборно-разборного стапеля и выбрать наиболее подходящий,
- провести анализ спроектированного универсального сборно-разборного стапеля.

Объектом исследования является малолитражные гоночные автомобили класса «карт».

1 Построение модели гоночного автомобиля «карт»

1.1 Построение объемной модели гоночного автомобиля «карт»

Проектирование автомобиля начинается с выбора компоновки узлов и агрегатов трансмиссии. От их расположения зависит центр тяжести и развесовка массы по осям. Необходимо учитывать и предусматривать перекомпоновку автомобиля при построении несущей конструкции. «Так на рисунках 1-4 представлена 3D-модель стандартной компоновки автомобиля класса «карт», разработанная при помощи пакета моделирования Компас 3D.» [12]

«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.» [9]

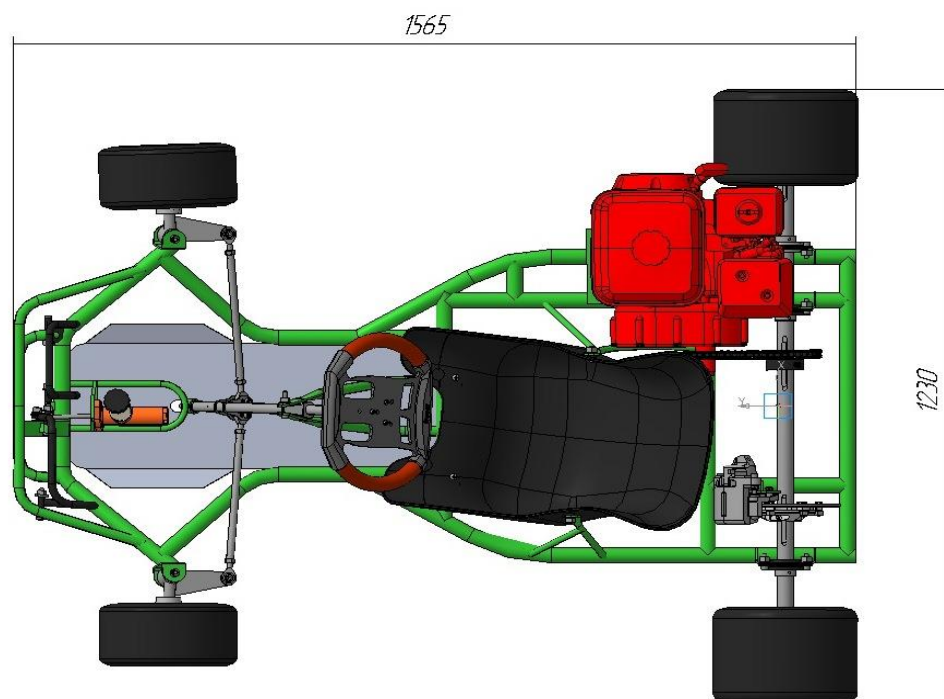


Рисунок 1 – Гоночный болид – вид сверху



Рисунок 2 – Гоночный болид – вид сбоку

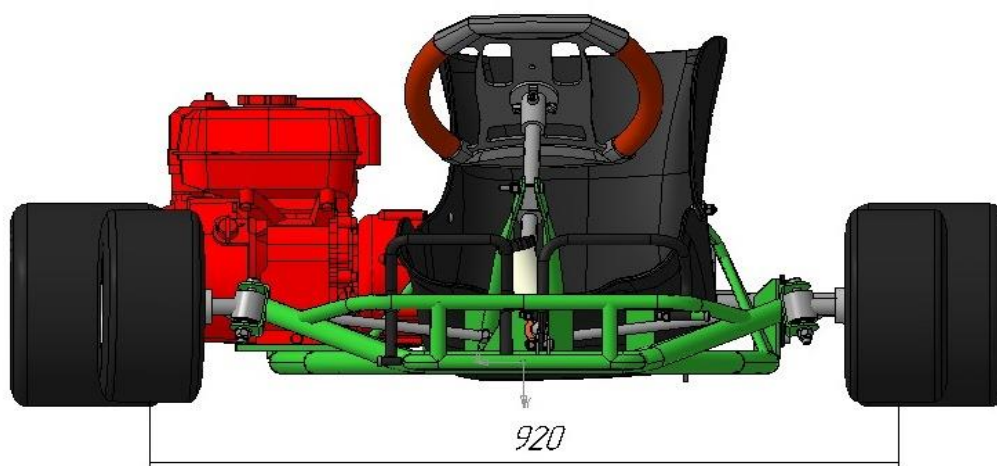


Рисунок 3 – Гоночный болид – вид спереди

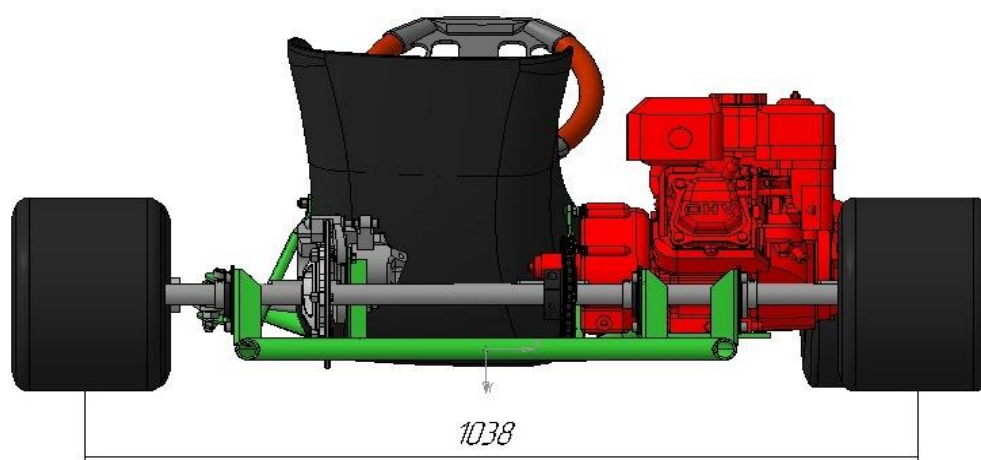


Рисунок 4 – Гоночный болид – сзади

Характеристики болида «карт» зависят от рамы, ее конструкции и расположения узлов и агрегатов. Конструкция рамы карты влияет на управляемость и поведение автомобиля на трассе. Стандартно рамы картов изготавливают из стальных труб различного прямоугольного и круглого сечения. Для навешивания узлов и агрегатов применяют сварные кронштейны. «На рисунке 5 представлена компоновка рамы автомобиля класса «карт». Данная рама спроектирована с учетом всех стандартных требований, предъявляемых к классу «карт» для использования в прокатных пунктах.» [8]

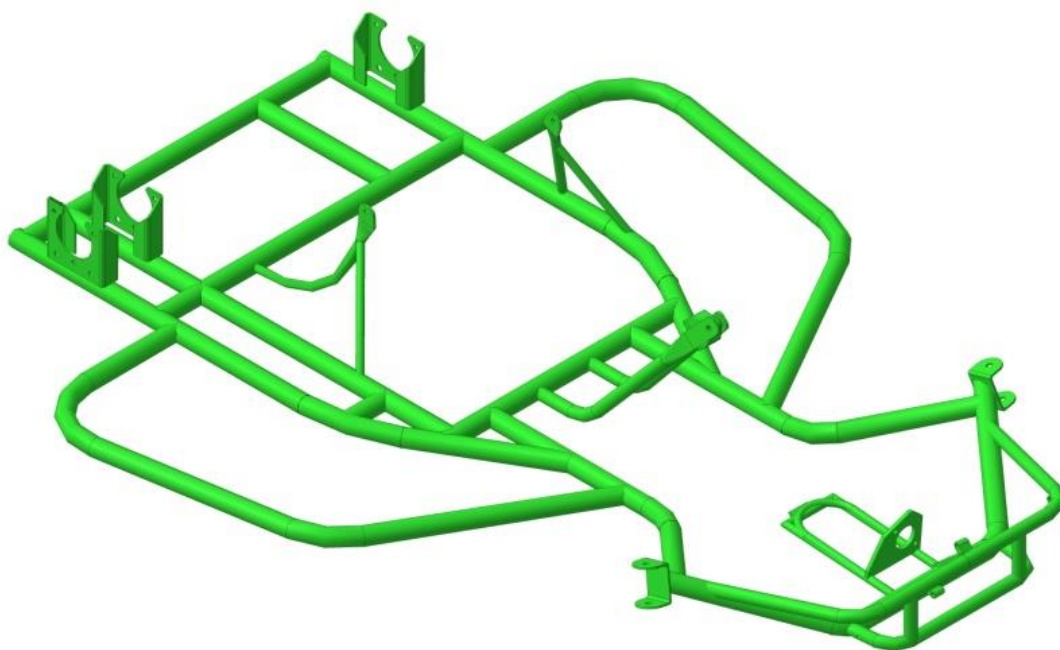


Рисунок 5 – 3D-модель каркаса рамы

Выбор конструкционного материала имеет важное значение, так как обеспечение безопасности и надежности является приоритетным при построении рамы карта. Для прототипа используется трубный прокат из стали 20. Выбор обусловлен тем, что данный сортament стали является прототипом стали AISI 1020, что соответствует требованиям регламента.

«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).» [12]

1.2 Построение расчетной модели конструкции рамы гоночного автомобиля класса «карта»

«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. Расчетная платформа Ansys Workbench позволяет в едином информационном пространстве интегрировать различные модули программного комплекса для проведения связанного междисциплинарного анализа.» [1]

«Расчет будем проводить в модуле Static Structural (рисунок 6), предназначенного для решения задач механики деформируемого твердого тела в статической постановке.» [12]

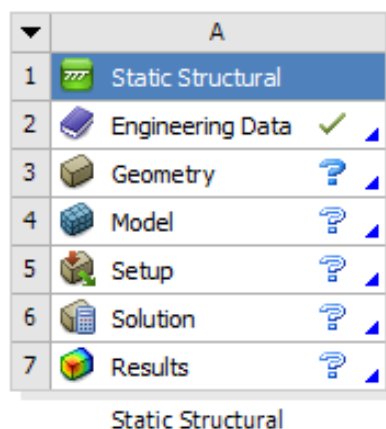


Рисунок 6 – Модуль «Static Structural»

«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 7.» [16]

Outline of Schematic A2: Engineering Data				
	A	B	C	D
1	Contents of Engineering Data			Source
2	Material			Description
3	Structural Steel			General_Materials.xml
*	Click here to add a new material			Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1

Properties of Outline Row 3: Structural Steel				
	A	B	C	D
1	Property	Value	Unit	
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	7850	kg m ⁻³	
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 7 – Редактирование свойств материала в редакторе «Engineering Data»

«Следующим этапом необходимо создать геометрическую модель либо встроенными средствами моделирования, либо импортировать уже готовую геометрическую модель, созданную в сторонней CAD-системе, как в нашем случае. Импортированную модель можно доработать под дальнейшие действия, либо оставить неизменной. При импорте модели важно учитывать свойства структурного элемента «Geometry». Окно данных свойств появляется на месте панели «Properties of Schematic» (рисунок 8).» [2]

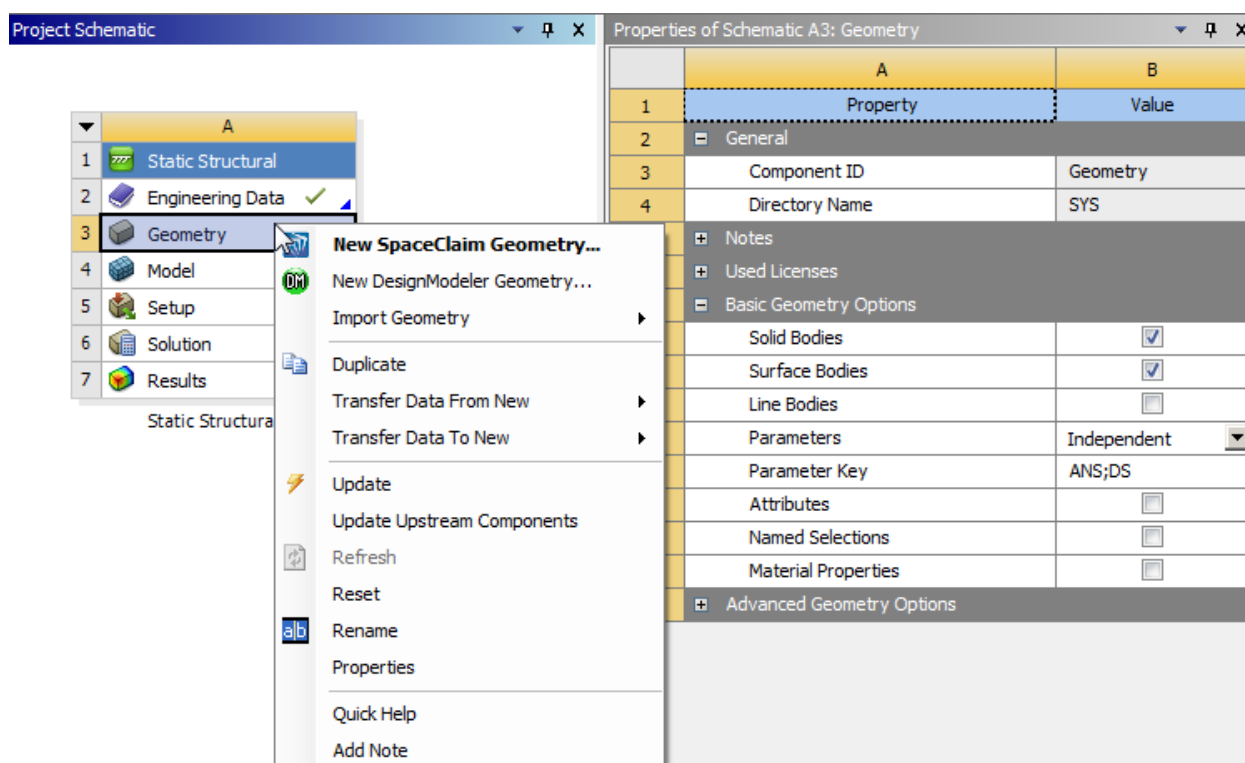


Рисунок 8 – Импорт геометрической модели с помощью «Properties of Schematic»

«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 CAD-моделей. Так как у нас одномерная модель необходимо активировать опцию «Line Bodies», отключенную по умолчанию.

На рисунке 9 представлена импортированная в модуль Design Modeler 1D-модель рамы карта.» [11]

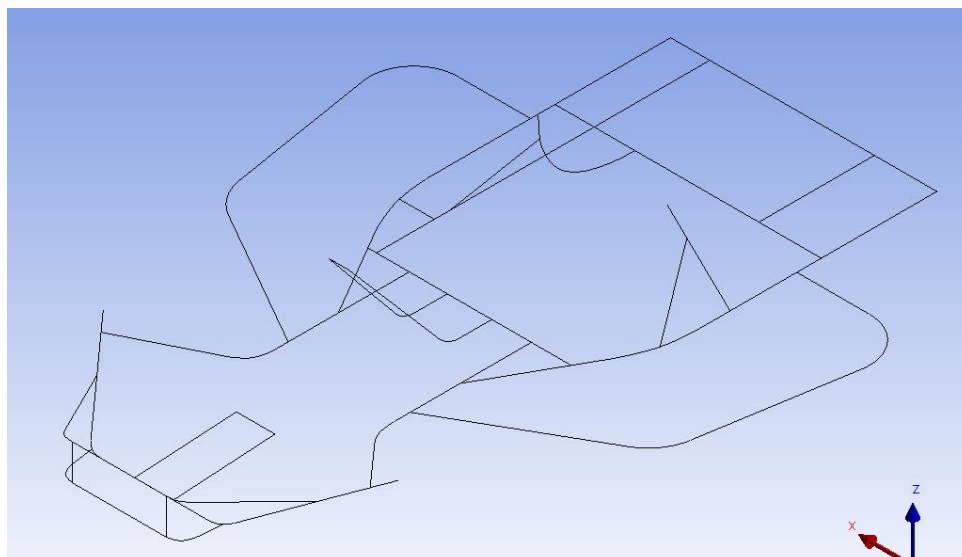


Рисунок 9 – Графическая схема гоночного автомобиля класса «карт»

«Следующим шагом необходимо сгруппировать разрозненные линейные тела путем их объединения посредством булевой операции. Объединять тела нужно по сечениям реальной твердотельной модели. Так на рисунке 10 желтым цветом подсвечено объединенное трубчатое тело, диаметром 30 мм, толщина стенок которого составляет 3 мм.» [3]

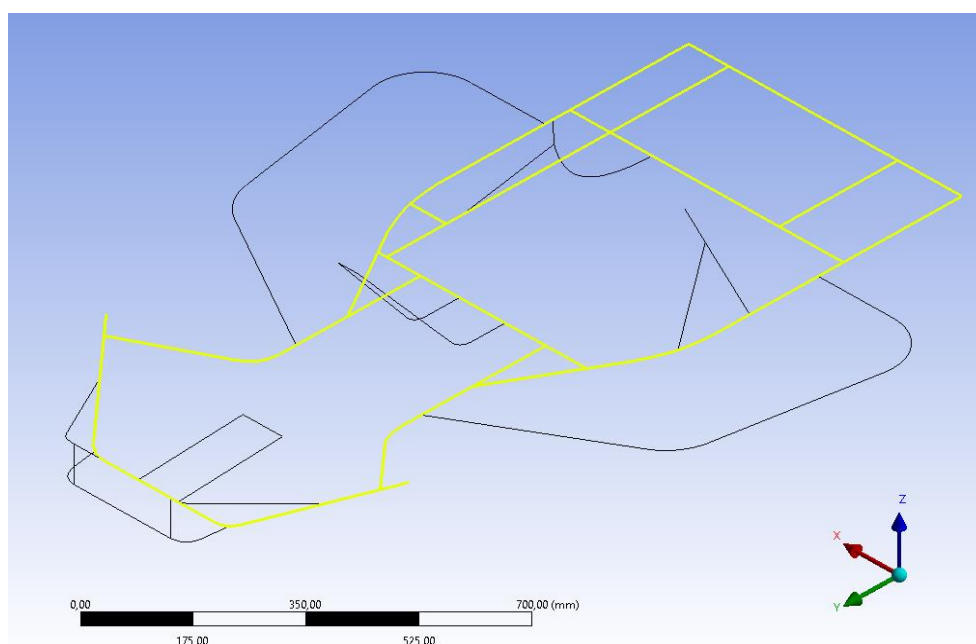


Рисунок 10 – группировка разрозненных линейных тел

«После того, как все тела будут сгруппированы необходимо задать сечения для направляющих, которыми собственно и являются созданные тела. Делаем это посредством команды «Cross Section», где выбираем трубное сечение и задаем соответствующие радиусы. Так на рисунке 11 представлен пример создания сечения диаметром 30 мм с толщиной стенки 3 мм.» [4]

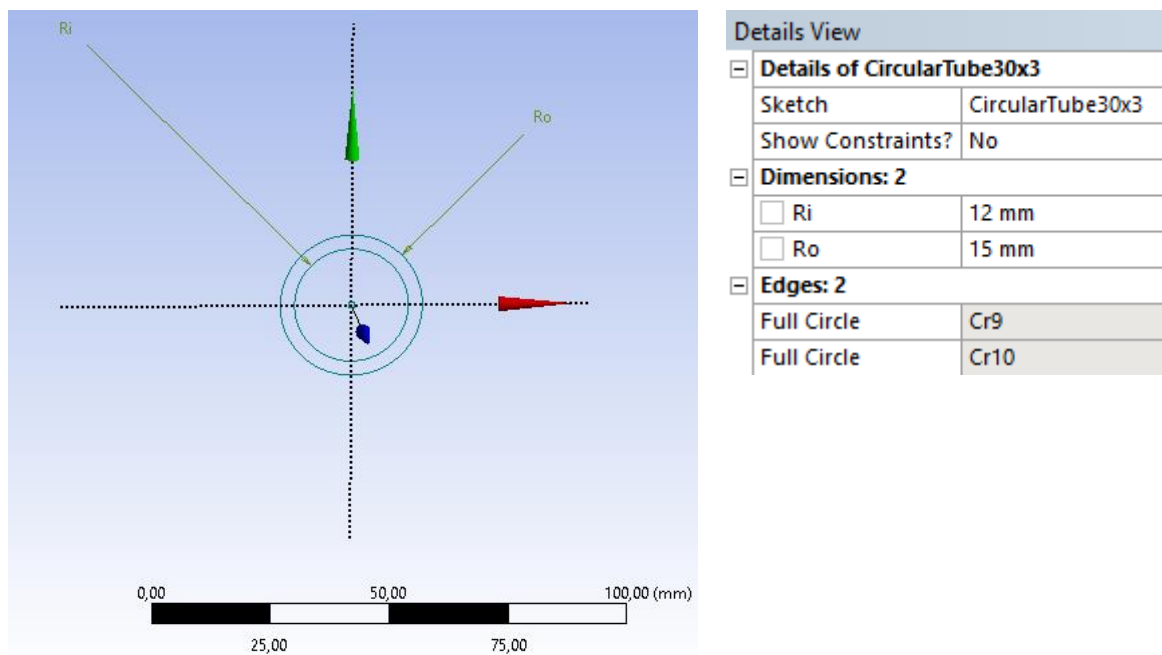


Рисунок 11 – Параметры сечения

«Затем присваиваем сечения созданным нами линейным телам в соответствии с изначальной CAD-моделью.

На рисунке 12 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 завершенным.» [10]

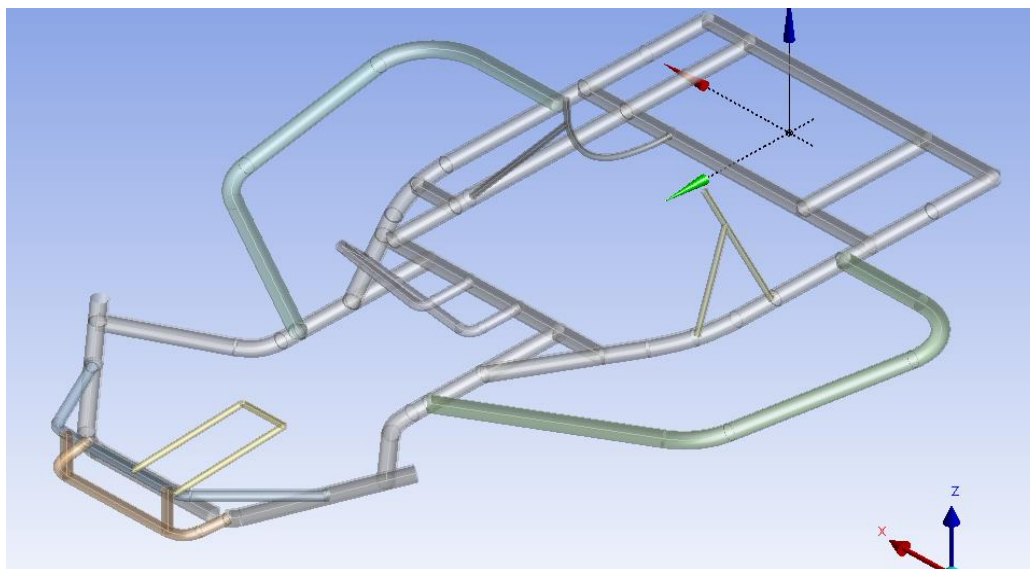


Рисунок 12 – Стержневая модель карта с присвоенными сечениями

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

На рисунке 13 представлено дерево проекта, где наглядно видно какие шаги необходимо проделать до завершения моделирования.» [5]

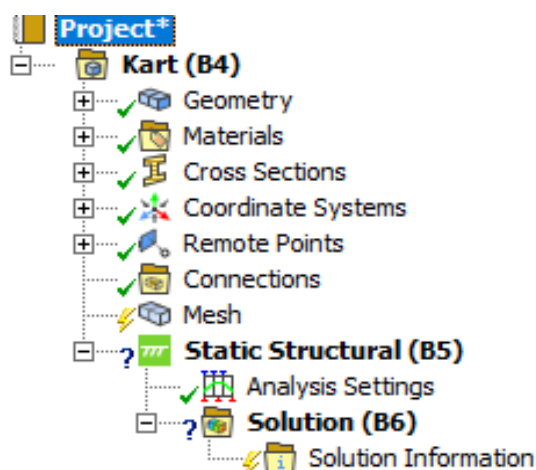


Рисунок 13 – Структура проекта

«Масса нашей конструкции согласно вкладке «Properties» составила 17,8 кг.

Как видно по рисунку 13 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 14.»

[18]

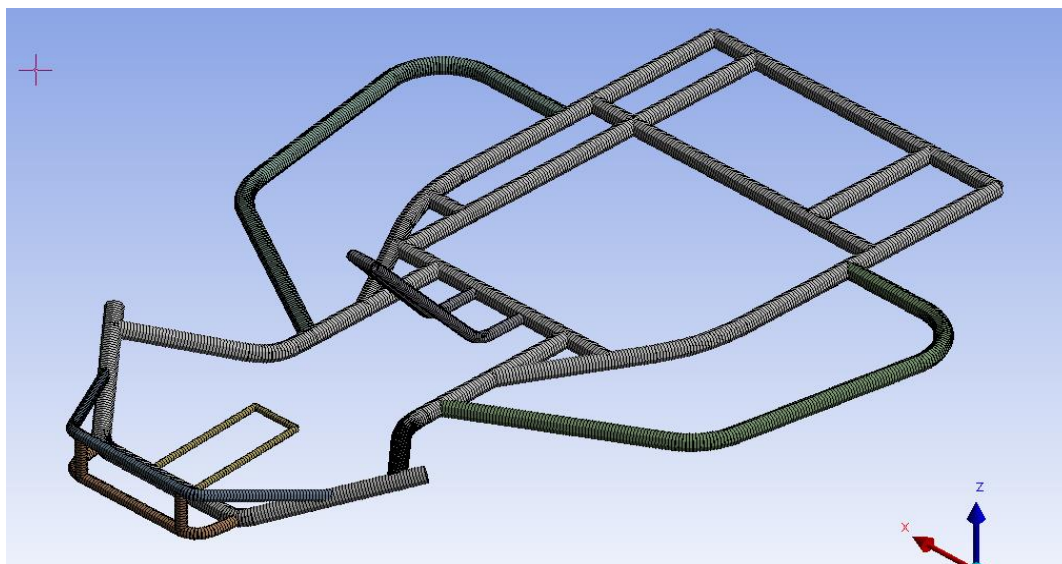


Рисунок 14 – Генерация конечно-элементной модели

На этом создание конечно-элементной модели можно считать выполненным.

Выводы: разработана 3D модель гоночного автомобиля «карт» с рамой из стали 2,0. Далее была спроектирована конструкция рамы «карта» с сечениями трубы и сгенерирована конечно-элементная модель.

2 Конструкционная прочность рамы карта любительской серии

2.1 Анализ прочности рамы карта любительской серии

«Анализ конструкционной прочности начинается с установки граничных условий. Для этого нужно активировать структурный элемент блока «Static Structural» – «Setup».

Направления приложения нагрузок, прикладываемых к элементам рамы при анализе конструкционной прочности, были выбраны, исходя из существующих конструктивных решений.

Величина усилий определялась из расчета предельных перегрузок при столкновении. Точного значения, какие перегрузки должен выдерживать пилот карта не определены – в различных источниках [4-7] они варьируются от 1,5g до 3g для любительской серии картов.» [5]

«Масса снаряженного карта, в нашем случае, составляет 135 кг. Величину перегрузки будем варьировать в пределах от 1,5g до 3g при различных условиях моделирования.

На рисунке 15 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 3g, вышла около 4000 Н.» [6]

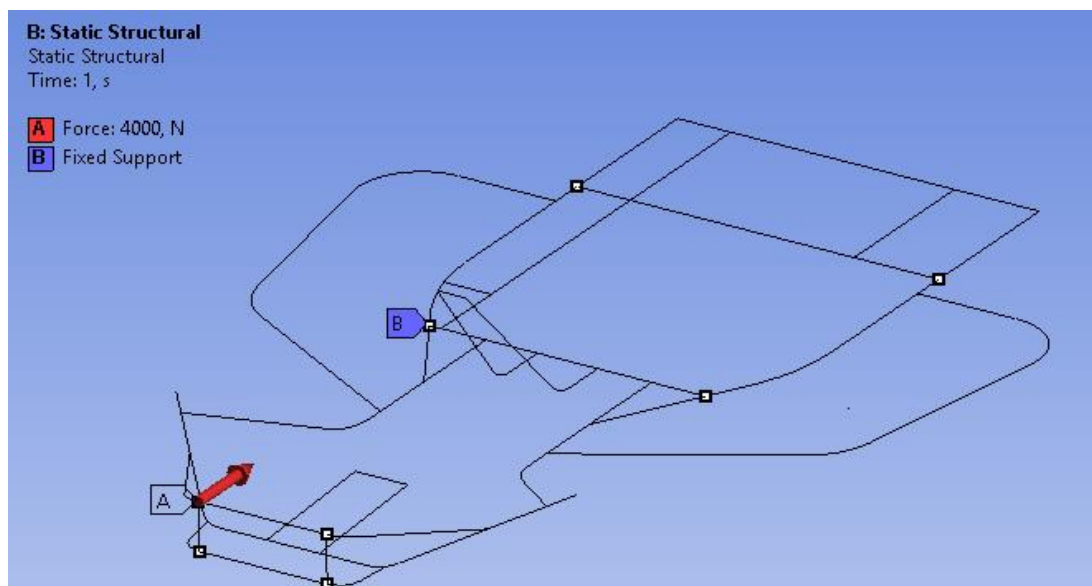


Рисунок 15 – Точки фиксации рамы и вектора приложения нагрузки

Проведем анализ прочности рамы по напряжениям в оси и изгибе и по общим деформациям рамы.

На рисунке 16 изображены повреждения рамы при приложенных нагрузках.

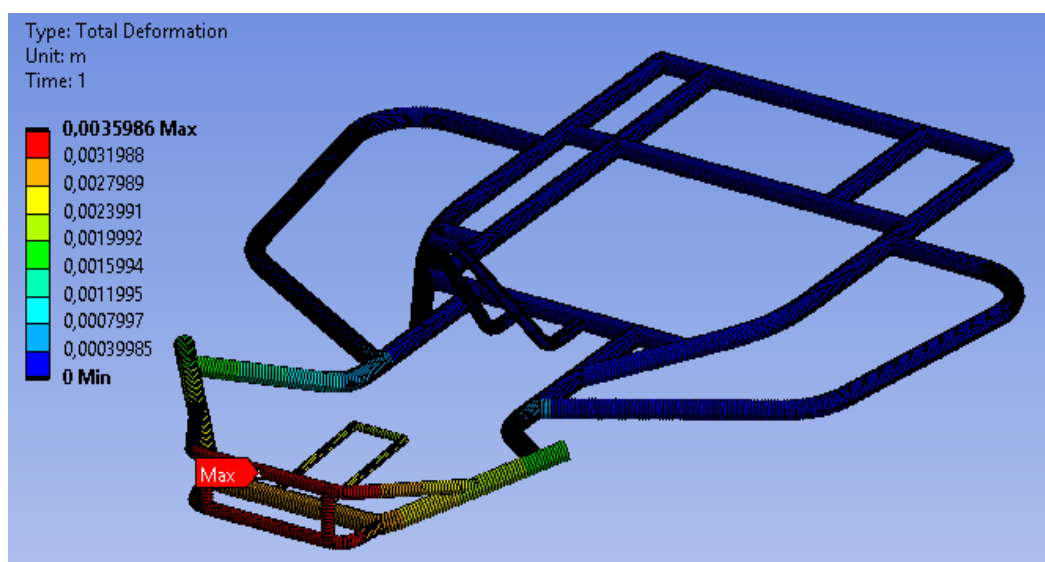


Рисунок 16 – Повреждения рамы при приложенных нагрузках вдоль оси карта.

Повреждения рамы составили 3,5 мм, что в пределах допустимых

значений.

На рисунке 17 изображено распределение нагрузки на раму.

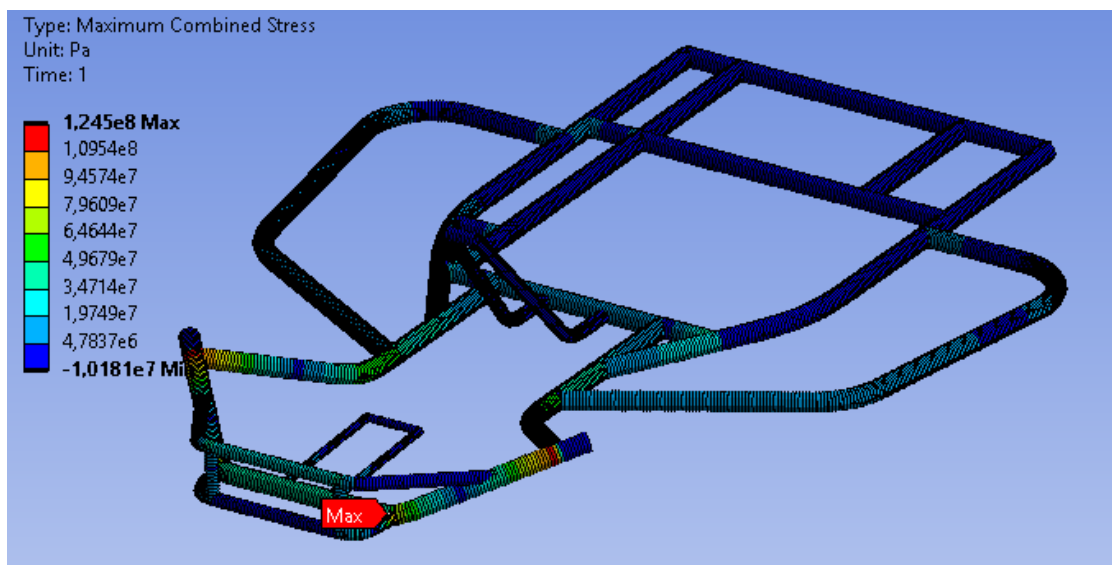


Рисунок 17 – Распределение напряжения при приложенных нагрузках вдоль оси карты.

Максимальное напряжение составило 124,5 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 9) то получаем двукратный запас прочности, что является вполне 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 карты.» [7]

На рисунке 18 изображено фиксация рамы и направление нагрузки под углом 30 градусов у оси симметрии.

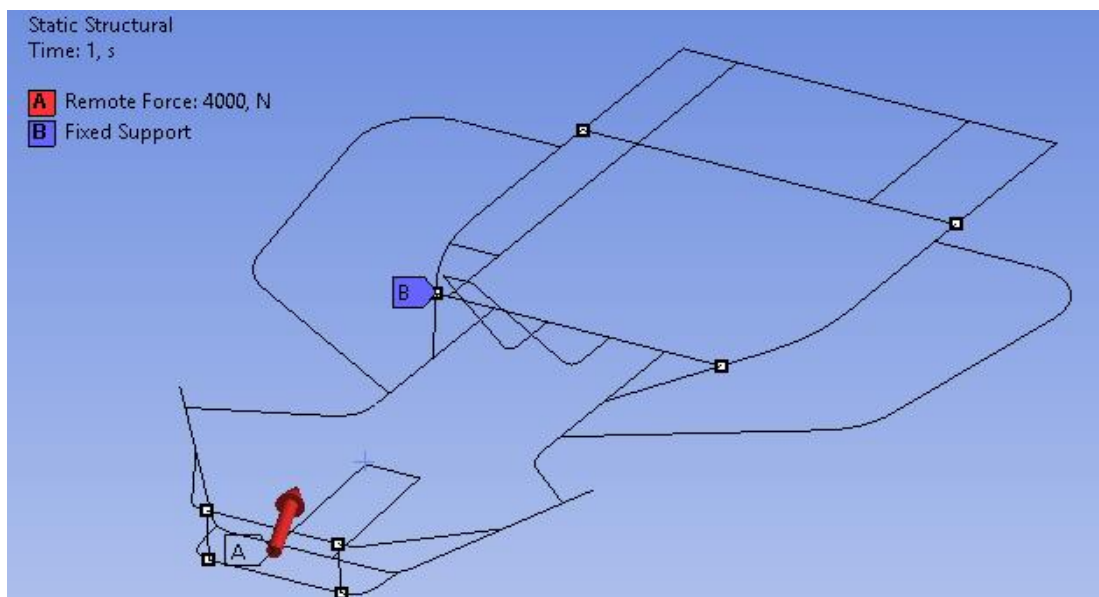


Рисунок 18 – Точки фиксации и направление нагрузки

На рисунке 19 изображены повреждения рамы под влиянием нагрузок.

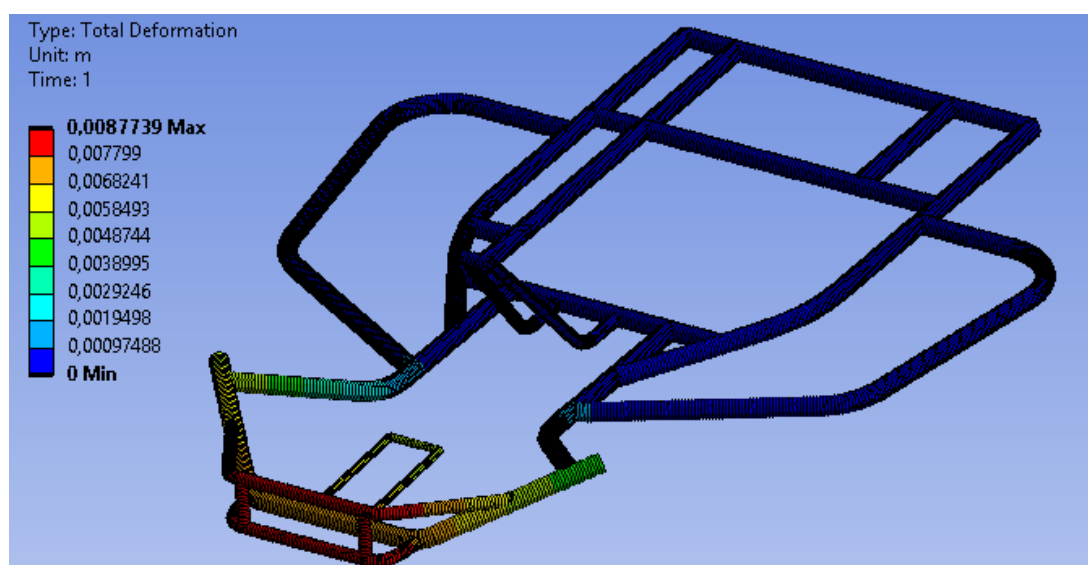


Рисунок 19 – повреждения рамы под влиянием нагрузок вне оси

Повреждения составили 8,8 мм, что является допустимым значением.

На рисунке 20 изображены распределение нагрузок на раму.

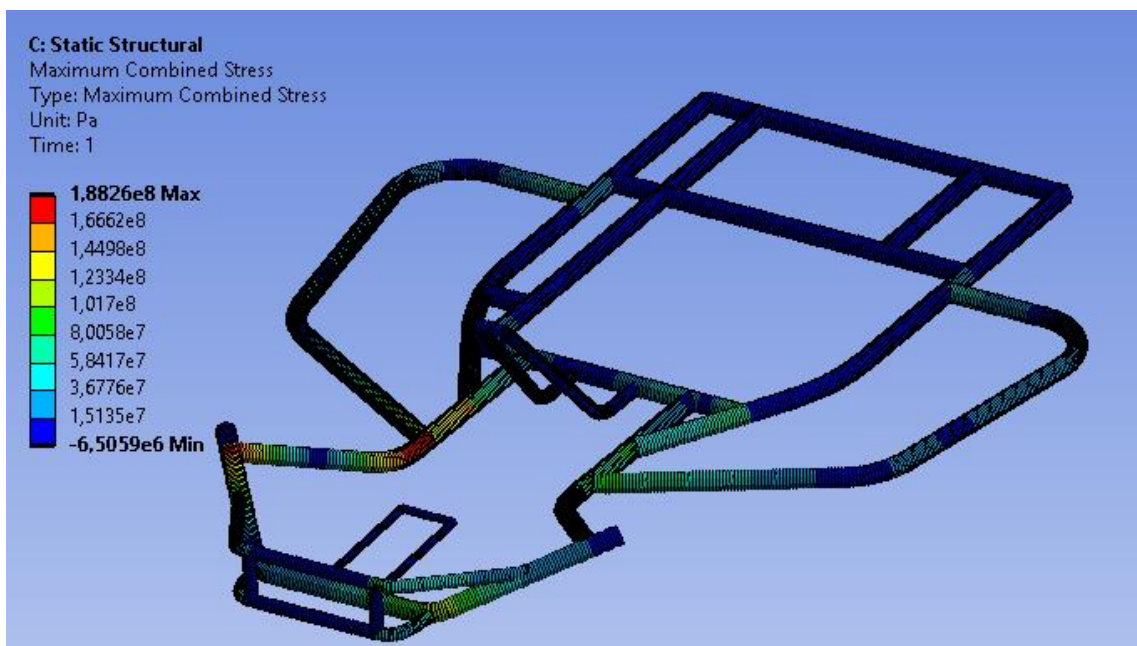


Рисунок 20 – распределение нагрузок на раму вне оси автомобиля

По рисунку 20 делаем вывод, что максимальные повреждения находятся в упругой зоне, коэффициент запаса прочности составляет 1,3 – это хорошее значение для таких нагрузок.

Больше всего напряжение концентрируется в местах крепления труб каркаса рамы и составляет 58 МПа, что является хорошим показателем.

2.2 Анализ крепости каркаса рамы карта на кручение

«В соответствии с источниками [6, 8] 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 21 представлены граничные условия и вектора сил, приложенные в местах крепления кронштейнов.» [8]

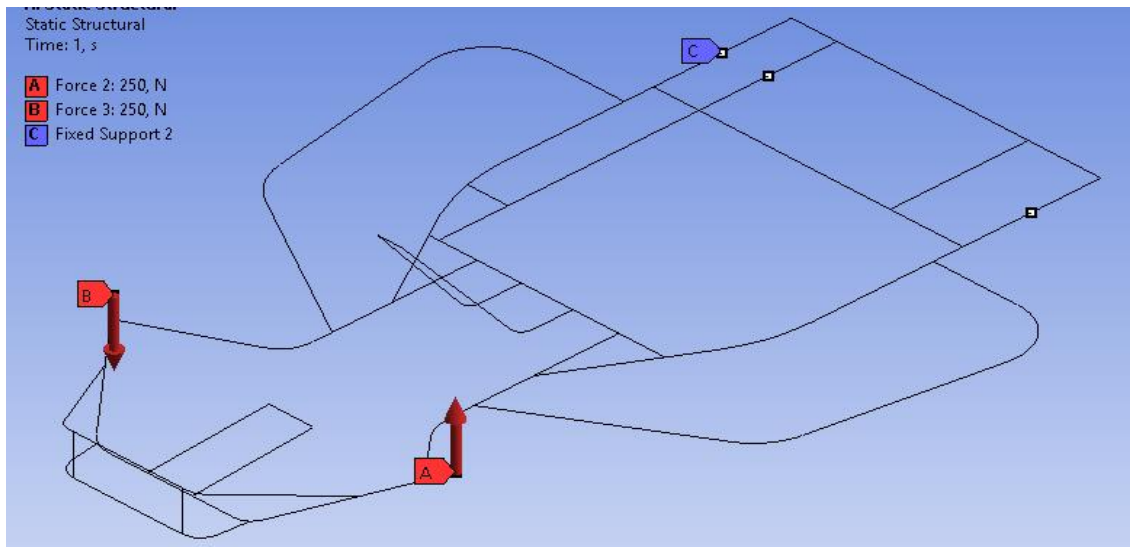


Рисунок 21 – Точки крепления и направление нагрузки при расчете на жесткость

«Расчет жесткости будем проводить по формуле:

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

где c_p – жесткость, Н·м/град;

M – крутящий момент, Н·м;

α – 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.» [14]

На рисунке 22 изображено движение рамы по трем осям

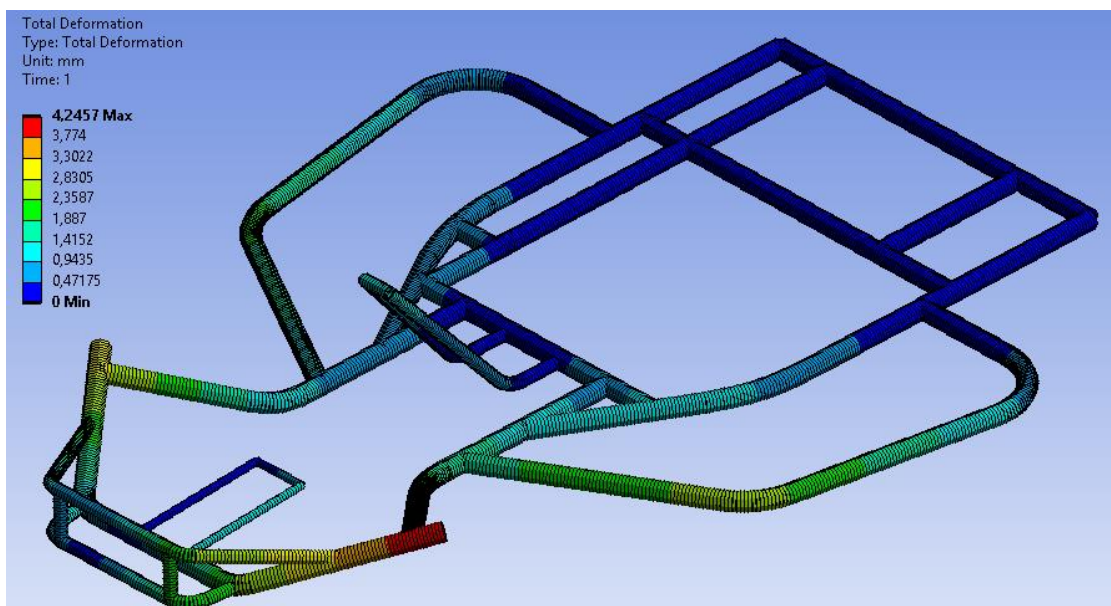


Рисунок 22 – движение рамы по трем осям при расчете на жесткость

Вычислить размер угла α с помощью значения максимально смещения точки крепления по оси Z -4,18 мм и по оси X – 0,68 мм.. С помощью метода построения определяем значение угла α равного 0,75

Произведем расчет жесткости рамы с помощью формул 1 и 2:

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

Полученная жесткость отвечает требованиям предъявляемым к рамам карта. Конструкция рамы отвечает всем требованиям, изготовить в рамках испытания ее будет по силам профессиональному сварщику.

Стандарт, который определяет специфику и порядок прочностного расчета изделий из термопластов. Учитывает сварку полимерных материалов в отличие, например от расчетов по металлу. Номограммы долговременной прочности термопластов приведены в указанном стандарте.

В основу положены номограммы долговременной прочности термопластов, которые позволяют определить допускаемое напряжение в

пластике в зависимости от длительности времени эксплуатации и температуры. Что в значительной степени отличает данный вид расчетов, например от сварных изделий из металлов, где допускаемое напряжение является постоянной (в разумных пределах температур) величиной. Номограммы являются неотъемлемым приложением стандарта. После определения допускаемого напряжения в материале расчет ведется стандартными приемами прочностного расчета.

Что не менее важно, стандарт устанавливает коэффициент запаса прочности по толщине листового полимера в зависимости от вреда, который может быть причинен аварийной ситуацией, а также учитывает фактор сварки, т.е. технологию и метод сварки (экструзионная сварка, сварка горячим воздухом, сварка встык нагретым инструментом), который отображается коэффициентом прочности сварного соединения от прочности исходного листа. Для данного изделия, согласно стандарта с учетом сварки встык нагретым инструментом и экструзионной сварки поправки на коэффициент сварки по швам и коэффициент запаса прочности.

Расчет предполагает расчет напряжений в материале на основании номограммы долговременной прочности термопластов, в котором отражается зависимость допустимого напряжения в материале от температуры и времени эксплуатации. Исходя из данных по номограмме долговременной прочности принимаем допустимое напряжения в полимере и вычисляем расчетную толщину стенки пластика. Также данный стандарт предусматривает запас прочности с учетом фактора сварки и коэффициента запаса прочности изделия. Стандарт определяет для данного изделия с учетом сварки встык нагретым инструментом и экструзионной сварки поправки на коэффициент сварки по швам и коэффициент запаса прочности.

Таким образом применение стандарта при расчете данной конструкции гарантирует не только увеличенный запас прочности изделия, но и обосновывает заданный срок эксплуатации.

По верхней части силового каркаса нами предлагается решение, которое снизит вероятность попадания раствора на силовой каркас.

Выводы: проведен анализ рамы на кручение и анализ прочности рамы при приложенном напряжении. Анализ рамы на кручение выявил жесткость рамы равную $220 \text{ Н}\cdot\text{м}/\text{град}$. Это является очень хорошим показателем для гоночного автомобиля класса карт. Анализ прочности конструкции рамы рассчитанный с учетом повреждений рамы от приложенного напряжения по оси конструкции составил 2 ед., вне оси – 1,3 единицы.

Представленная рама отвечает всем требованиям для гоночных автомобилей класса карт и подходит для дальнейшей разработки стапеля.

3 Разработка технологической оснастки

3.1 Разработка стапеля для изготовления гоночного карта

«Для изготовления рамы гоночного карта в условиях серийного производства необходимо применение оснастки, позволяющей надежно зафиксировать раму в процессе сварки и последующем охлаждении [20, 23, 24]. Устоявшейся практикой для фиксации элементов при сварке пространственных рам являются изготовление стапелей различной конструкции. Применение стапелей позволяет свести к минимуму появление деформаций и обеспечить окончательную требуемую точность сваренной рамы.

Объемная модель стапеля, собранного из пластин толщиной 5 мм, представлена на рисунке 23, а на рисунке 24 – совместно с рамой малолитражного гоночного автомобиля.» [9]

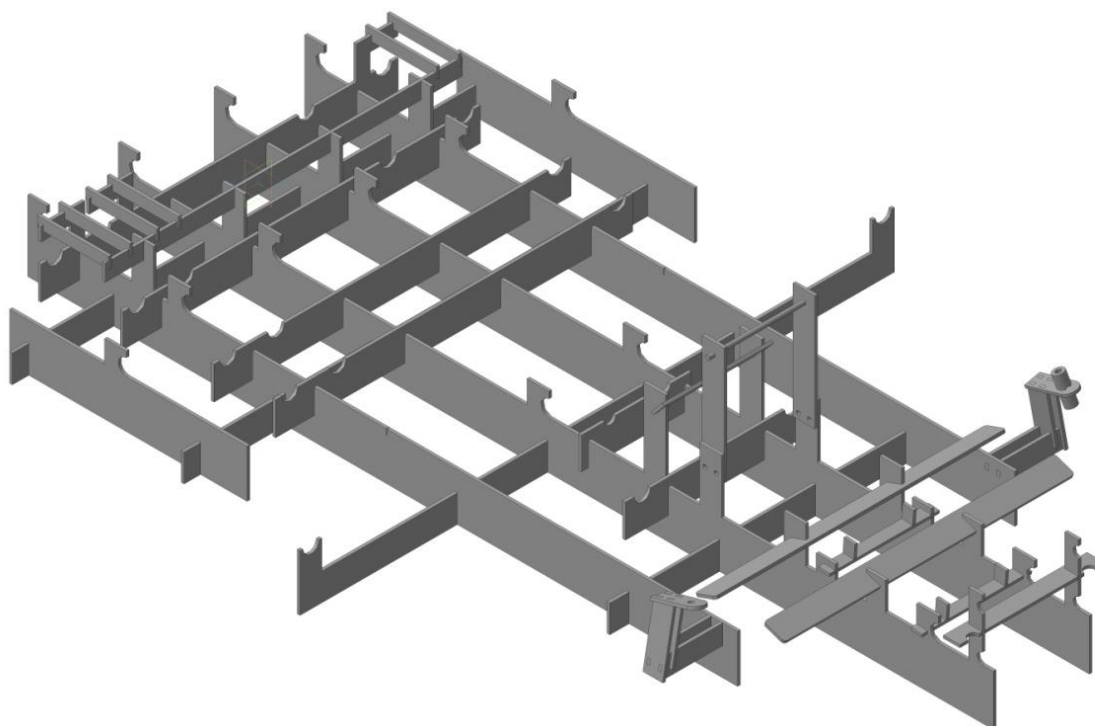


Рисунок 23 – Объемная модель стапеля

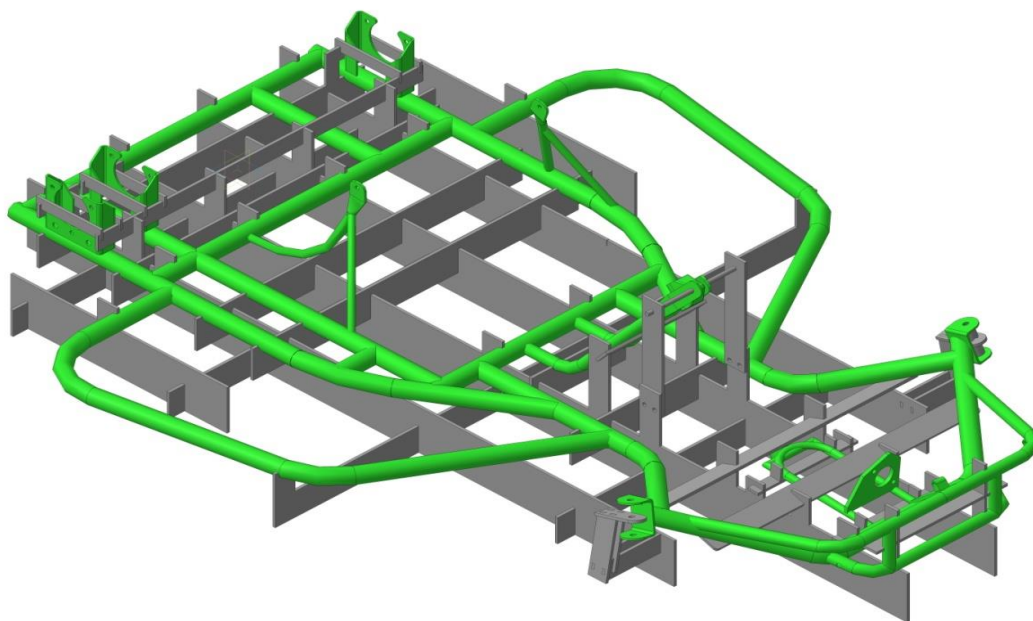


Рисунок 24 – Сборно-разборный стапель

«Как показано на рисунках 23-24, разработанный прототип стапеля является сборно-разборным, а универсальные механизмы соединения пластин позволяют варьировать габаритные размеры рам автомобилей класса «карт», собираемых на данной технологической оснастке. Многократный процесс сборки-разборки данной конструкции также не окажет влияния на точность и качество изготавливаемого на её основе изделия. Вес, предварительно разработанной конструкции стапеля составляет 45 кг.

Далее конструкция стапеля будет подвергнута конечно-элементному анализу для определения оптимальной толщины пластин, из которых состоит стапель с учетом усилий при сборке элементов стапеля и деформаций при проведении сварочных работ.» [10]

3.2 Конструкция стапеля

«При изготовлении рамы возможен вариант с изготовлением стапеля из дерева, либо фанеры, но, очевидно, такая конструкция будет одноразовой и при дальнейшем использовании даст повышенную погрешность при сварке.

Для точной сварки пространственных конструкций стапель должен обладать достаточной жесткостью. Очевидно, стальной стапель сможет обеспечить требования жесткости.

Видно, что конструкция данного стапеля является сборно-разборной и при этом – взаимозаменяемой. Такой модульный подход к изготовлению технологической оснастки позволяет унифицировать конструкцию стапеля и существенно снизить затраты на изготовление стапеля под новые габариты рамы гоночного карта.

Одним из существенных отличий данной конструкции оснастки являются сектора под фиксацию труб при обварке стапеля. Благодаря этому нюансу повышается точность предварительной сборки, и снижаются погрешности при итоговой сварке конструкции.» [11]

«Материалом стапеля является конструкционная углеродистая сталь обыкновенного качества Ст. 3. Конструкционную углеродистую сталь обыкновенного качества Ст. 3 применяют для изготовления несущих и ненесущих элементов для сварных и несварных конструкций, а также деталей, работающих при положительных температурах. Листовой и фасонный прокат 5 категории (до 10 мм) применяют для несущих элементов сварных конструкций предназначенных для эксплуатации в диапазоне от минус 40°C до 425°C при переменных нагрузках. Таким образом, использование данной стали позволит выдержать требуемую жесткость и удешевит производство по сравнению с использованием качественной стали.

С технологической точки зрения, габаритные размеры данного стапеля являются минимально необходимыми для надежной фиксации трубной конструкции рамы гоночного карта. Кроме того, конструкция данного стапеля позволяет его разобрать при отсутствии необходимости или, как было указано выше, пересобрать под новые габариты в сжатые сроки.» [12]

На данный момент по стапелю присутствуют разрывы, в основном на углах каркаса, которые появились в результате испытаний. Это следствие нарушений по эксплуатации сборно-разборных элементов. Конструкция

изделия состоит из композитного корпуса и металлокаркаса, обшитого с внешней стороны полимерным материалом. Металлокаркас, обшитый с внешней стороны полимерным материалом является неотъемлемой частью аттенюатора. У всех материалов есть коэффициент температурного линейного расширения. У полимерного материала он составляет 150-200 единиц, у стали 12-13 единиц, это в 15 раз больше. Все данные справочные в свободном доступе. У всей конструкции при эксплуатации с учетом внутренней длины корпуса аттенюатора происходит уменьшение полимерного материала в размере по длине 10-11 мм, по ширине на 5-6 мм соответственно, а металлокаркас, обшитый пластиком остается в своих размерах на месте, что в свою очередь приводит к разрыву внешней обшивки металлокаркаса от стапеля. При уменьшении размеров корпуса нагруженными местами остаются углы конструкции и так раз мы это видим в местах разрывов полимерного материала на углах металлокаркаса.

Технологические зазоры изменяясь между пластиком и металлом создают напряжения в прямом или обратном направлении в зависимости от отклонения от некоторой определенной температуры. Технологический зазор конструктивно имеет две составляющие для компенсации расширения пластика в положительную или отрицательную сторону. Иными словами, с точки зрения появления дополнительных напряжений в реально рассчитанной конструкции разница температур создает некомпенсированный зазор на каждую сторону каркаса, что с учетом увеличенной хрупкости пластика при высоких температурах создает аварийную ситуацию.

В сборно-разборном элементе требуется проверять ультразвуком швы с предоставлением расчетов. Важно грамотно и четко формулировать техническое задание и подкреплять его необходимыми чертежами и эскизами, которые несут всю информацию.

Конструкция стапеля делается из листового проката металла одинаковой толщины. Представленный стапель дает возможность сборки-разборки и проведение испытаний на прочность и жесткость.

За счет разборности стапеля появляется возможность ремонта и замены необходимых деталей.

За счет того, что стапель изготовлен из листового проката металла появляется легкость установки стапеля при сборке.

3.3 Моделирование конструкционной прочности стапеля

«В современных условиях производства, изготовление изделий начинают с анализа компьютерных моделей. Системы автоматизированного проектирования являются неотъемлемой частью любого конструкторского решения» [7].

«Для проектирования конструкции стапеля мы использовали систему трехмерного проектирования Компас-3D, разработанной специалистами Российской компании АСКОН. КОМПАС-3D обеспечивает поддержку наиболее распространенных форматов 3D-моделей (STEP, ACIS, IGES, DWG, DXF), что позволяет экспортировать модели в CAD/CAM/CAE-системы.

Для оценки прочности стапеля необходимо задать нагрузку, которая будет воздействовать на стапель в процессе сварки на нем рамы. Как известно, температуры при сварке достигают существенных величин, поэтому этот фактор тоже нужно учесть при моделировании.

В соответствии с теорией эксперимента для выяснения численных значений было проведено исследование, заключающееся в сварке отдельных элементов труб (рисунок 25), параметры которых полностью соответствовали трубам, используемым при изготовлении рамы карта.» [13]



Рисунок 25 – Элементы труб для исследования

На рисунке 25 видно, что трубы сварены между собой под разными углами, это имитирует сварку труб на раме карта.

Для сварки труб использовали сварочный аппарат полуавтоматического типа GROVERS MIG 250T 4R, характеристики аппарата представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Технические характеристики сварочного аппарата полуавтоматического типа GROVERS MIG 250T 4R

Характеристика	Диапазон значений
Напряжение питания, В	380±10 %
Напряжение холостого хода, В	46
Потребляемый ток, А	17
Потребляемая мощность, кВт	7,6
Сварочный ток, А	50-250
Рабочий цикл	60 % 250 А
Диаметр сварочной проволоки, мм	0,8, 1,0-1,2
Класс защиты	IP23

Сварочный аппарат полуавтоматического типа GROVERS MIG 250T – это современная модель сварочного аппарата, она относится к

профессиональному инструменту, обладает функциями «инверторного полуавтомата для сварки в среде защитных газов (MIG\MAG) предназначена для сварки нержавеющей, углеродистых и низкоуглеродистых сталей» [18]. Полуавтоматический универсальный сварочный аппарат может сваривать любой металл, любой толщины.

Очень компактная система с наименьшими внешними габаритами. В рабочей платформе нет необходимости. Максимальные внешние размеры базовой машины со вспомогательным пуансоном: Внешние размеры устройства загрузки пластин: длина 6330 мм, ширина 5700 мм, высота 4215 мм. Указанные выше габариты даны как ориентировочные максимальные. Окончательные размеры указываются в планировочном чертеже. Макс, высота формы, позитивной и негативной, с верхним и нижним нагревом: 620 мм. При использовании вспомогательного пуансона высота формы при позитивно-негативном формовании может значительно сокращаться.

Наши машины работают принципиально с зажимной кромкой в 20 мм. Аналогичный вид всей картины нагрева в виде многоцветной картины согласно патенту фирмы GEISS. Верхний нагреватель с моторизованным приводом и звеном кривошипа для обеспечения более быстрого и плавного движения.

Все остальные движения управляются пневматически соленоидными клапанами. Движения зажимной рамы, подъема стола и дополнительного пуансона с помощью синхронизированных цилиндров. Все пневматические клапаны выполнены по технологии 24В и снабжены контрольной индикацией. Подъем стола 61075 Н, полностью синхронизированное оборудование. Все скорости с бесступенчатой настройкой. Надежно сконструированная зажимная рама с системой бесконечной регулировки штанг, с вертикальным управлением. Движение 4 синхронизированными цилиндрами, сила смыкания 61075. Это гарантирует ровное распределение зажимного усилия и делает необязательной установку толщины материала.

Зажимная рамка настраивается бесступенчато по обеим осям без какого-либо дополнительного оборудования. Все позиции зажимной рамы программируемы и могут сохраняться в памяти. Никаких концевых выключателей на рамке больше не применяется.

Навесная дверь для простой смены формы. Новая система управления машиной SIMATIC S7 с децентрализованным подключением всех прикладных групп через шину SINEC L2 DP-bus. Все операции, индикации и контроль на одном мониторе фирмы Siemens, находящемся впереди слева на свободно поворачиваемой панели оператора PC 670.

Совершенная вакуумная система, состоящая из вакуумного бака 1965 литров, 4-х вакуумных насосов. Система пневматического синхронизированного пуансона. Усилие 31800 Н. Вентиляторное охлаждение посредством 4 вентиляторов на 26 м³/мин каждый, 700 Ватт.

На рисунке 26 изображено перпендикулярное соединение труб для проведения исследования и пирометр.



Рисунок 26 – Перпендикулярное соединение труб для проведения исследования и пирометр

После предварительной сварки труб измеряли углы со всех сторон. Важно, чтоб угол был прямой (рисунок 27).



а



б

Рисунок 27 – Замер углов сваренных труб: а – перпендиндикулярное соединение, б – угловое соединение

После проведения замеров трубы сварили полностью сварочным швом (рисунок 28).



а



б

Рисунок 28 – Сварочный шов: а – перпендикулярное соединение, б – угловое соединение

«В процессе наложения и дальнейшем охлаждении сварочного шва, проводили измерение температуры пирометром. Максимальное значение температуры зафиксировали в размере 505 °С. Уменьшение температуры, при охлаждении сварочного шва, происходило по экспоненциальной зависимости. В первые секунды уменьшение температуры происходило с большим шагом, но, чем меньше становилась температура, тем медленнее происходил процесс охлаждения.

После остывания проводили измерения отклонений элемента трубы под действием напряжений в сварочном шве [10]. В результате усреднения значений проведенных измерений была выявлена величина отклонения трубы в диапазоне от 0,85 до 1 мм на расстоянии 100 мм от сварочного шва. С целью упрощения примем, что отклонение трубы происходило в сторону наложения сварочного шва – при проведении измерений такое отклонение было доминирующим. В отдельных случаях отклонения совсем не происходило, и в некоторых случаях отклонения происходили в произвольных направлениях. Мы связываем эти случаи с неравномерностью наложения сварочного шва при проведении экспериментов.» [14]

Далее был определен изгибающий момент возникающий при сварке шва, он составил 490 Н·м.

Все входящие данные у нас есть, проведем расчет повреждения конструкции стапеля. Расчет сделаем с помощью конечно-элементного анализа в программе ANSYS Mechanical, в оболочке Ansys Workbench.

Для начала построения необходимо построить геометрическую модель стапеля, для этого воспользуемся функцией Geometry (рисунок 29). Функция может исправить недоработки, такие как зазоры, неровные грани, пересечения элементов.

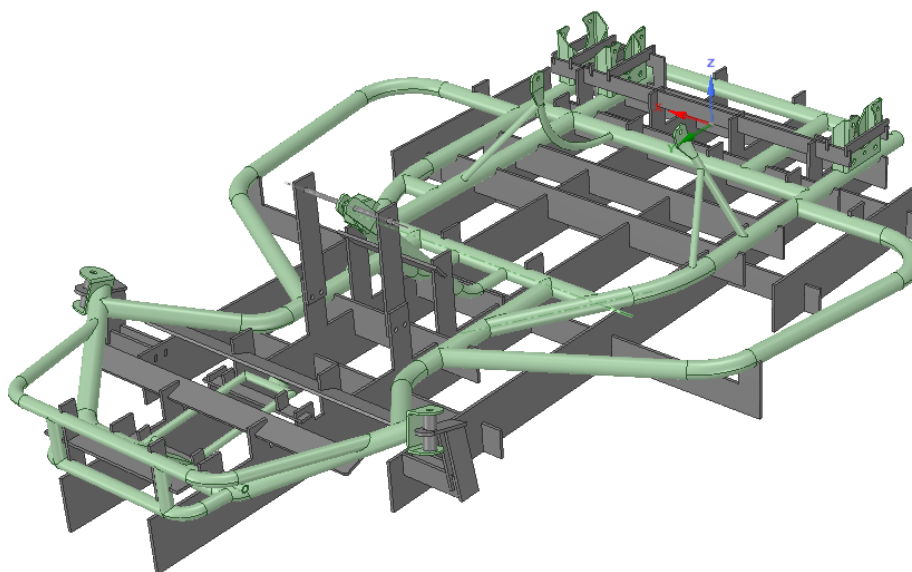
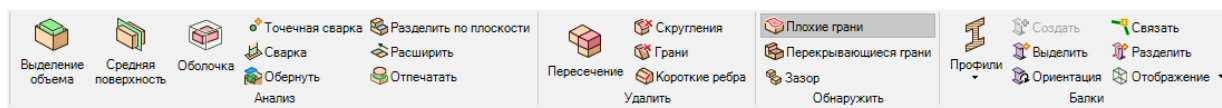


Рисунок 29 – Построение геометрии стапеля

Далее в разделе Engineering Data зададим свойства материалов из которых изготовлены стапель и рама карта. Функция Engineering Data, позволяет задать свойства металлов, из которых состоят элементы, впишем вручную материал стапеля - Сталь 20 и материал рамы – Сталь 3. Это стандартная сталь для изготовления конструкций, выберем ее из библиотеки программы. На рисунке 30 отображены свойства стали Ст.3.

	A	B	C	D	E
1	Contents of Engineering Data 			Source	Description
2	Material				
3	 St3			General_Materials.xml	Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1
4	 Steel 20			General_Materials.xml	Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1

Properties of Outline Row 3: St3				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	 
2	 Material Field Variables	 Table		
3	 Density	 Tabular		
6	 Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion			
7	 Coefficient of Thermal Expansion	 Tabular		
10	 Zero-Thermal-Strain Reference Temperature	22	C 	
11	 Isotropic Elasticity	 Tabular		
12	Derive from	Young's Modul... 		
13	Young's Modulus: Scale	1		
14	Young's Modulus: Offset	0	Pa	
15	Poisson's Ratio: Scale	1		
16	Poisson's Ratio: Offset	0		
17	Bulk Modulus: Scale	1		
18	Bulk Modulus: Offset	0	Pa	
19	Shear Modulus: Scale	1		
20	Shear Modulus: Offset	0	Pa	
21	 Strain-Life Parameters			
29	 S-N Curve	 Tabular		
33	 Tensile Yield Strength	2,5E+08	Pa 	
34	 Compressive Yield Strength	2,5E+08	Pa 	
35	 Tensile Ultimate Strength	4,6E+08	Pa 	
36	 Compressive Ultimate Strength	0	Pa 	

Рисунок 30 – Описание свойств стали 3

При изменении температуры – изменяются свойства материалов. Это необходимо учитывать при конечно-элементном анализе, поэтому зададим зависимость изменения плотности, модуля Юнга, коэффициента термического расширения, коэффициента Пуассона, теплопроводности и удельной теплоемкости от температуры.

Зависимость материала от температуры удобней всего задать в разделе Steady-State Thermal, с помощью уравнения теплопроводности.

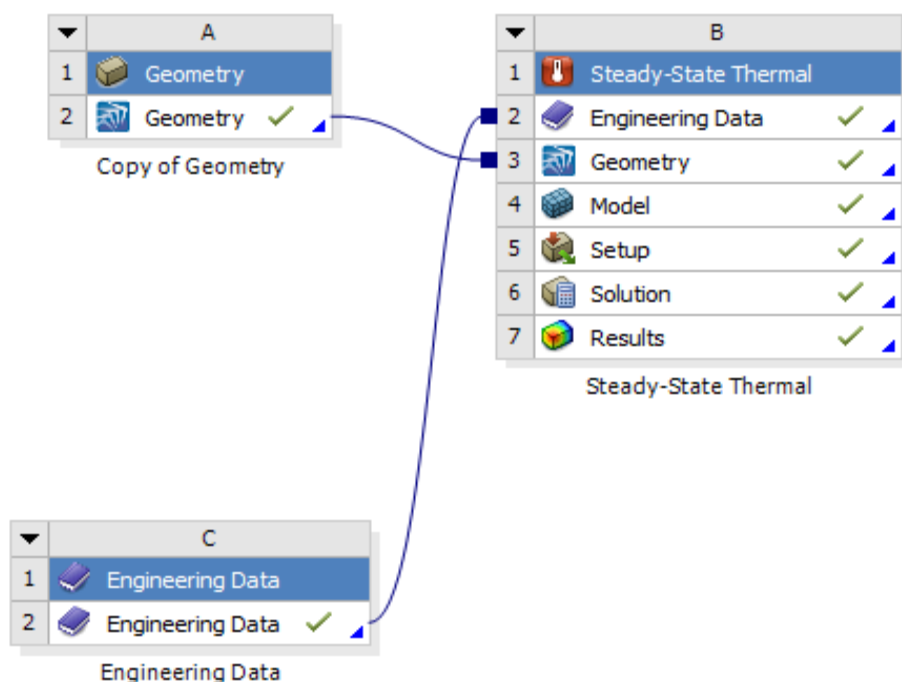


Рисунок 31 – установка зависимости в модуле Steady-State Thermal

На рисунке 31 показана установка зависимости по трем параметрам Geometry, Engineering Data и Steady-State Thermal. Все модули взаимосвязаны между собой, но при этом сохраняется возможность проведения одновременных расчетов, не задавая характеристики и размеры материалов.

В раздел Model, можем увидеть схему проекта (рисунок 32).

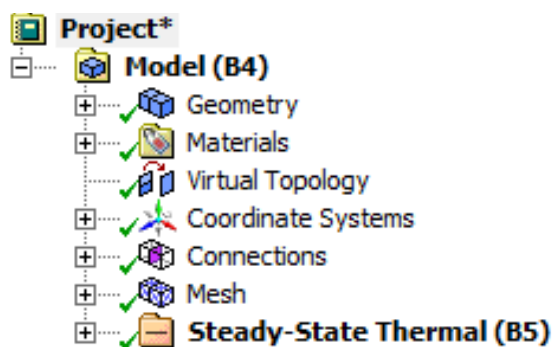


Рисунок 32 – Схема проекта

В разделе геометрия (рисунок 33) задаем элементам стапеля и рамы гоночного автомобиля карт материал.

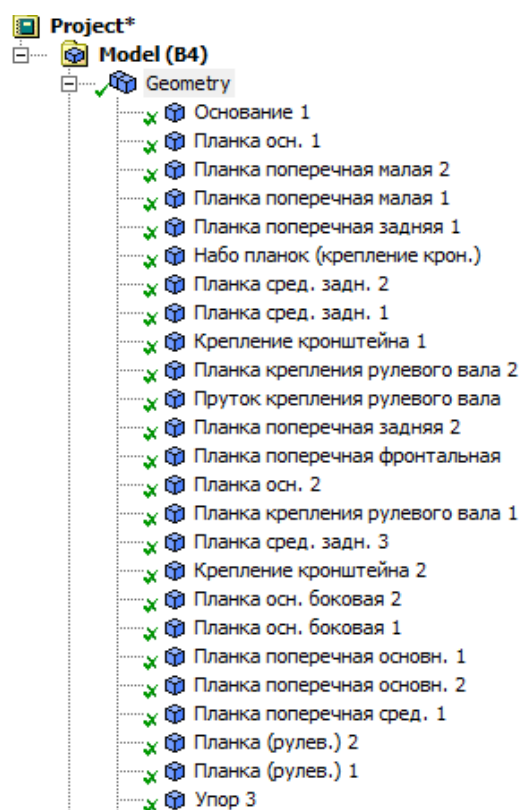


Рисунок 33 – Элементы геометрии

Проанализируем размеры, вес и инерцию наших элементов. На рисунке 34 показаны основные характеристики рамы карта.

Details of "Frame\Frame"		♀
+	Graphics Properties	
-	Definition	
	☐ Suppressed	No
	Stiffness Behavior	Flexible
	Coordinate System	Default Coordinate System
	Reference Temperature	By Environment
	Behavior	None
-	Material	
	Assignment	Steel 20
	Nonlinear Effects	Yes
	Thermal Strain Effects	Yes
-	Bounding Box	
	Length X	1184,4 mm
	Length Y	1565, mm
	Length Z	261,41 mm
-	Properties	
	☐ Volume	2,515e+006 mm ³
	☐ Mass	19,764 kg
	Centroid X	14,131 mm
	Centroid Y	553,7 mm
	Centroid Z	20,629 mm
	☐ Moment of Inertia ...	4,3934e+006 kg·mm ²
	☐ Moment of Inertia ...	1,2866e+006 kg·mm ²
	☐ Moment of Inertia ...	5,6068e+006 kg·mm ²

Рисунок 34 – Характеристики рамы гоночного автомобиля класса карт

Далее необходимо показать контактирующие элементы рамы стапеля, и рамы картинга со стапелем. Анализ конструкции стапеля будет осуществлен путем нагрузки рамы карта. При моделировании будем использовать 4 типа контакта (рисунок 35).

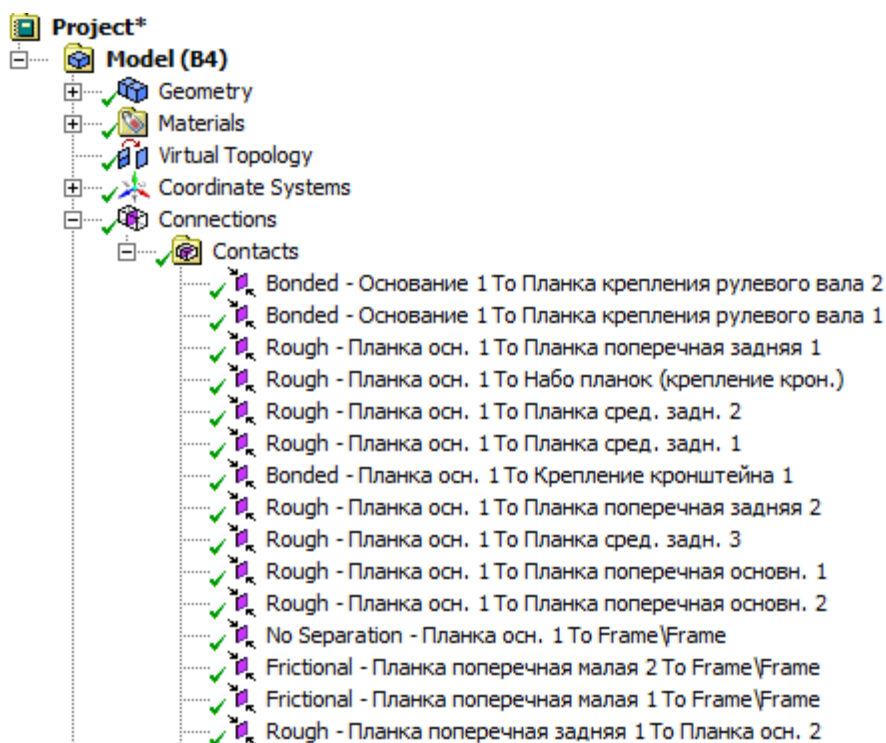


Рисунок 35 – 4 типа контактов

«В местах, где не допускается проскальзывания или разделения используем тип контакта Bonded (как правило, это сварные элементы). Тип контакта No Separation используем почти на всех поверхностях контакта рамы карта с элементами стапеля. Данный контакт используется когда разрыв между поверхностями не допускается, но могут возникать небольшие перемещения в виде проскальзывания (считаем, что из предварительного схватывания элементов рамы на стапеле данное упрощение оправданным).

Тип контакта Frictional – контакт который учитывает коэффициент трения и допускается разрыв между поверхностями – данный тип контакта также используем в некоторых местах контакта рамы карта с элементами стапеля.

Тип контакта Rough моделирует идеальную шероховатую поверхность контакта с трением, которая не допускает проскальзывания между соприкасающимися элементами конструкции – данный тип контакта

используем при моделировании сопряжения элементов стапеля между собой (т.к. элементы стапеля соединяются в натяг).» [15]

Разобьем конструкцию на гексагональные элементы (рисунок 36).

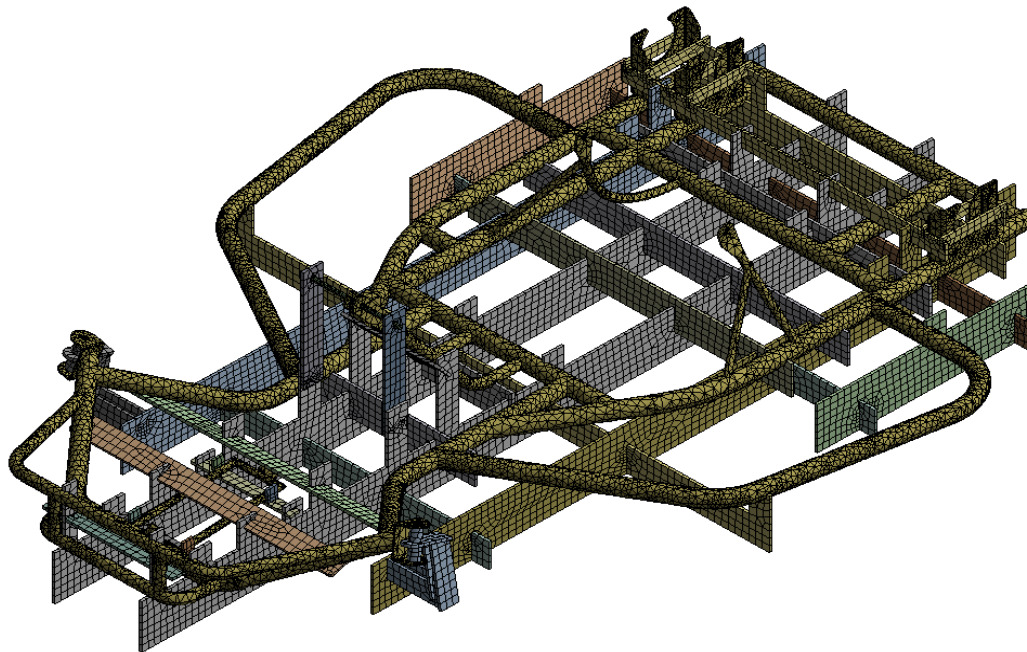


Рисунок 36 – Разбивка конструкции

«Переходим к заданию граничных температурных условий. В первую очередь необходимо задать конвективный теплообмен моделируемой конструкции в воздухе. Задаем стандартную величину на все поверхности, т.е. конвекция будем происходить со всех поверхностей.

Так как процесс обварки рамы происходит поэтапно, то моделирование распределения температуры проводили пошагово. Всего в модели 60 шагов, причем на каждом шаге необходимо было задавать величину температуры не только в месте сварки, но и во всех точках, где уже была произведена сварка или только планируется.» [16]

На рисунках 37-39 видно как распределяется температура на конструкции стапеля. Распределение температур задано с учетом моделирования распределения температур на предыдущих шагах.

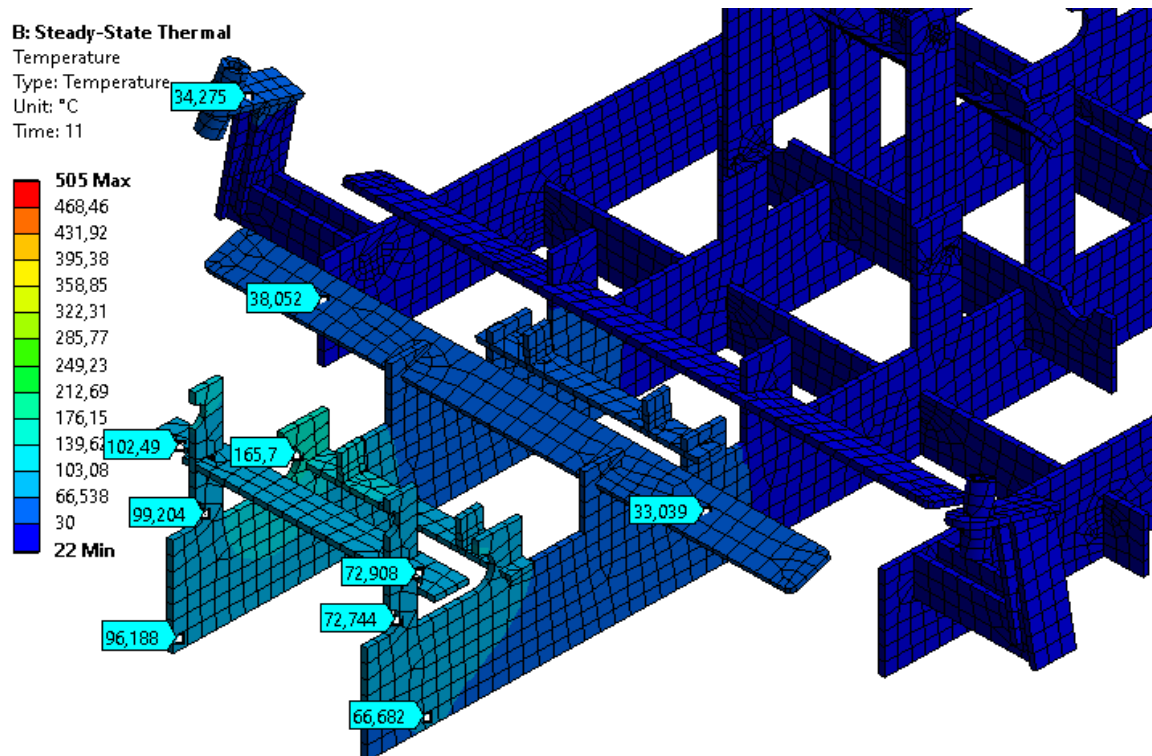


Рисунок 37 – Температура на шаге 11

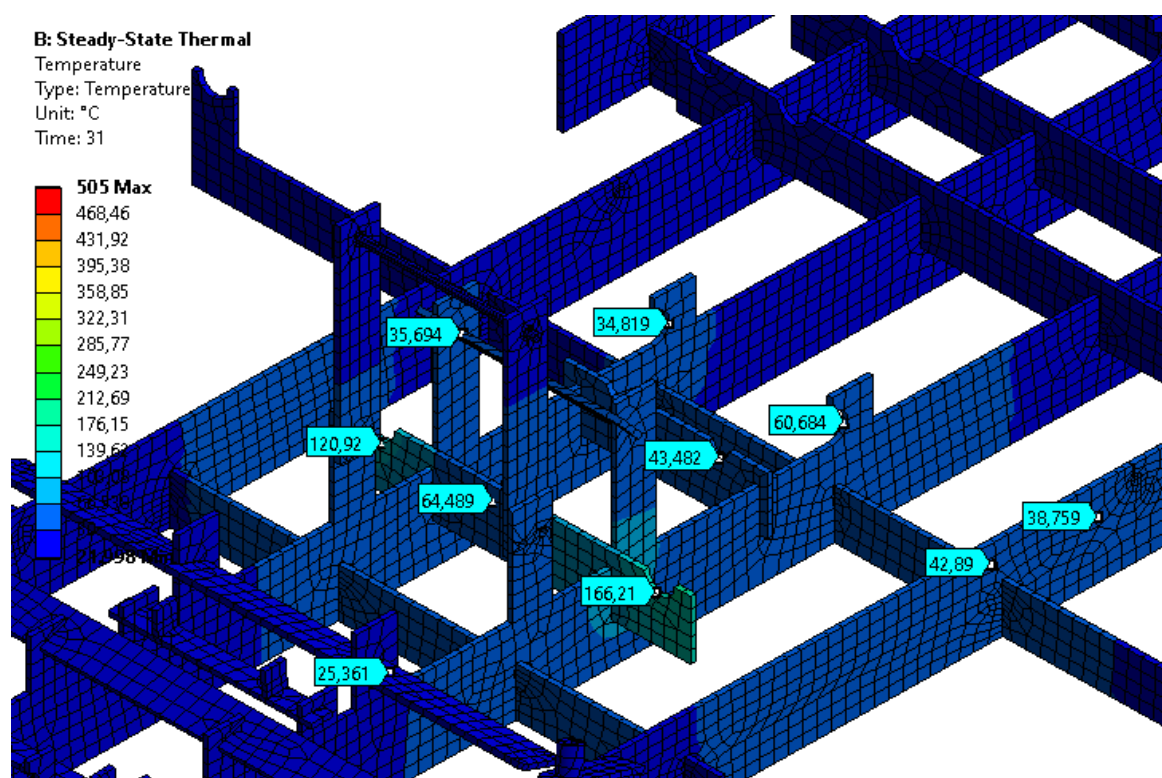


Рисунок 38 – Температура на шаге 31

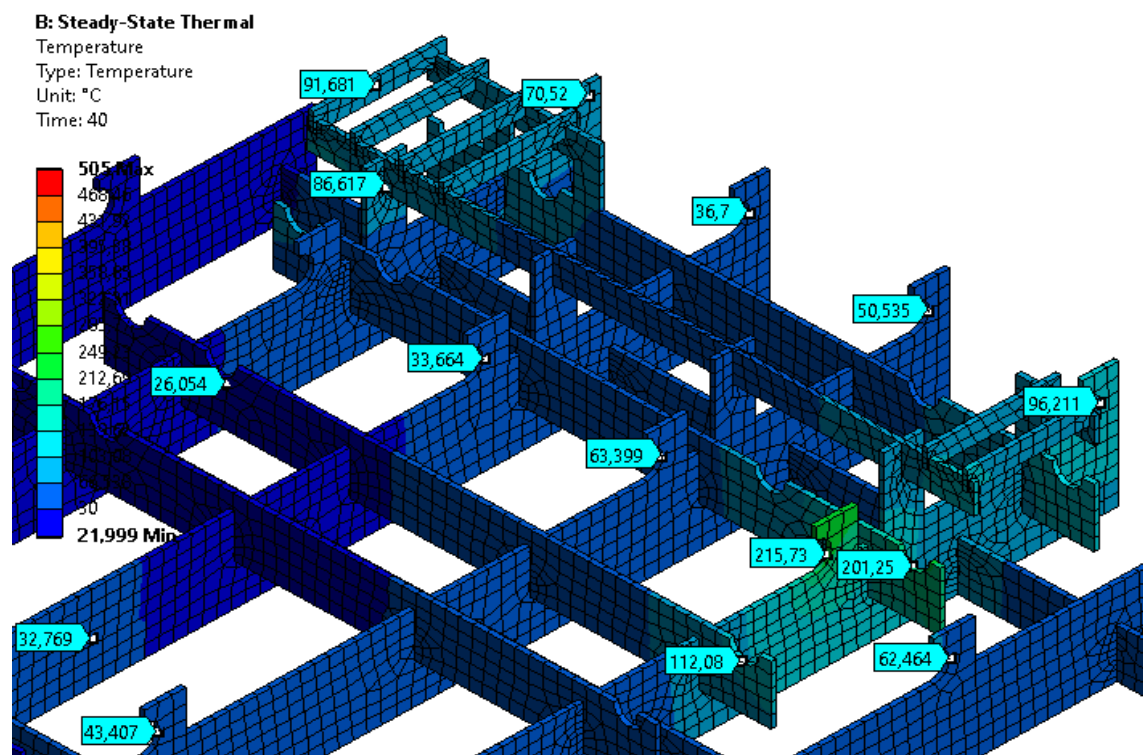


Рисунок 39 – Температура на шаге 40

Нагрузим раму карта изгибающими моментами с величиной, которую вычислили с помощью испытания. Моменты будем задавать также по шагам, и анализировать величину деформаций стапеля поэтапно.

В модуль Static Structural загружаем тепловые расчеты (рисунок 40).

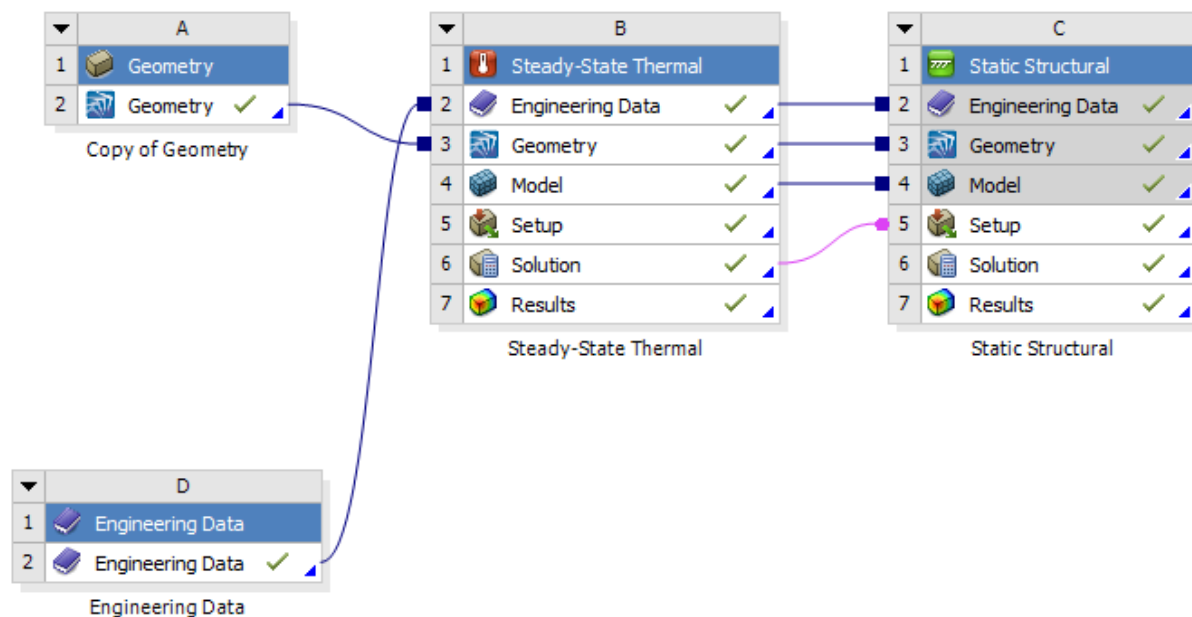


Рисунок 40 – Установка зависимости между Steady-State Thermal - Static Structural

«Импортируем тепловые нагрузки, вручную устанавливаем соответствие шагов и задаем изгибающий момент на каждом шаге, величиной в 490 Н·м. По нижним граням базовых пластин установим ограничение перемещения в вертикальной плоскости, а по основным продольным и поперечным пластинам фиксированную заделку, как это происходит и в реальности при обварке рамы карта.

На рисунке 41 представлено графическое окно с установленным изгибающим моментом при наложении сварочного шва на крепление перемычки.» [17]

Моменты, в отличие от температуры, наложенные один раз, остаются до конца сварки рамы и оказывают влияние на ее деформацию.

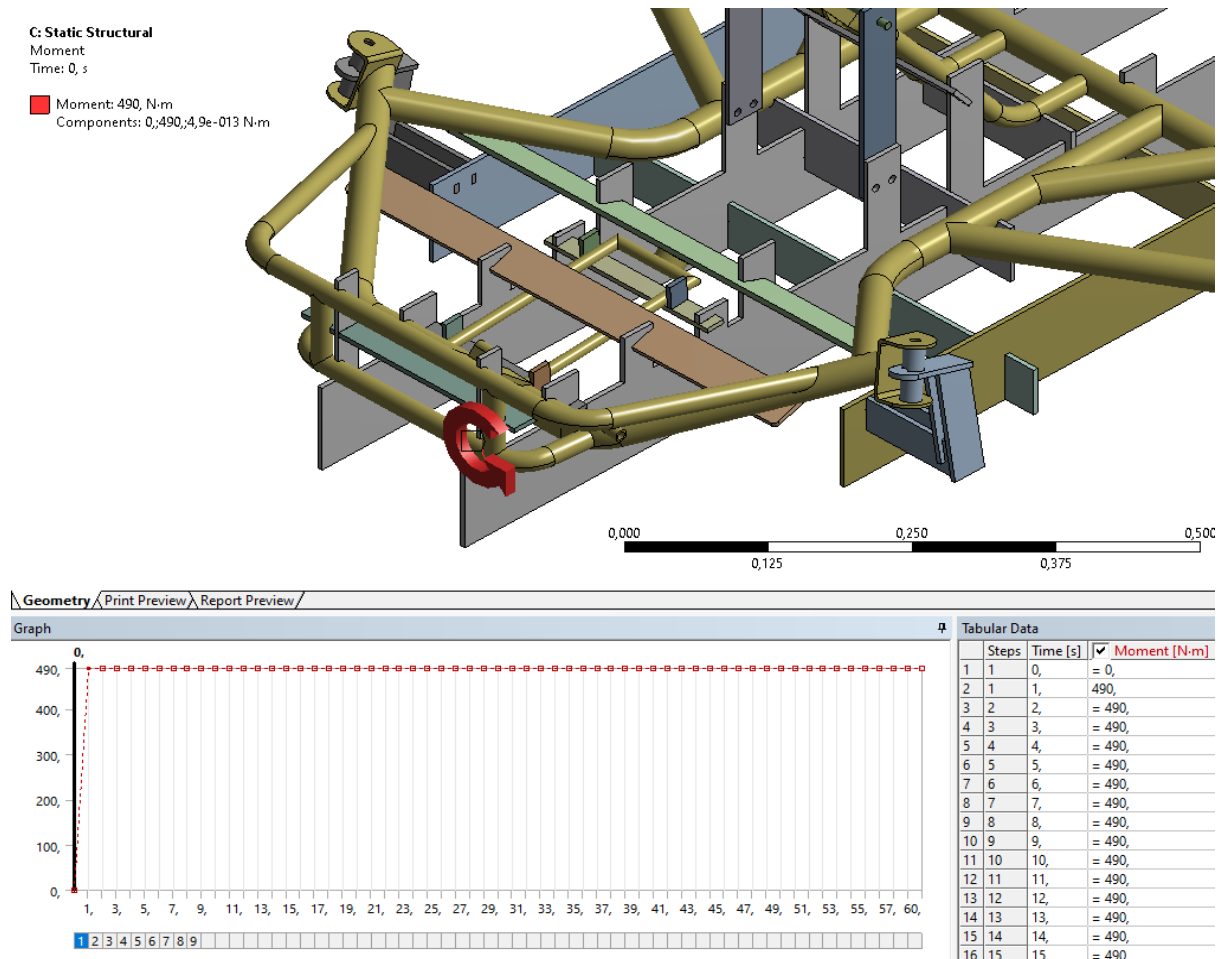


Рисунок 41 – Величина и направление момента на шаге 1

По рисунку 41 видно максимальные повреждения стапеля, толщиной 5 мм с установленной на нем рамой карта не превышает 1,69 мм.

Это результат отвечает требованиям. Важно понимать, что максимальные значения величины деформаций относятся к раме карта, а деформации стапеля несколько ниже. На рисунках 42 – график деформации конструкции непосредственно самого стапеля.

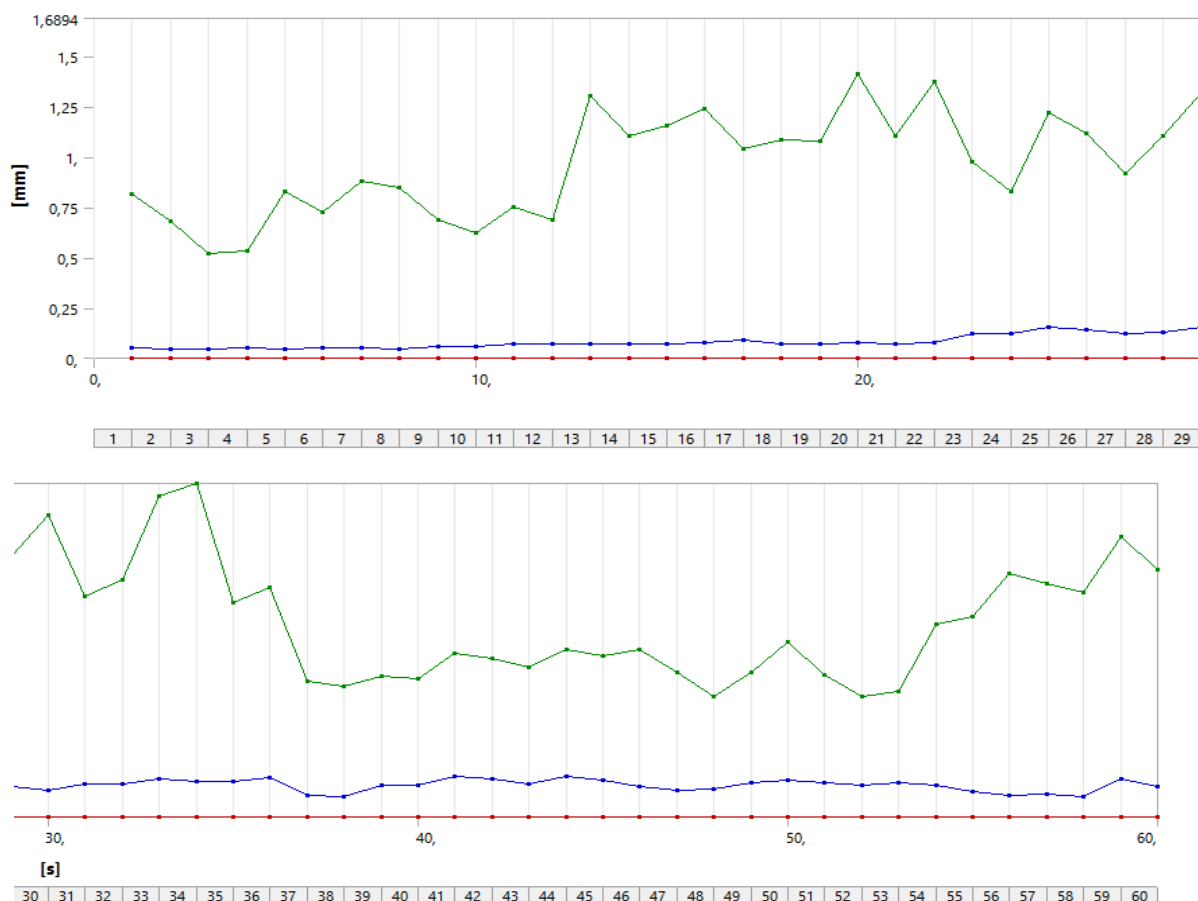


Рисунок 42 – Шкала повреждения элементов

Разработанная конструкция стапеля имеет достаточную жесткость и отвечает всем требованиям.

«Выводы: применение технологической оснастки, типа стапелей позволяет свести к минимуму появление деформаций и обеспечить окончательную требуемую точность сваренной рамы.

Рассмотрены преимущества и недостатки изготовления стапеля из различных материалов.

Представлена конструкция универсального сборно-разборного стапеля для сварки малолитражных гоночных автомобилей. Универсальный механизм соединения пластин позволяет варьировать габаритные размеры рам автомобилей класса «карт», собираемых на данной технологической оснастке. Вес полного комплекта разработанной конструкции стапеля составляет 45 кг.

В качестве материала пластин выбрана конструкционная углеродистая сталь обыкновенного качества Ст.3.

Представлен результат натурных экспериментов по определению температуры при сваривании труб и деформации элементов труб под действием, возникающих в сварном шве, напряжений.» [18]

Проведено конечно-элементное моделирование в программном пакете ANSYS Mechanical при использовании оболочки Ansys Workbench.

Выполнен анализ распределения температур в модуле Steady-State Thermal. Моделирование распределения температуры было проведено пошагово, моделируя реальный процесс сварки.

Представлены результаты изменения температуры рамы по шагам с иллюстрацией процесса на модели рамы карта и стапеля.

Выполнен прочностной расчет в модуле Static Structural. Моменты были заданы также по шагам, и анализ деформации стапеля был проведен поэтапно.

Показано, что максимальная деформация стапеля, с толщиной пластин 5 мм и установленной на нем рамой карта не превышает 1,69 мм.

Заключение

В данной работе рассмотрели конструирование универсального сборно-разборного стапеля для сварки малолитражных гоночных автомобилей. Провели анализ конструкции универсального сборно-разборного стапеля для сварки малолитражных гоночных автомобилей. При проектировании важно учитывать также дополнительные требования к технологической оснастке для сварки, такие как вес и температура при сварке.

В первом разделе рассмотрели варианты конструкций стапелей технологической оснастки и их применимости под требования универсальной технологической оснастки. Расчеты проводили методом конечно-элементного моделирования, а также испытаниями экспериментальным путем. В основном стапели предлагается изготавливать с помощью универсального механизма соединения пластин. Во втором приближении рекомендации из сотовых конструкций и композитных материалов.

Во втором разделе предложили укрупненную блок-схему методов проектирования, выполненных в виде поверхностных тел в различных программах. Подготовили расчетную модель технологической оснастки. Провели анализ конструкций по дополнительным требованиям.

В третьем разделе выбрали конструкция универсального сборно-разборного стапеля. Провели анализ, который позволил пройти дополнительные требования конструкционной прочности разработанной рамы.

Представлена конструкция универсального сборно-разборного стапеля для сварки малолитражных гоночных автомобилей. Показано, что максимальная деформация стапеля, с толщиной пластин 5 мм и установленной на нем рамой карта при сварке не превышает величины 1,69 мм.

Список используемой литературы и используемых источников

1. Деев Г. Ф., Деев Д. Г. Зона сплавления в сварном соединении : монография. СПб. : Лань, 2018. 152 с.
2. Дэниэлс Дж. Современные автомобильные технологии. М. : Астрель : АСТ, 2007. 223 с.
3. Зорин Н. Е., Зорин Е. Е. Материаловедение сварки. Сварка плавлением : учеб. пособие. СПб. : Лань, 2018. 164 с.
4. Картинг – что это такое? [Электронный ресурс] // URL: <http://fb.ru/article/316895/karting-chto-eto-takoe-razvlechenie-ili-sport> (дата обращения 18.08.2022).
5. Ли К. Основы САПР (CAD/CAM/CAE). СПб. : Питер, 2004. 560 с.
6. Марка стали 20 [Электронный ресурс] // URL: https://metallischekiy-portal.ru/marki_metallov/stk/20/ (дата обращения: 01.08.2022).
7. Полуавтомат GROVERS MIG 250T 4 [Электронный ресурс] // URL: https://www.tehnosvarka.ru/catalog/oborudovanie_apparaty/poluavtomat_grovers_mig_250t.htm (дата обращения: 01.08.2022).
8. Промышленное оборудование, зажимные приспособления и кондукторы [Электронный ресурс] // URL: <http://weldering.com/promyshlennoe-oborudovanie-zazhimnye-prisposobleniya-konduktory> (дата обращения 19.09.2022).
9. Развесовка карта [Электронный ресурс] // URL: <http://kartingzone.com/articles/kartweight> (дата обращения: 18.05.2022).
10. Сварочно-сборочные столы [Электронный ресурс] // URL: <http://tolyatti.regmarkets.ru/svarochno-sborochnye-stoly--52198/> (дата обращения: 19.09.2022).
11. Соснин Э. А., Пойзнер Б. Н. Методология эксперимента : учеб. пособие. М. : ИНФРА-М, 2019. 162 с.

12. Трехмерное моделирование деталей и сборочных единиц в системе КОМПАС-3D [Электронный ресурс] // URL: <https://unecon.ru/askon/kursy/kompas-3d> (дата обращения 15.09.2022).
13. 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.
14. Устройство гоночного автомобиля карт [Электронный ресурс] // URL: <https://kartodrom.com.ua/news/articles/ustroistvo-gonochnogo-avtomobilya-kart> (дата обращения: 18.08.2022).
15. Шерстобитова О. О., Мошко Д. А. Разработка модульной каркасно-сборочной технологической оснастки для производства элементов спортивно-гоночных автомобилей / 5-й Всероссийский форум: «Студенческие инженерные проекты». М.: МАДИ, 2017. С. 256
16. Ansys : Ansys Mechanical Finite Element Analysis (FEA) Software for Structural Engineering [Электронный ресурс] // URL: <https://www.ansys.com/products/structures/ansys-mechanical> (дата обращения 07.09.2022).
17. Coutelieris F. A., Kanavouras A. Experimentation Methodology for Engineers. Cham : Springer, 2018. 118 p.
18. Hemank D. Design and Fabrication of Superkart HD-250 // International Journal of Recent Trends in Engineering. 2009. № 5. PP 125-128.
19. 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.
20. Segerlind L. J., Wiley J. Applied Finite Element Analysis : перевод на русский язык. М. : МИР, 1979. 98 с.
21. Wood W. G. Experimental method;: A guide to the art of experiment for students of science and engineering. New York : Athlone Press, 2004. 106 p.