

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 Проектирование технологической оснастки для получения неразъемных соединений из профильных труб при изготовлении гоночного карта

Студент

С.Р. Никитин

(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 конструктивных особенностей малолитражного гоночного автомобиля любительской серии.....	5
Глава 2 Геометрическое моделирование гоночного карта .....	9
2.1 Объемная модель гоночного карта.....	9
2.2 Расчетная модель рамы карта .....	12
Глава 3 Конструкционная прочность рамы карта любительской серии .....	19
3.1 Анализ прочности рамы карта любительской серии.....	19
3.2 Анализ жесткости рамы на кручение .....	27
Глава 4 Разработка технологической оснастки.....	32
4.1 Разработка стапеля для изготовления гоночного карта .....	32
4.2 Анализ технологичности конструкции стапеля.....	33
4.3 Моделирование конструкционной прочности стапеля .....	35
Заключение .....	67
Список используемой литературы .....	69

## Введение

Картинг приобретает все большую популярность и как развлечение, и как вид спорта. Во многих городах появляются картодромы, где можно получить дозу адреналина, улучшить свои навыки вождения, снять стресс и весело провести время.

Картинг – это гонки на картах (малолитражных гоночных автомобилях открытого типа, без кузова). Карт может развивать скорость от 60 до 260 км\ч, в зависимости от типа и класса. Считается одним из самых массовых видов автомобильного спорта.

Картинг можно поделить на 2 вида.

Спортивный картинг (профессиональный) является основой гоночного вида спорта. Предназначен для подготовленных участников, такие карты оборудованы коробкой переключения передач и более мощным, двухтактным двигателем. Бывает зимний и летний спортивный картинг. Существуют любительские, национальные и международные спортивные классы. Пол участников значения не имеет, все выступают на равных.

Прокатный картинг (хобби картинг, любительский) это хорошее развлечение и вид активного отдыха. Доступен почти любому желающему, поэтому большинство знает, что такое именно прокатный картинг.

Часто гонки у большинства людей ассоциируются с повышенной опасностью, однако, картинг достаточно безопасен, особенно если речь идет о его любительской разновидности. Перед заездами гонщики в обязательном порядке облачаются в специальную экипировку. Для любительского картинга обязательный минимум составляют: шлем, комбинезон и специальный шейный воротник.

В Самарской области очень популярен картинг: существуют более десятка картодромов, картинговых клубов, прокатных центров и команда чемпионов «LADA SPORT». 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.

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» 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. Стоимость изготовления данного элемента существенно влияет на стоимость данного автомобиля для конечного потребителя.

Для изготовления рамных конструкций автомобилей класса «карт» необходима технологическая оснастка, обеспечивающая быструю сборку и обработку деталей и конструкций с высокой точностью и производительностью.

В настоящее время производство рамных конструкций автомобилей класса «карт», осуществляется с применением сварных столов и приварных опор или специальных сварных вращающихся станин.

К любой технологической оснастке можно предъявить общие требования: она должна обеспечивать качество изготовления и сборки, обеспечивать малую трудоемкость, а также невысокую стоимость.

Вышеперечисленные виды технологической оснастки имеют высокую рыночную стоимость и не являются разборными.

Разработка универсальной технологической оснастки позволит изготавливать недорогие и конкурентоспособные автомобили класса «карт» в условиях единичного или мелкосерийного производства.

## **Глава 1 Анализ конструктивных особенностей малолитражного гоночного автомобиля любительской серии**

Автомобили класса «карт» любительской серии просты в управлении, благодаря отсутствию коробки передач. Устройство стандартного автомобиля класса «карт» включает в себя следующие составляющие: 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).



Рисунок 1 – Карт любительской серии

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 [28].

Основой всех болидов вне зависимости от класса является рама, к которой крепятся основные узлы: двигатель, рулевое управление, тормозная система и ходовая часть. 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 [13, 30].

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 болида.

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 % [21].

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.

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.

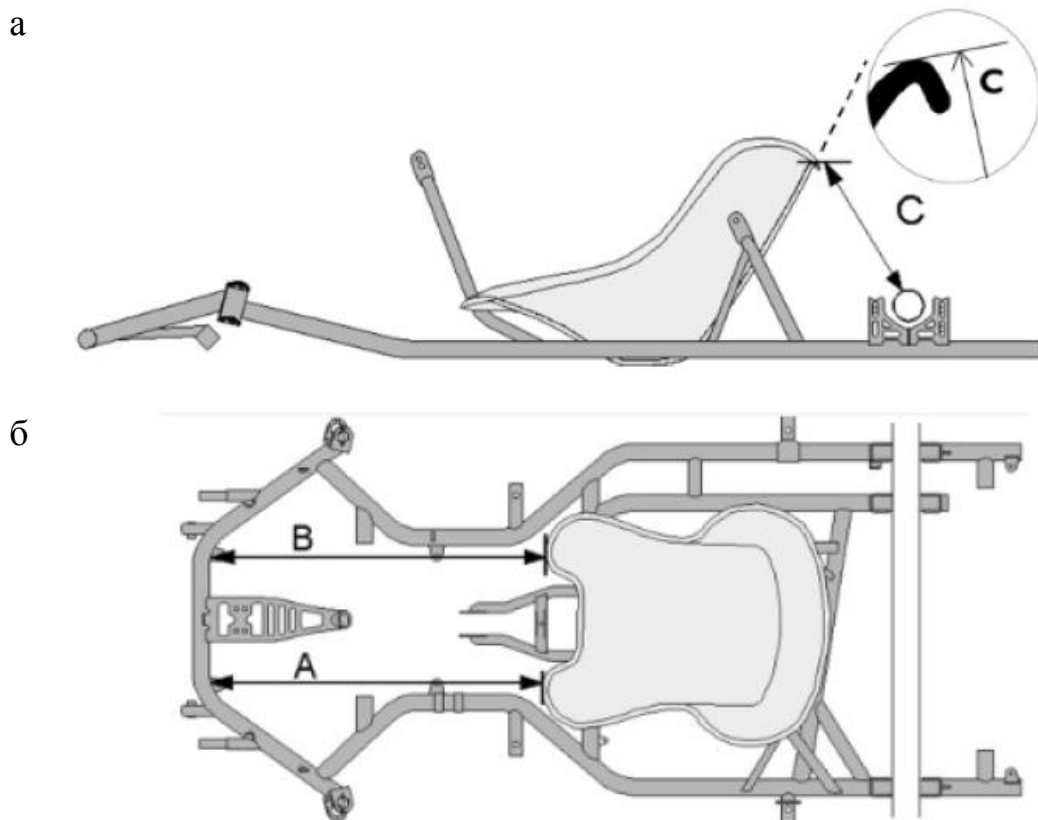


Рисунок 2 – Установка сиденья на раме: а – расстояние от верхнего края сиденья до задней оси карта; б – расстояние от передней части сиденья до передней части шасси

На основании этих данных создается CAD-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. Далее необходимо изменить конструкцию рамы таким образом, чтобы перераспределить напряженные участки с увеличением конструкционной прочности в проблемных зонах.

От правильно сконструированной рамы зависят как динамические характеристики машины, так и непосредственная безопасность пилота. Это подтверждается множеством работ [4-8, 11], 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.

Выводы по главе: разработка оптимальной конфигурации несущей системы малолитражного автомобиля класса карт является одной из основных задач, с которой сталкиваются конструкторы и должна быть выполнена прежде, чем разработка стапеля для ее сборки.

Рассмотрены конструктивные особенности малолитражных гоночных автомобилей открытого типа. В том числе – виды картинга, устройство картов, основные методы проектирования рамы карта с учетом его развесовки.

Показано, что разработка оптимальной конфигурации несущей системы малолитражного автомобиля, является необходимым шагом для разработки технологической оснастки для последующей сборки элементов этой системы.



## Глава 2 Геометрическое моделирование гоночного карта

### 2.1 Объемная модель гоночного 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 3-6 представлена 3D-модель стандартной компоновки автомобиля класса «кارت», разработанная при помощи пакета моделирования Компас 3D [27].

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.

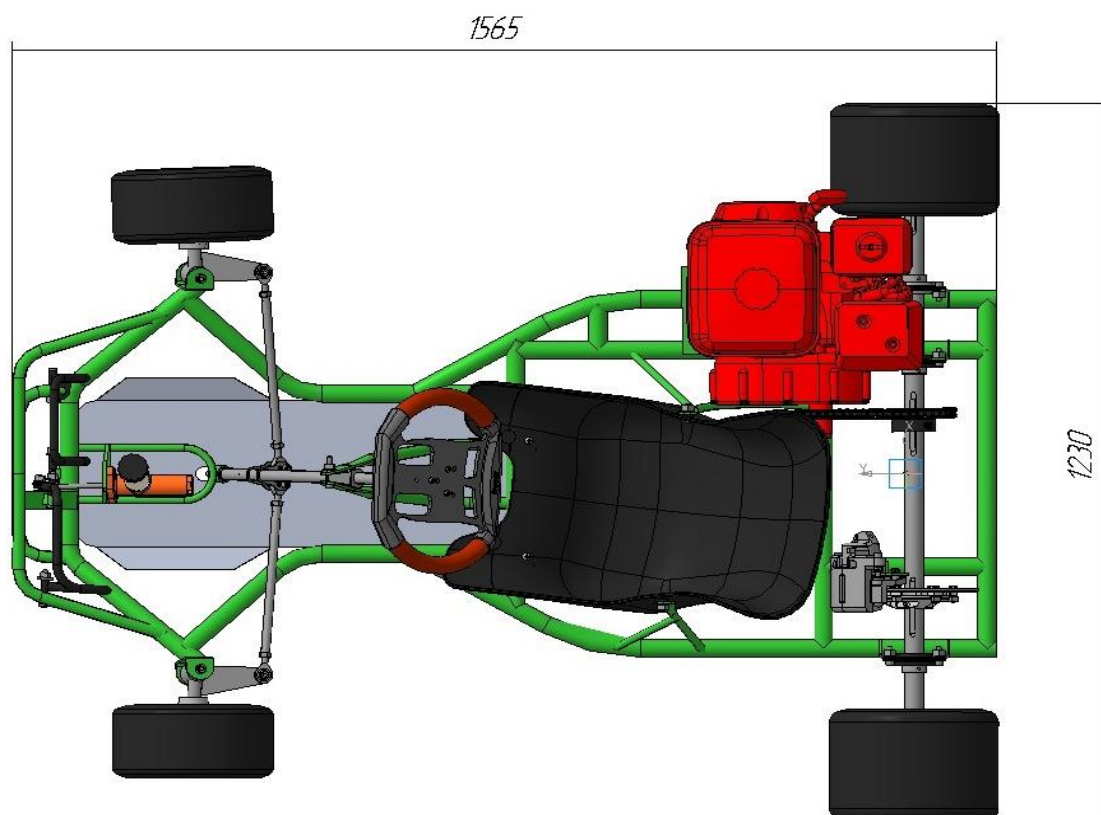


Рисунок 3 – Вид сверху на автомобиль

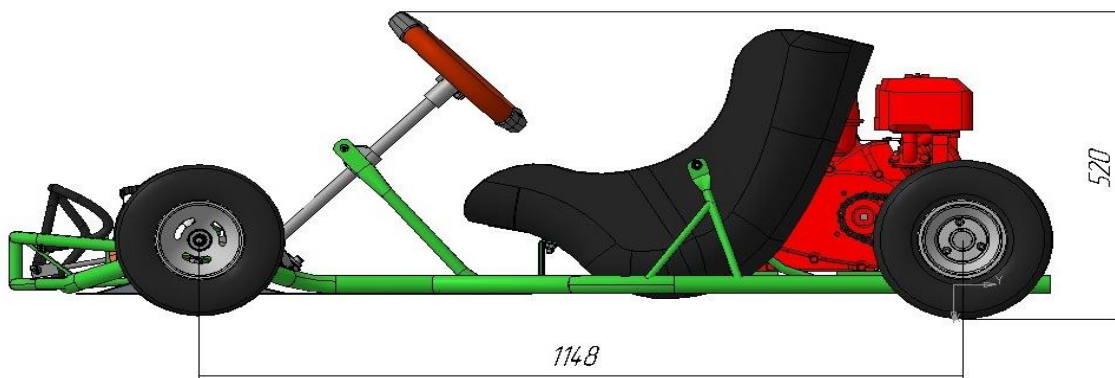


Рисунок 4 – Вид сбоку на автомобиль

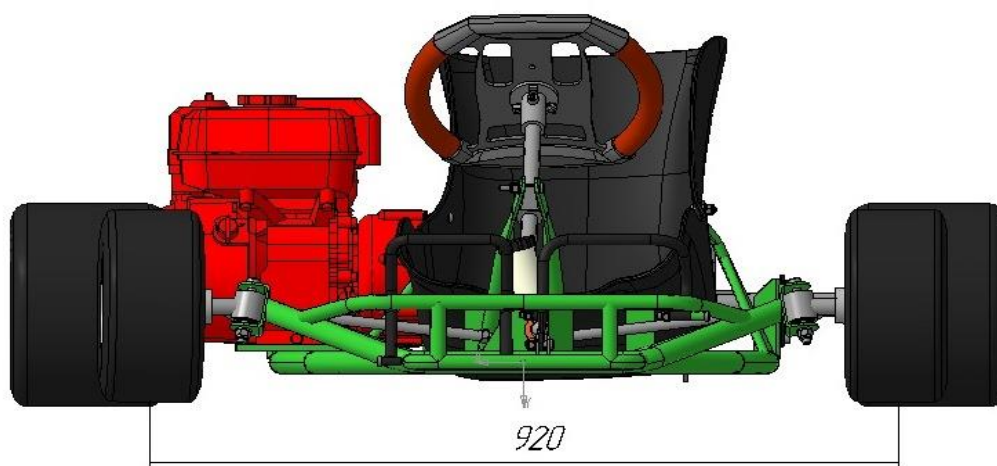


Рисунок 5 – Вид спереди на автомобиль

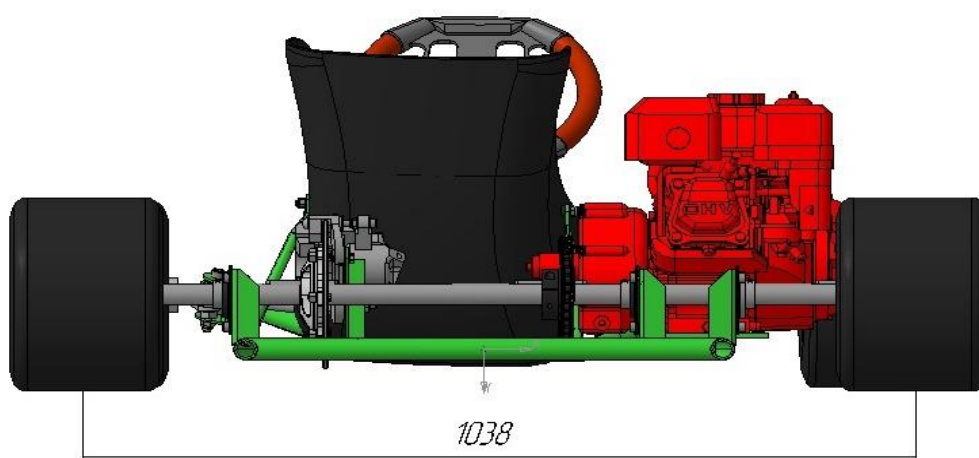


Рисунок 6 – Вид сзади на автомобиль

То есть поведение автомобиля на трассе, его управляемость во многом зависит от конструкции рамы. В настоящее время рамы таких автомобилей изготавливают из стальных труб. На рисунке 7 представлена компоновка рамы автомобиля класса «карт», которая была спроектирована с учетом дальнейшего использования в любительской серии.

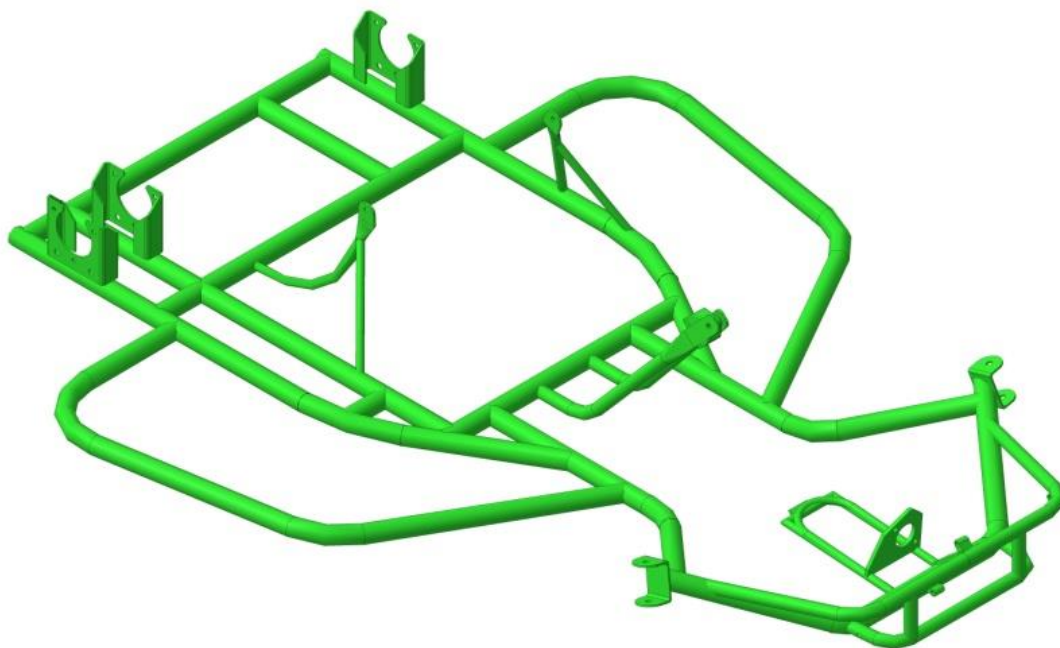


Рисунок 7 – 3D-модель каркаса рамы

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 справочнику [16] 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 Расчетная модель рамы 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 [1]. Расчетная платформа Ansys Workbench позволяет в едином информационном пространстве интегрировать различные модули программного комплекса для проведения связанного междисциплинарного анализа.

Расчет будем проводить в модуле Static Structural (рисунок 8), предназначенного для решения задач механики деформируемого твердого тела в статической постановке.

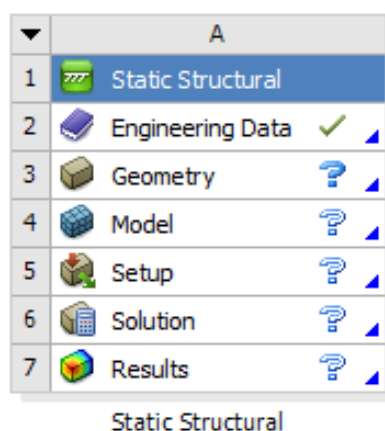


Рисунок 8 – Блок «Static Structural»

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 9.

Outline of Schematic A2: Engineering Data				
	A	B	C	E
1	Contents of Engineering Data			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			

Properties of Outline Row 3: Structural Steel				
	A	B	C	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 9 – 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 10).

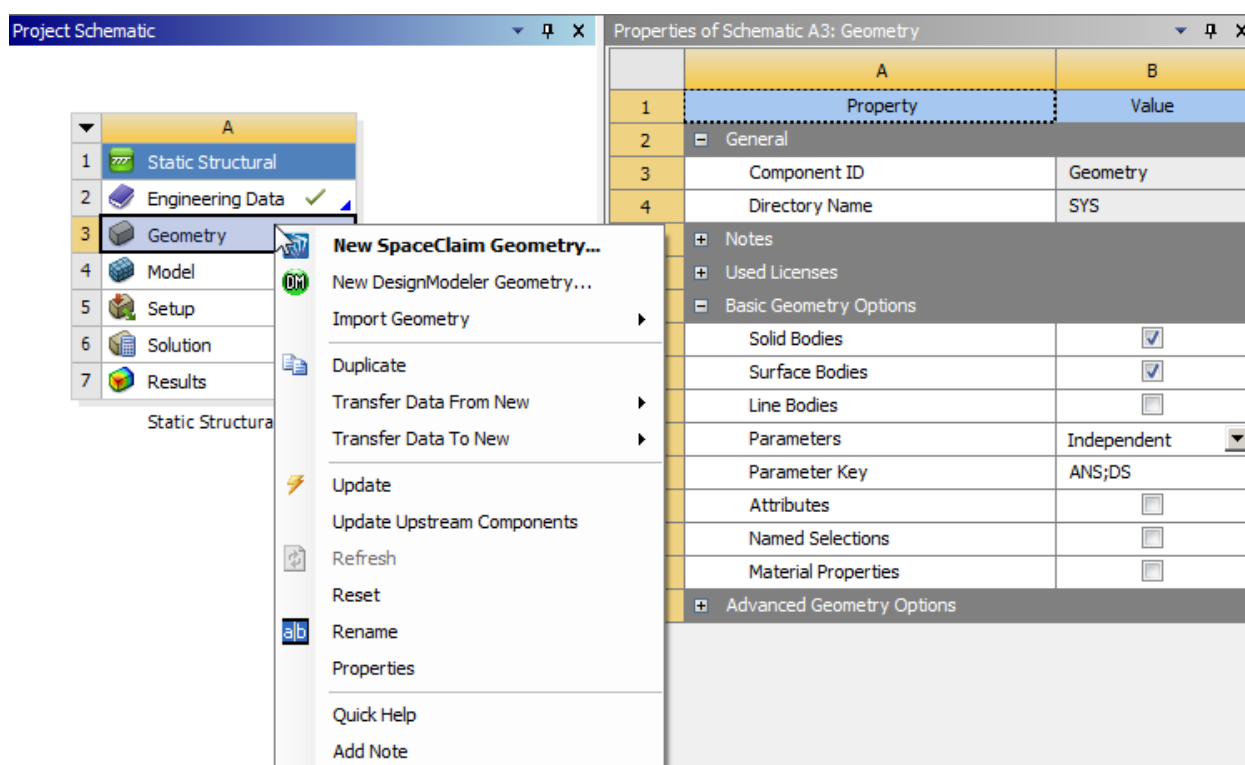


Рисунок 10 – Окно «Properties of Schematic»

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 одномерная модель необходимо активировать опцию «Line Bodies», отключенную по умолчанию.

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

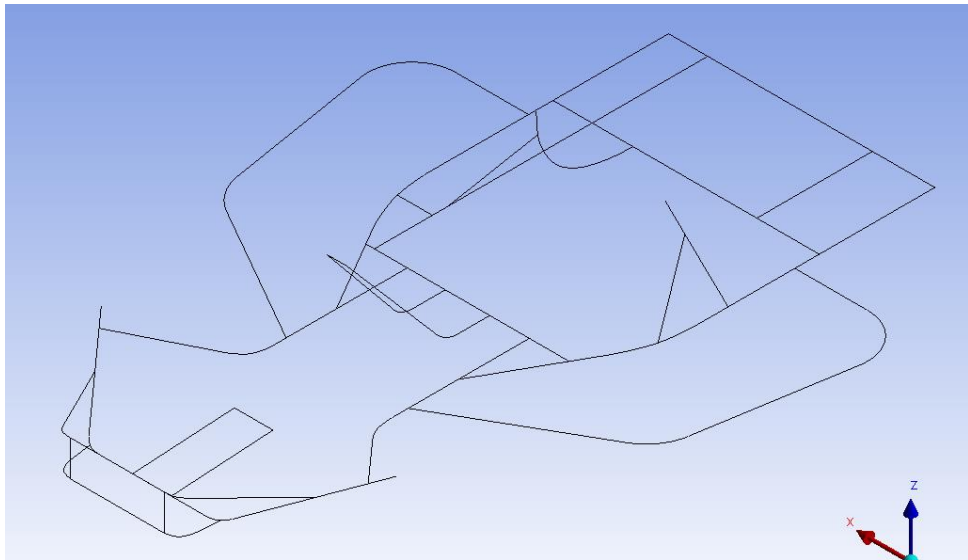


Рисунок 11 – Стержневая модель карта

Следующим шагом необходимо сгруппировать разрозненные линейные тела путем их объединения посредством булевой операции. Объединять тела нужно по сечениям реальной твердотельной модели. Так на рисунке 12 желтым цветом подсвечено объединенное трубчатое тело, диаметром 30 мм, толщина стенок которого составляет 3 мм.

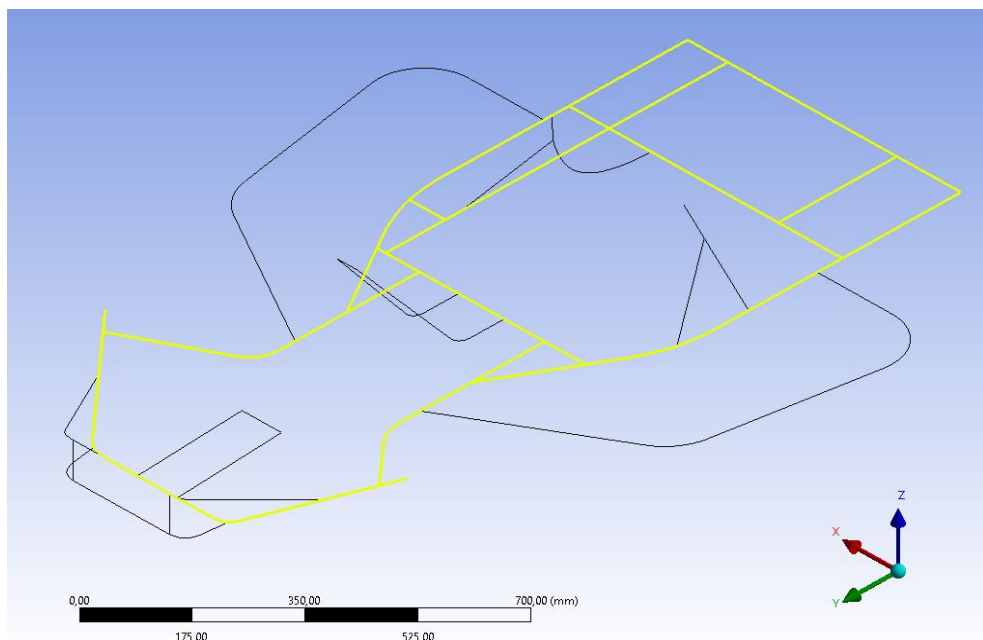


Рисунок 12 – Объединенное тело

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 13 представлен пример создания сечения диаметром 30 мм с толщиной стенки 3 мм.

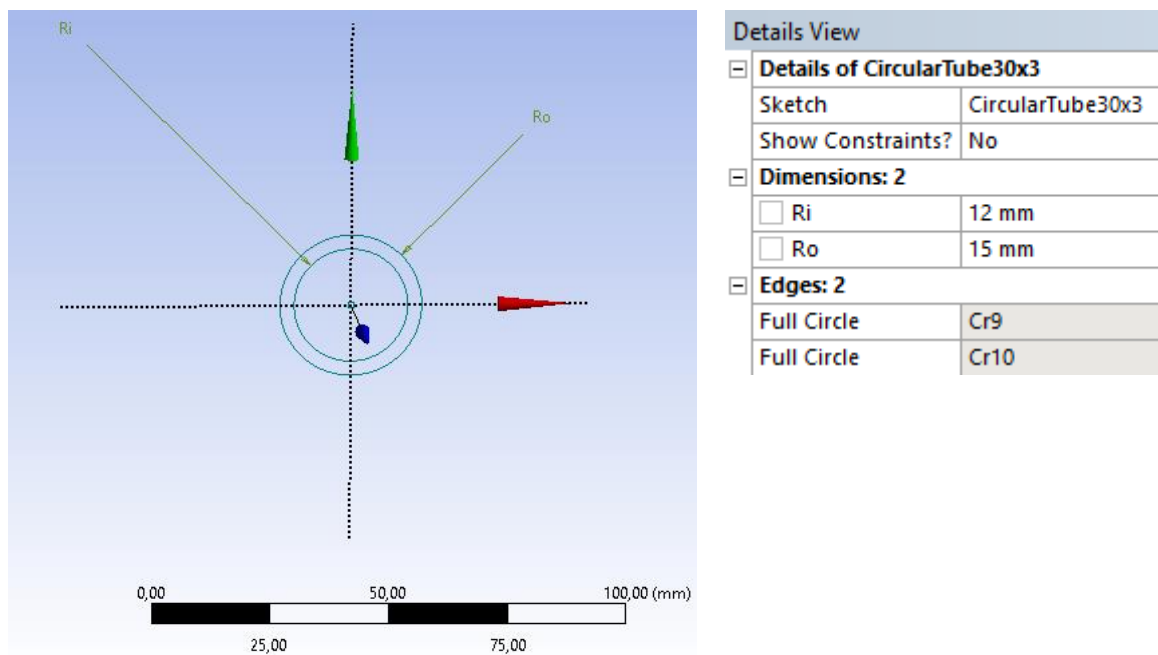


Рисунок 13 – Параметры сечения

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

На рисунке 14 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.



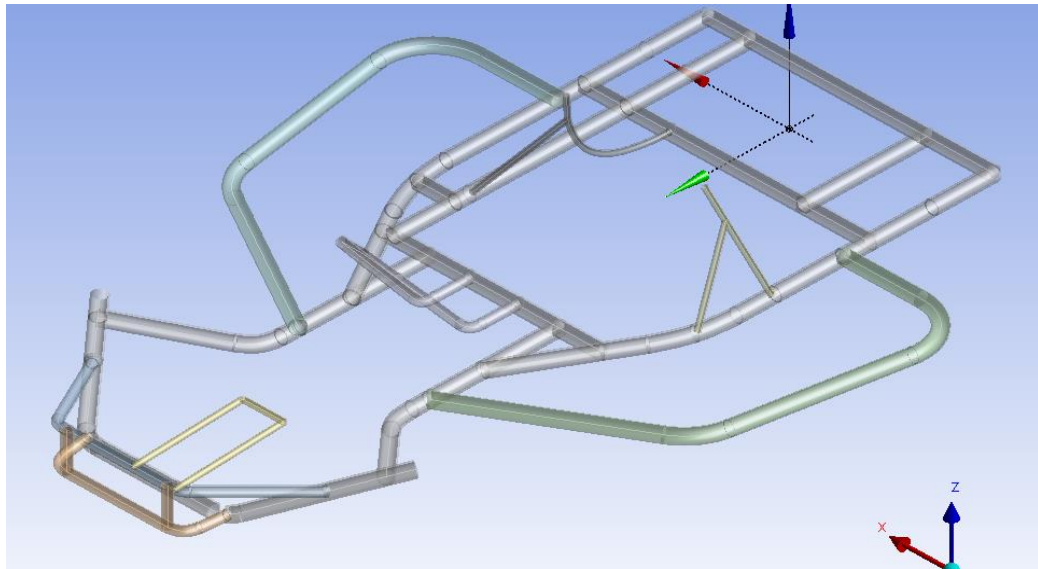


Рисунок 14 – Сечения карта

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

На рисунке 15 представлено дерево проекта, где наглядно видно какие шаги необходимо проделать до завершения моделирования.

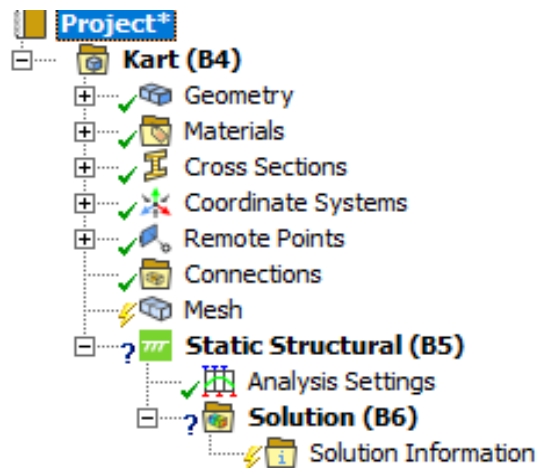


Рисунок 15 – Дерево проекта

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

Как видно по рисунку 15 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 16.

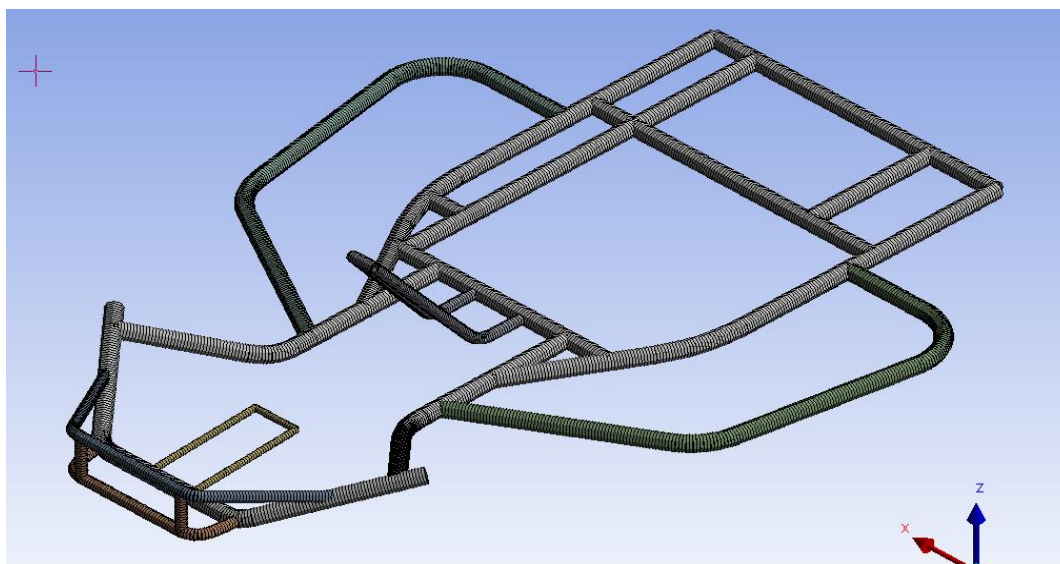


Рисунок 16 – Конечно-элементная модель

На этом создание конечно-элементной модели можно считать выполненным.

Выводы по главе: представлена разработанная 3D-модель стандартной компоновки малолитражного гоночного автомобиля любительской серии. В качестве материала рамы карта выбрана Сталь 20, как аналог конструкционной стали AISI 1020.

Представлена одномерная модель рамы карта, присвоены соответствующие сечения трубам, составляющим ее конструкцию. Проведена генерация конечно-элементной сетки.

## **Глава 3 Конструкционная прочность рамы карта любительской серии**

### **3.1 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.

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 17 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.

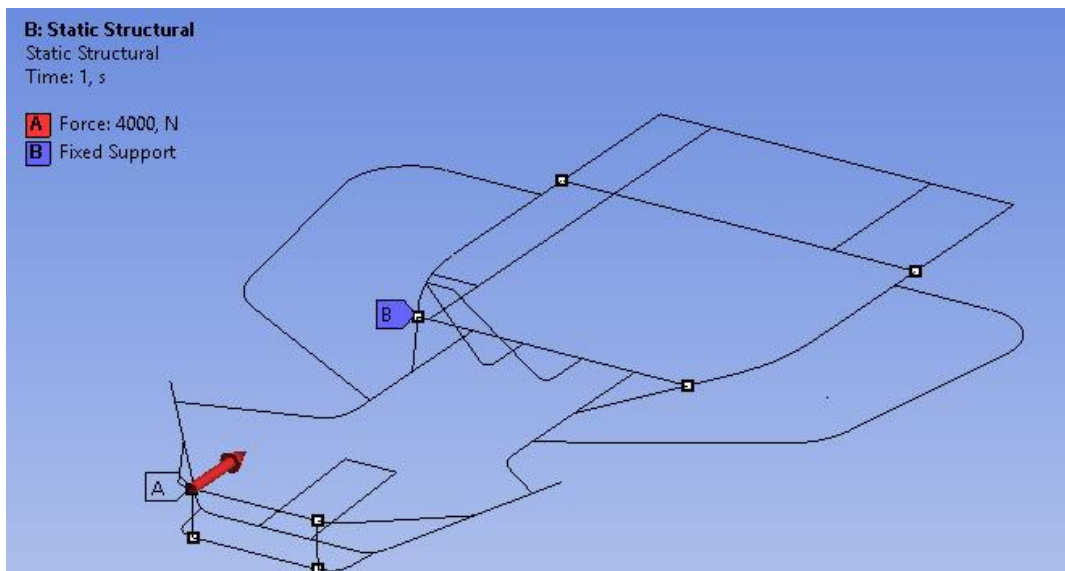


Рисунок 17 – Граничные условия и вектор приложенной нагрузки

Анализ конструкционной прочности будем проводить по общим деформациям (перемещениям) и по суммарным напряжениям, то есть сумме осевых и изгибных напряжений.

Так на рисунке 18 представлена картина деформации рамы под влиянием приложенных нагрузок.

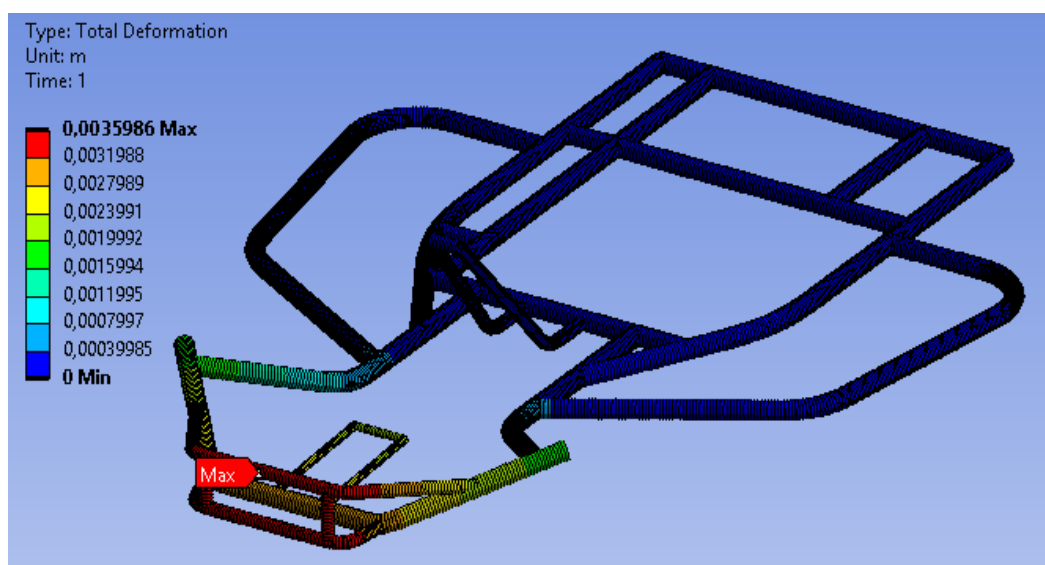


Рисунок 18 – Деформация рамы от усилий, приложенных вдоль продольной оси автомобиля

Как видно, деформация рамы составила 3,5 мм, что, с точки зрения безопасности пилота, является вполне допустимой величиной.

На рисунке 19 представлена картина распределения напряжений под влиянием приложенных нагрузок.

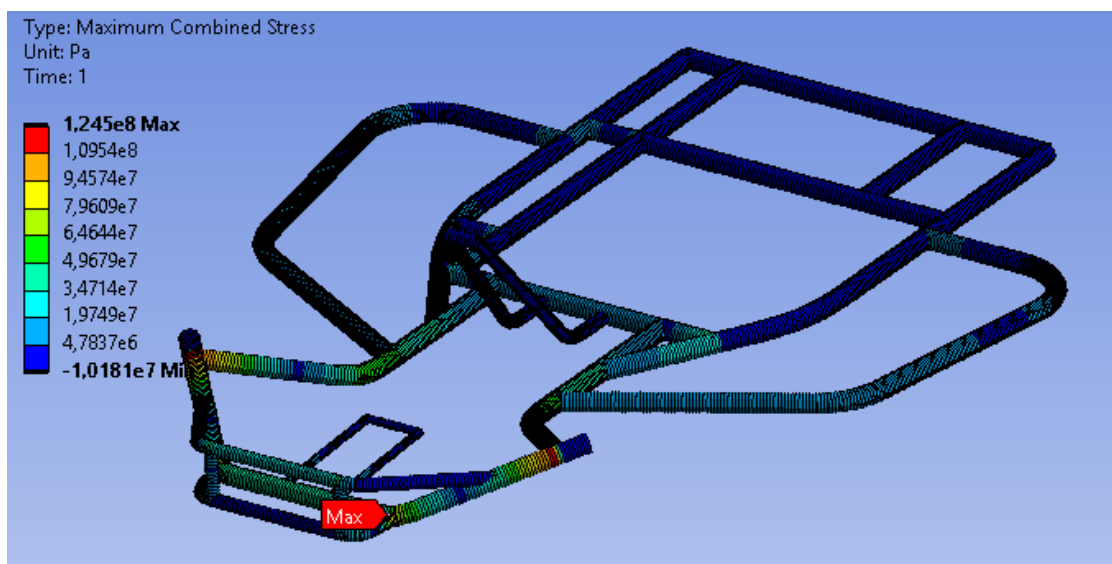


Рисунок 19 – Распределение напряжений от усилий, приложенных вдоль продольной оси автомобиля

Видно, что максимальные напряжения составили 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 карта.

На рисунке 20 представлены точки фиксации рамы при расчетах и

вектор приложения нагрузки, направленный под углом 30 градусов к оси симметрии.

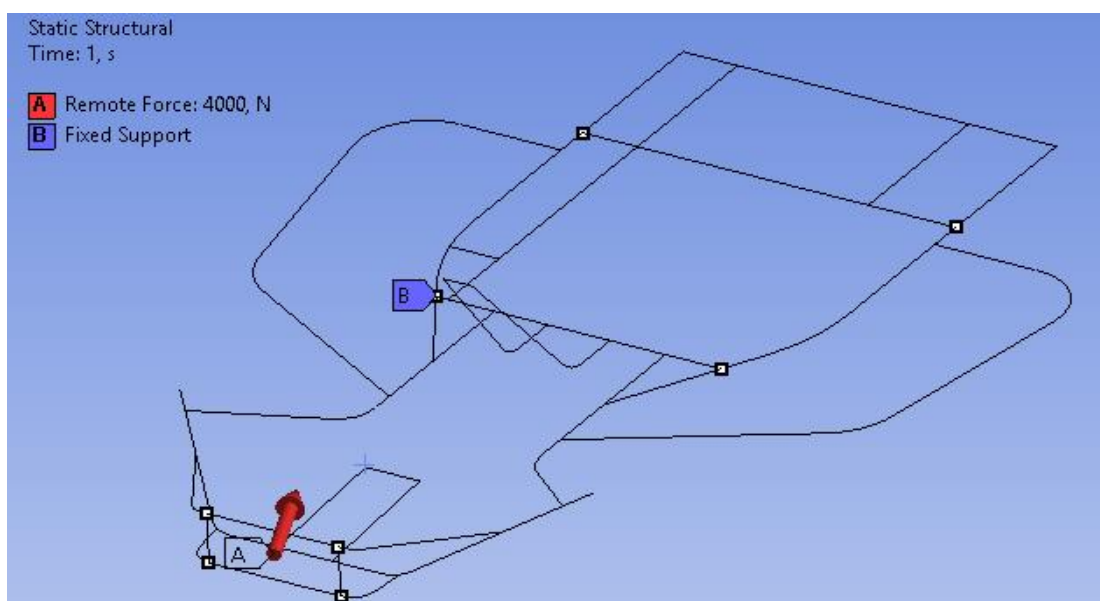


Рисунок 20 – Граничные условия и вектор приложенной нагрузки

На рисунке 21 представлена картина деформации рамы под влиянием приложенных нагрузок.

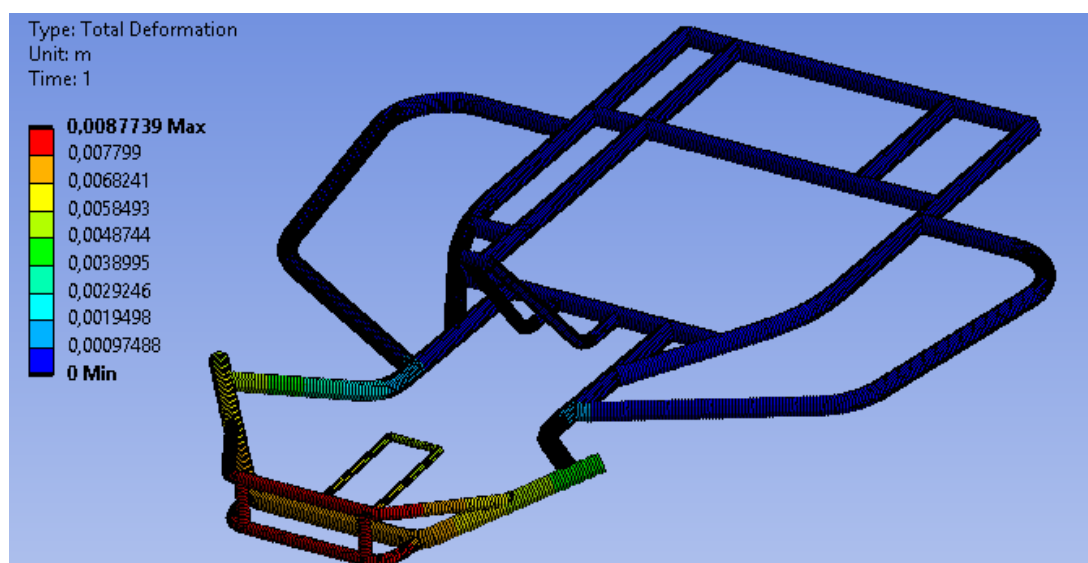


Рисунок 21 – Деформация от усилий, приложенных вне оси автомобиля

Здесь уже деформация рамы больше и составляет 8,8 мм, что также является допустимым результатом.

На рисунке 22 представлена картина распределения напряжений под влиянием приложенных нагрузок.

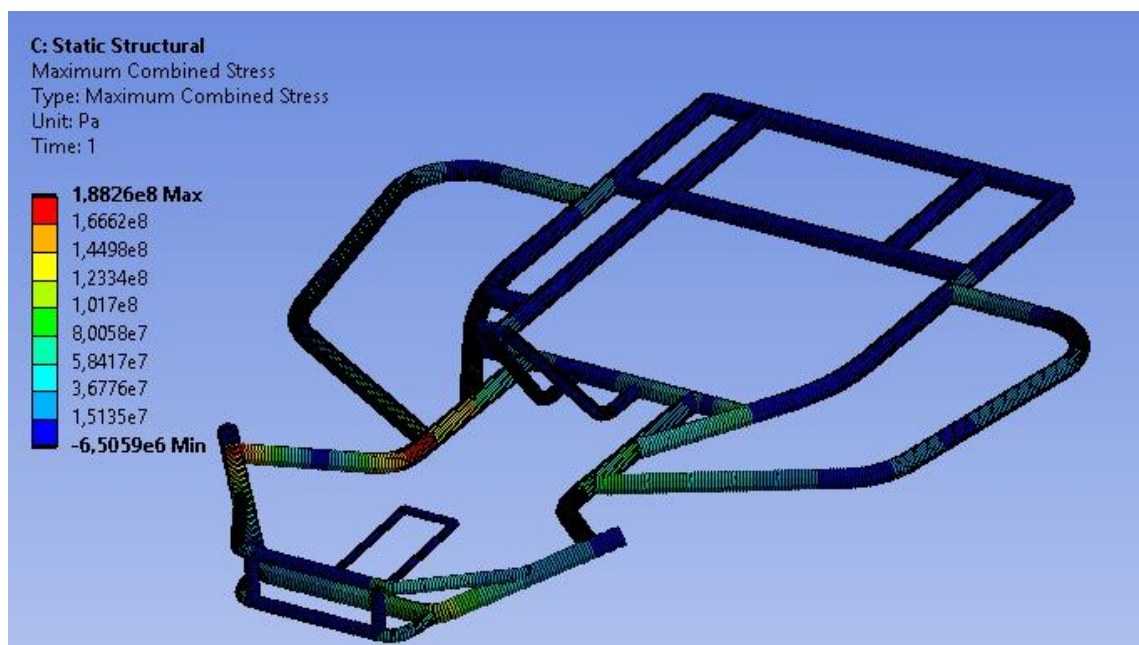


Рисунок 22 – Распределение напряжений от усилий, приложенных вне оси автомобиля

Видно, что величина максимальных деформаций находится в упругой зоне, и коэффициент запаса прочности составляет 1,3, что является достаточно неплохим результатом, учитывая характер приложенных нагрузок.

И еще одним довольно частым явлением являются боковые удары в гонках. Согласно литературным данным [4-7] величина усилий при боковом ударе, как правило, принимают в половину величины от силы фронтального удара. Тогда усилие составит – 2000 Н.

На рисунке 23 представлены граничные условия при приложении усилий на боковую дугу рамы малолитражного гоночного автомобиля.

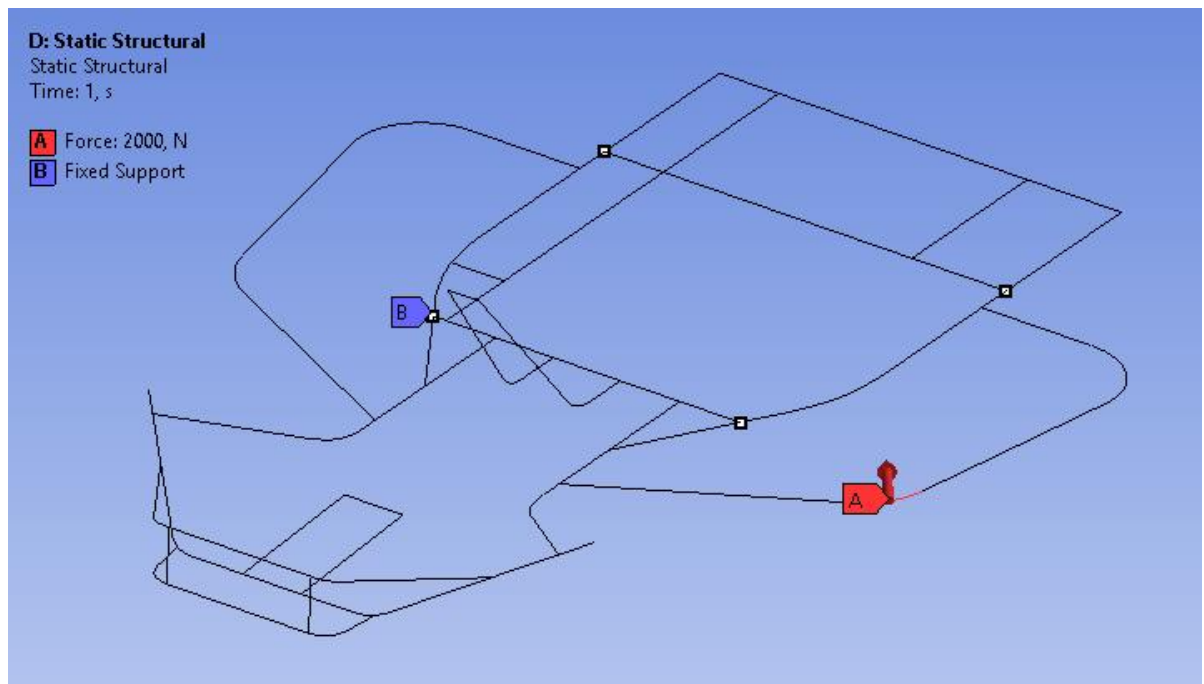


Рисунок 23 – Граничные условия и вектор приложенной нагрузки при имитации бокового удара

На рисунке 24 представлена картина деформации рамы под влиянием приложенных нагрузок при боковом ударе.

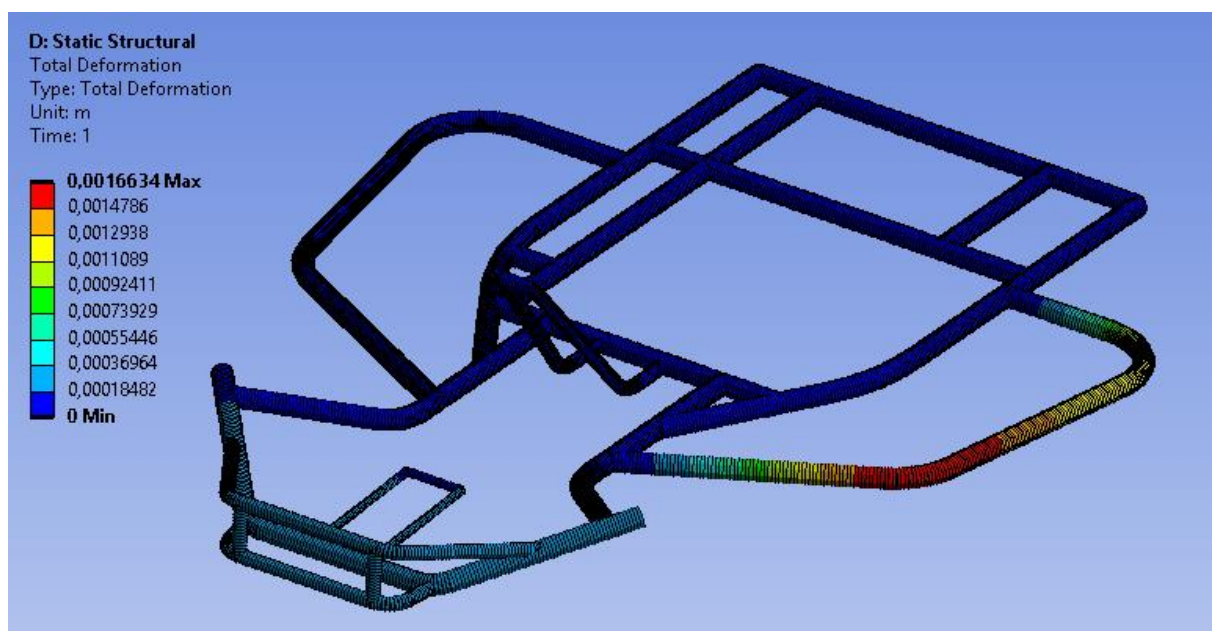


Рисунок 24 – Деформация конструкции при имитации бокового удара



Видно, что величина деформации составила всего 1,7 мм.

На рисунке 25 представлена картина распределения напряжений под влиянием приложенных нагрузок.

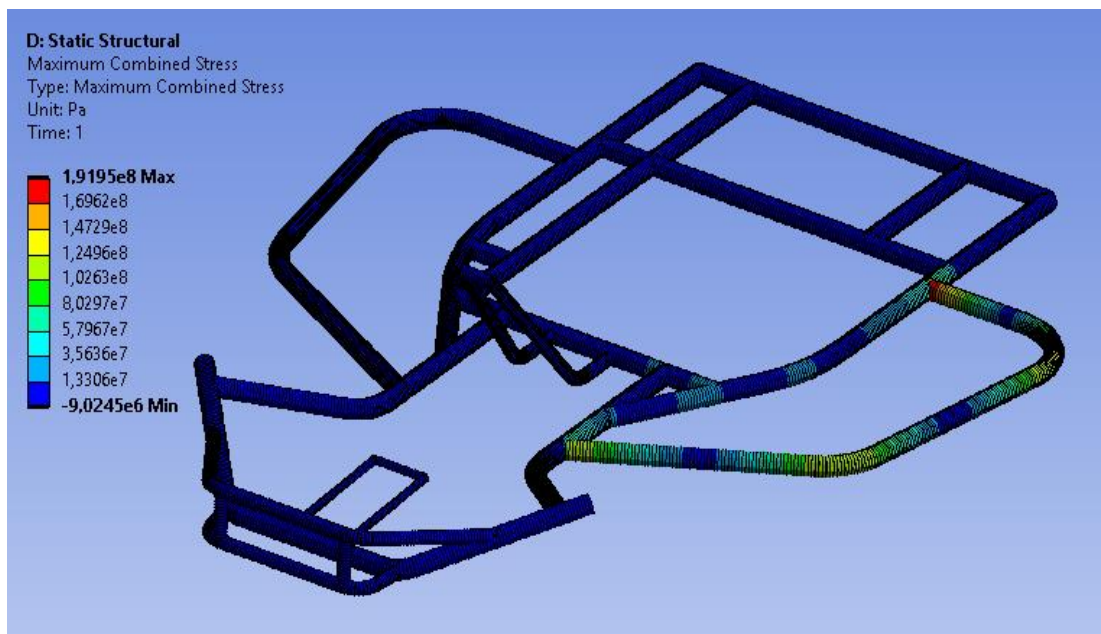


Рисунок 25 – Распределение напряжений при имитации бокового удара

Как видим, максимальные напряжения сконцентрировались в одном из мест крепления дуги к основной раме и их величина составляет почти 192 МПа, что также как и в предыдущем случае позволяет нам получить коэффициент запаса прочности 1,3.

Также наиболее часто встречаются исследования на удар сзади. Нагрузки здесь опять варьируются в зависимости от источника от 1,5g до 3g. Примем в этом случае нагрузку по максимуму, то есть такой же величины, как и при фронтальном ударе – 4000 Н.

На рисунке 26 представлены точки фиксации рамы при расчетах и вектор приложения нагрузки при анализе конструкционной прочности рамы от усилий, приложенных вдоль продольной оси автомобиля по всей длине трубы, замыкающей конструкцию сзади.

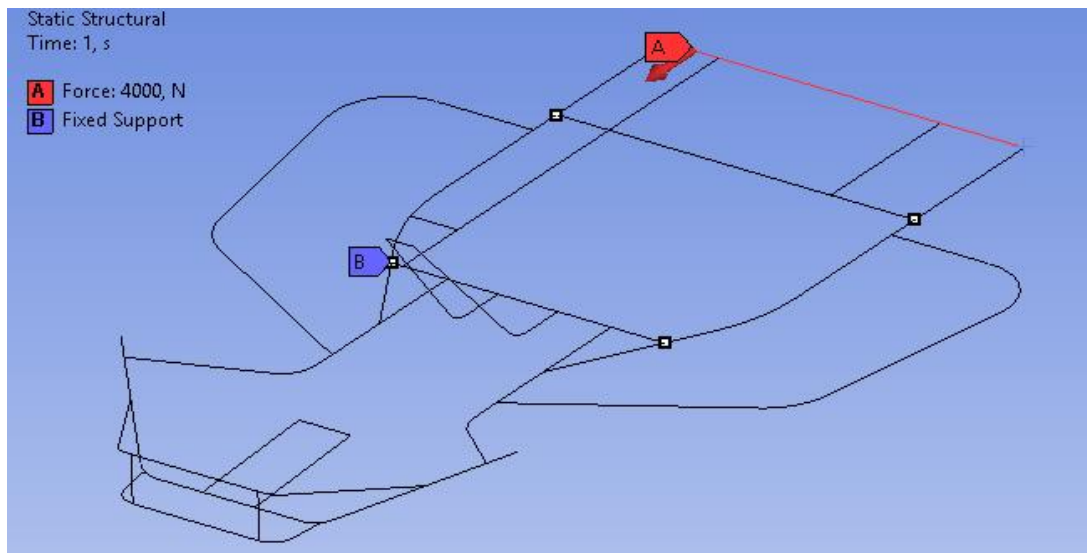


Рисунок 26 – Граничные условия и вектор приложенной нагрузки при имитации удара сзади

На рисунке 27 представлена картина деформации рамы под влиянием приложенных нагрузок при ударе сзади.

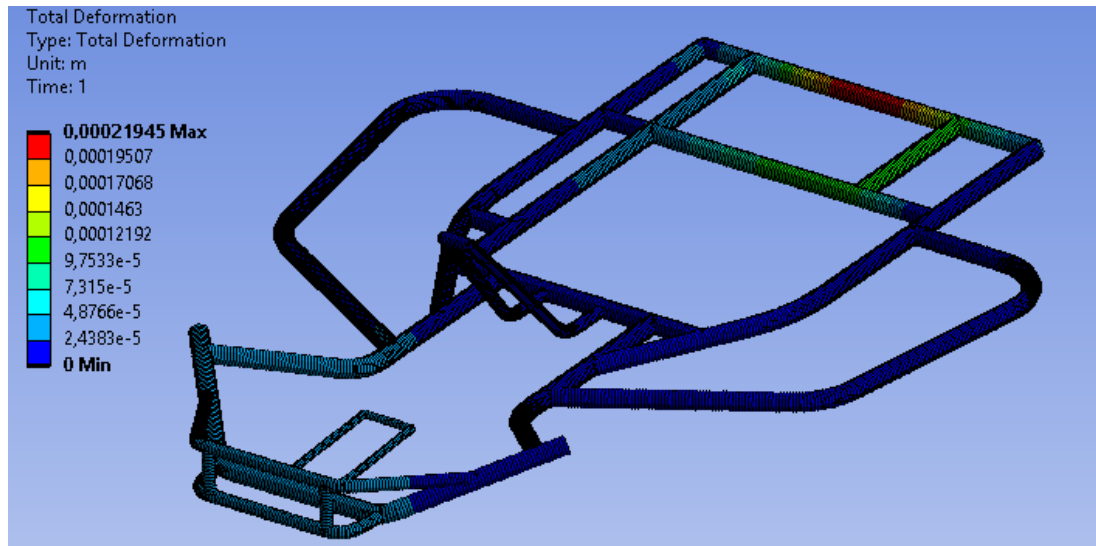


Рисунок 27 – Картина деформации конструкции рамы при имитации удара сзади

Видно, что деформация составляет всего 0,2 мм. Но как показывает практика, небольшая деформация не гарантирует итоговой конструкционной прочности.

На рисунке 28 представлена картина распределения напряжений под влиянием приложенных нагрузок.

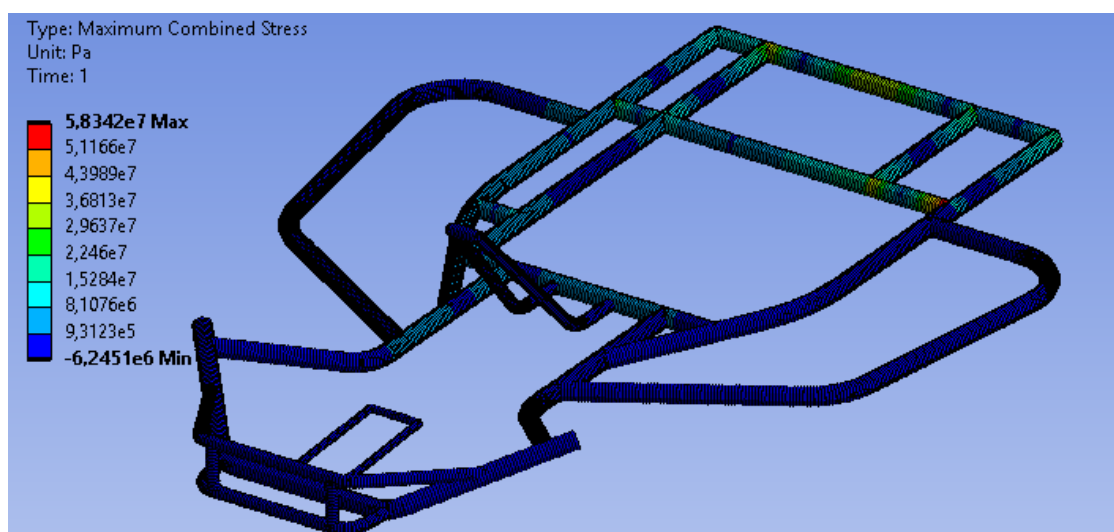


Рисунок 28 – Распределение напряжений при имитации удара сзади

Видно, что наибольшая концентрация напряжений формируется в местах крепления труб между собой, но ее величина составляет всего 58 МПа, что дает более чем четырехкратный запас прочности.

### 3.2 Анализ жесткости рамы 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 29 представлены граничные условия и вектора сил,

приложенные в местах крепления кронштейнов.

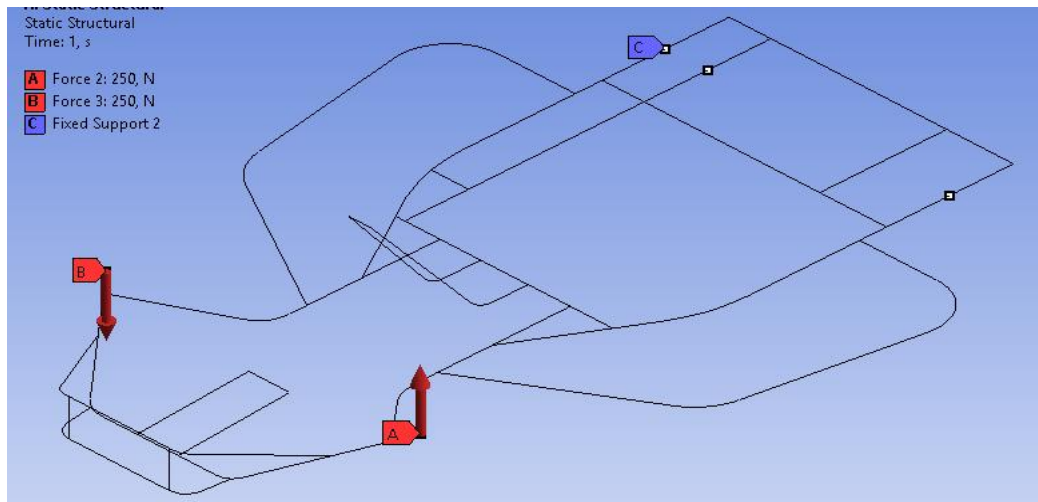


Рисунок 29 – Граничные условия и вектора сил при расчете на жесткость

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;

$\alpha$  – 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 приложения нагрузок при расчете жесткости представлена на рисунке 30.

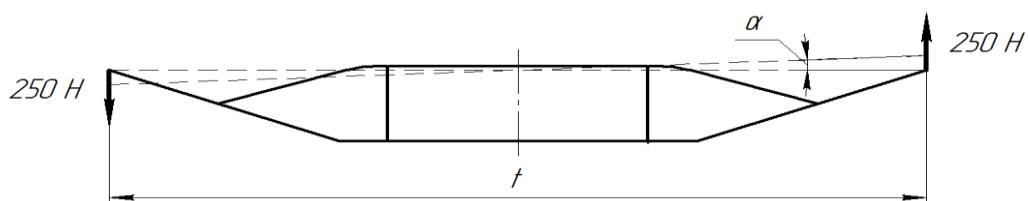


Рисунок 30 – Схема приложения нагрузок

На рисунке 31 представлены направления осей системы координат.

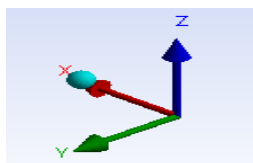


Рисунок 31 – Система координат

На рисунке 32 представлена картина общих перемещений по всем трем координатным осям, а на рисунках 33-34 картина перемещений по осям Z и X соответственно.

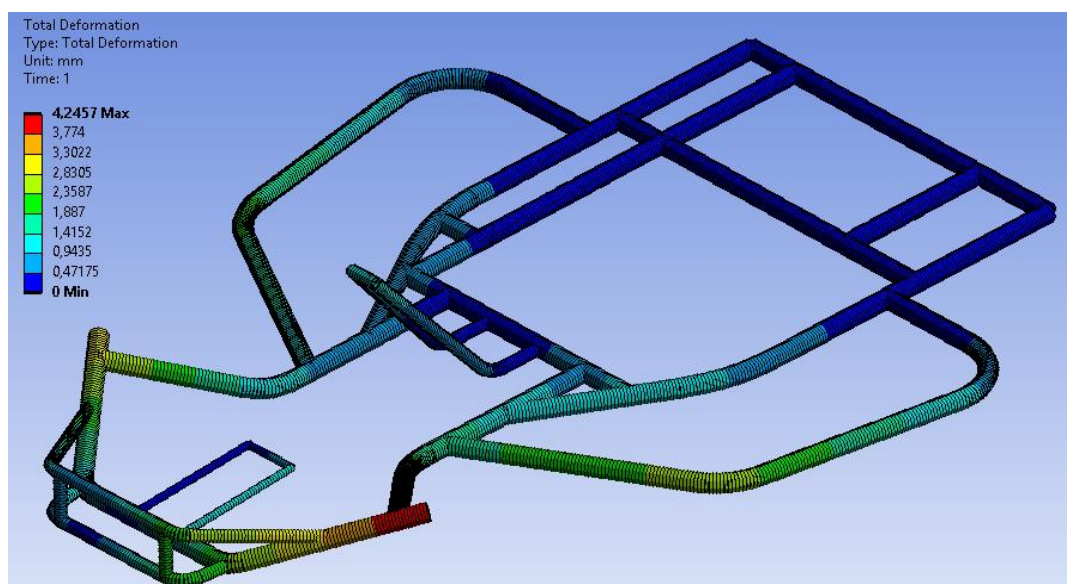


Рисунок 32 – Общие перемещения при расчете на жесткость

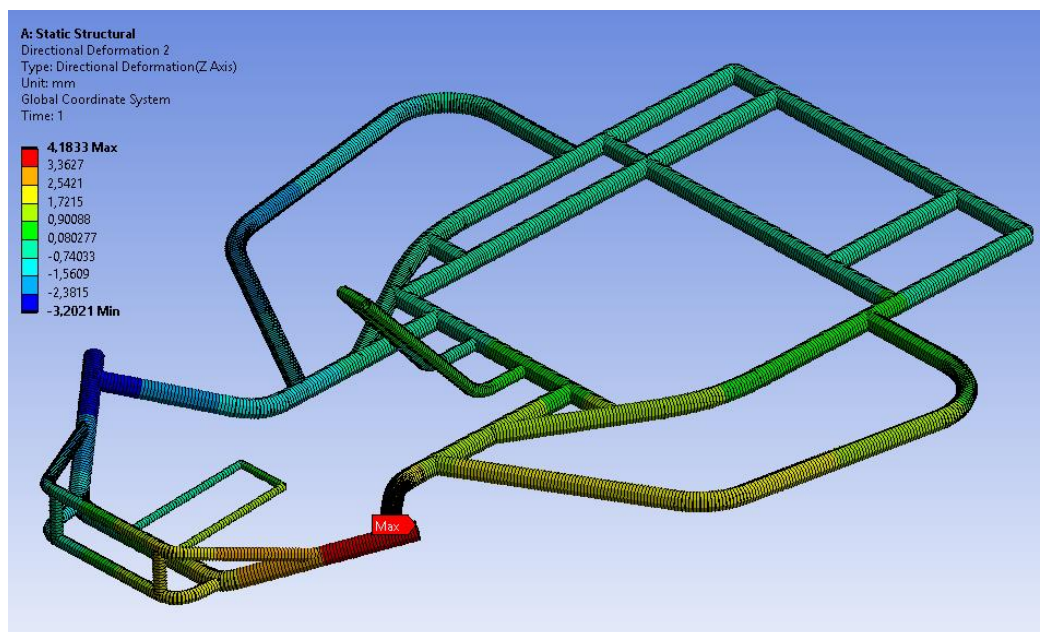


Рисунок 33 – Перемещения вдоль направления оси Z

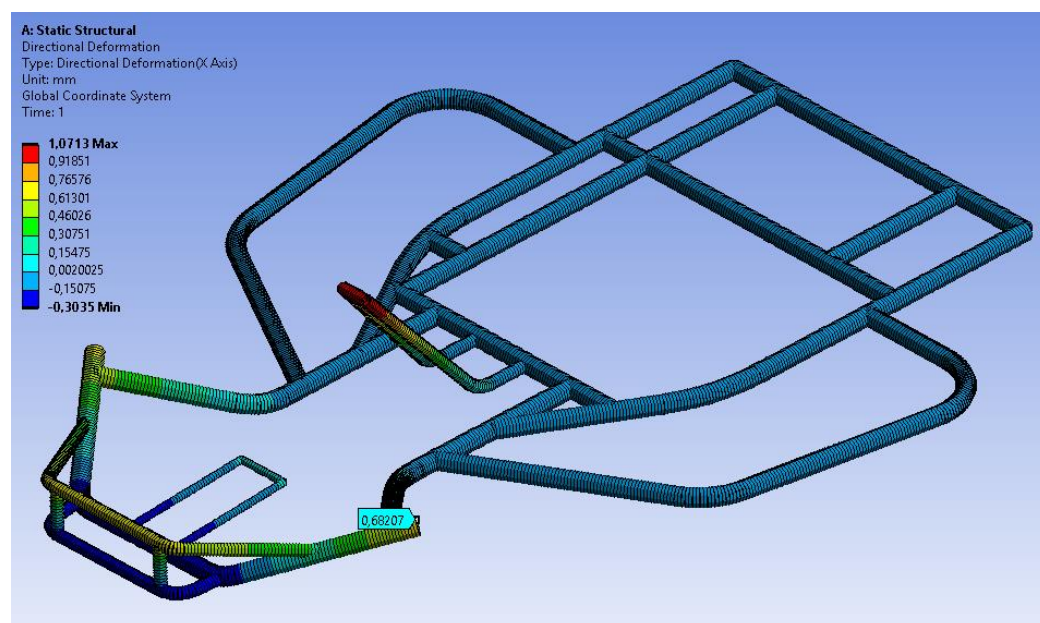


Рисунок 34 – Перемещения вдоль направления оси X

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 30 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 более чем достаточной для рам подобного типа.

Выводы по главе: проведенный анализ рамы на кручение позволил выявить величину жесткости в 220 Н·м/град, что для малолитражного гоночного автомобиля любительской серии является оптимальной величиной.

Выполнен анализ конструкционной прочности разработанной рамы.

Запас прочности при анализе деформации конструкции от усилий, приложенных вдоль продольной оси автомобиля составил 2 единицы, а от усилий, приложенных вне оси автомобиля – 1,3 единицы.

Запас прочности при имитации бокового удара составил также 1,3 единицы.

Имитация удара сзади показала более чем четырехкратный запас прочности.

Таким образом, предложенная компоновка рамы малолитражного автомобиля с точки зрения оптимальной жесткости и необходимых прочностных характеристик доказала свою конкурентоспособность.

## Глава 4 Разработка технологической оснастки

### 4.1 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, 31]. 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 35, а на рисунке 36 – совместно с рамой малолитражного гоночного автомобиля.

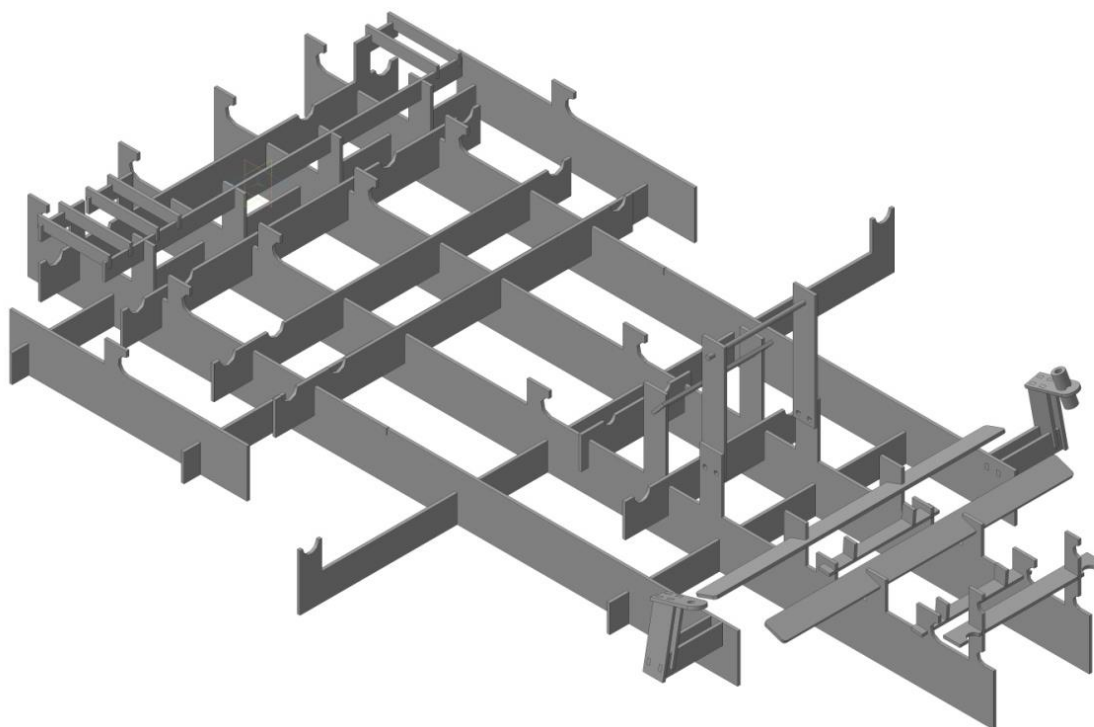


Рисунок 35 – Стапель универсальный



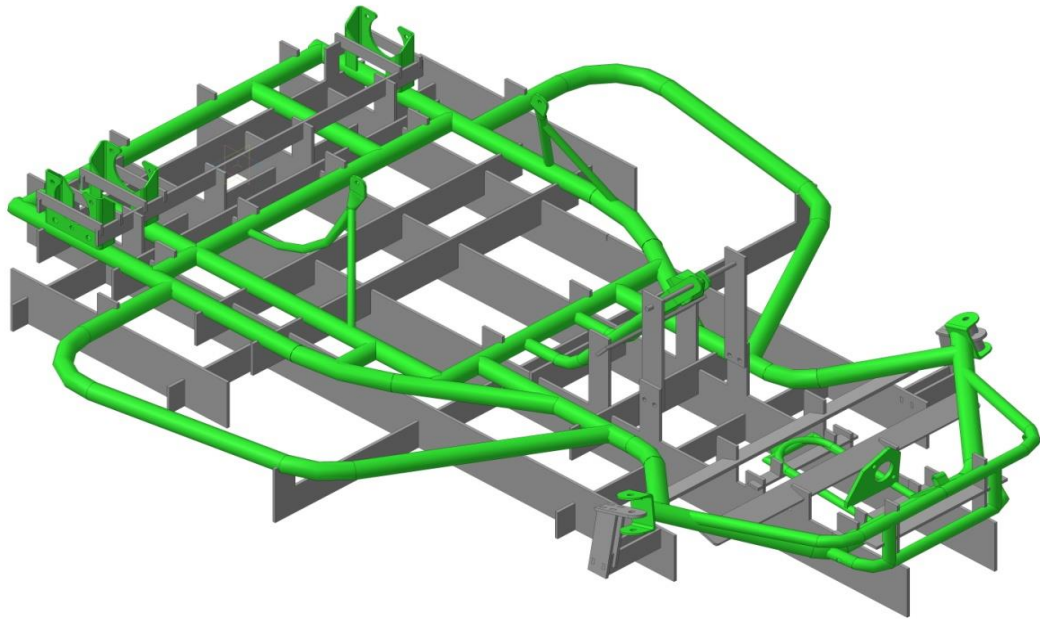


Рисунок 36 – Стапель универсальный совместно с рамой карта

Как показано на рисунках 35-36, 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.

#### **4.2 Анализ технологичности конструкции 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 (рисунок 35) 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.

Материалом стапеля является конструкционная углеродистая сталь обыкновенного качества Ст. 3 [26]. 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 [24].

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.

Стапель изготавливается из листового проката одной толщины, что позволяет говорить об унификации изделия.

Спроектированная конструкция стапеля позволяет вести независимую сборку-разборку и, в каких-то моментах, еще и проводить независимые испытания прочности и жесткости элементов конструкции.

Все разъемные соединения обеспечивают инструментальную доступность и взаимозаменяемость соединительных элементов.

Изготовление как опорных, так и фиксирующих пластин стапеля из листового проката обеспечивает необходимое удобство установки изделия при сборке.

### **4.3 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, 15].

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 [2, 9, 14, 22, 25] для выяснения численных значений было проведено исследование, заключающееся в сварке отдельных элементов труб (рисунок 37), параметры которых полностью соответствовали трубам, используемым при изготовлении рамы карта.



Рисунок 37 – Обрезки труб для эксперимента

Как видно, элементы труб контактируют между собой под разными углами, что соответствует углам соединения труб рамы карта.

Для сварки использовали полуавтомат GROVERS MIG 250T 4R, технические характеристики которого, указаны в таблице 1.

Таблица 1 – Технические характеристики 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

Полуавтомат GROVERS MIG 250T – это принципиально новая модель профессионального инверторного полуавтомата для сварки в среде защитных газов (MIG\MAG) предназначена для сварки нержавеющей, углеродистых и низкоуглеродистых сталей [18, 19].

Для измерения температуры сварочного шва использовали инфракрасный термометр (пирометр) DT-8835.

Особенности пирометра DT-8835 [3]:

- термopара К-типа;
- оптическое разрешение 30:1;
- температура: от минус 50°C до 1050°C;
- подсветка дисплея;
- лазерный целеуказатель;
- автоматическое выключение питания;
- автоматическое удержание показаний AUTO HOLD после отпущания кнопки измерений;
- запись максимальных, минимальных, усредненных и дифференциальных значений;
- звуковая сигнализация при превышении максимального и минимального порога;
- режим непрерывного измерения;
- регулируемый коэффициент излучения измеряемых поверхностей 0,1-1,0;
- память на 20 значений.

При увеличении расстояния до исследуемого объекта, увеличивается размер пятна прибора – области, на которой усредненно измеряется температура.

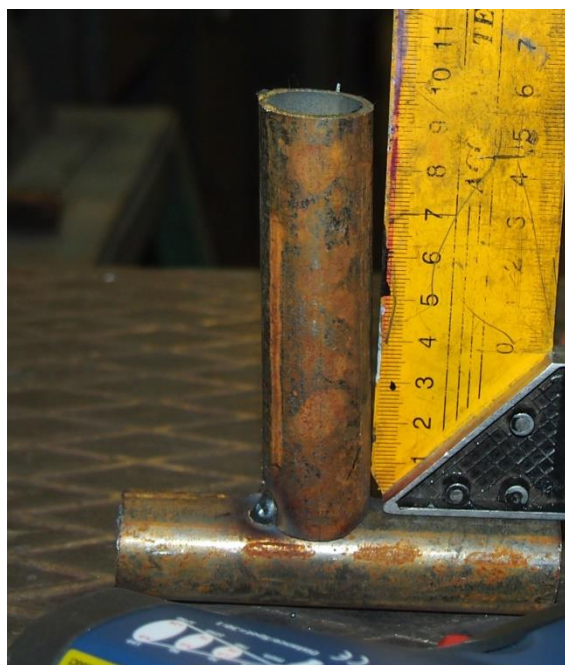
Перед непосредственно накладыванием сварочного шва, детали между собой прихватывались, как это собственно происходит и при сварке рамы карта [12, 17].

На рисунке 38 показан подготовленный для эксперимента образец Т-образного соединения труб и используемый пирометр.



Рисунок 38 – Объекты эксперимента

После схватывания элементов труб между собой происходил обмер углов и перпендикулярности элементов со всех сторон (рисунок 39).



а



б

Рисунок 39 – Обмер предварительно схваченных образцов: а – пример Т-образного соединения, б – пример углового соединения

Далее накладывали сварочный шов (рисунок 40) с одной из сторон сопряжения труб.



а

б

Рисунок 40 – Наложный шов: а – Т-образное 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.

С учетом вышепредставленных данных был определен изгибающий момент, возникающий в шве при сварке. Максимальная величина момента составила 490 Н·м.

Теперь у нас имеются все необходимые данные для проведения деформационного расчета конструкции стапеля. Расчет будем проводить методом конечно-элементного анализа. Конечно-элементное моделирование мы выполняли в программном пакете ANSYS Mechanical.

Моделирование выполняли в оболочке Ansys Workbench.

В первую очередь необходимо подготовить геометрию под конечно-элементный анализ. Выполняем подготовку в соответствующем разделе Geometry (рисунок 41). Данный раздел позволяет исправить все недоработки, выявить плохие грани, недопустимые зазоры и пересечение конструктивных элементов, исправить перекрывающиеся объекты.

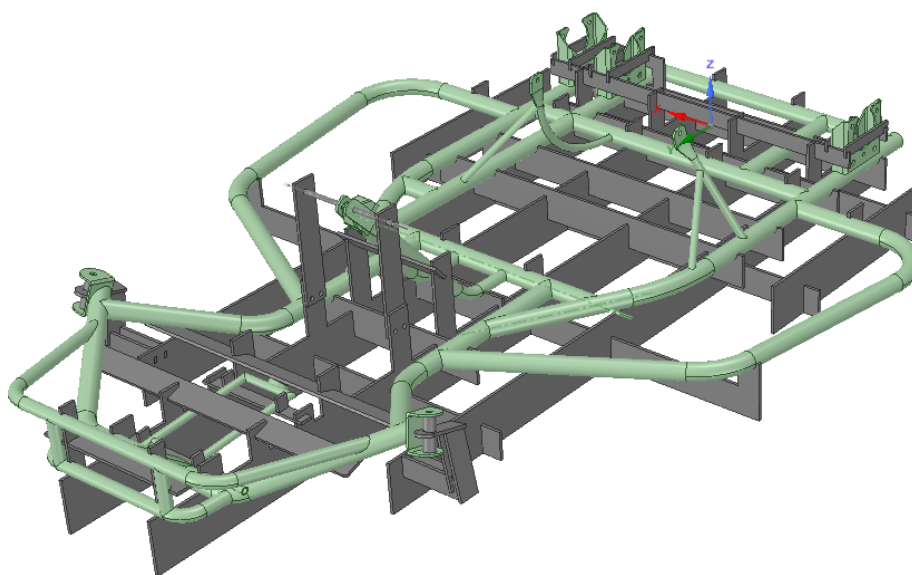
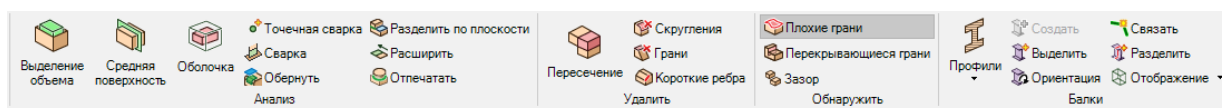


Рисунок 41 – Подготовка геометрии



После подготовки геометрии под конечно-элементный анализ, необходимо задать физические и механические свойства материалов стапеля и рамы карта. В разделе Engineering Data, позволяющем описать свойства используемых материалов, введем вручную два материала – Сталь 20 и Ст.3. Данные материалы создавали на базе стандартной конструкционной стали из библиотеки программы. Так на рисунке 42 представлены 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		<input type="checkbox"/>	
6	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion			<input type="checkbox"/>	
7	Coefficient of Thermal Expansion	Tabular			
10	Zero-Thermal-Strain Reference Temperature	22	C		<input type="checkbox"/>
11	Isotropic Elasticity	Tabular		<input type="checkbox"/>	
12	Derive from	Young's Modul...			
13	Young's Modulus: Scale	1			<input type="checkbox"/>
14	Young's Modulus: Offset	0	Pa		<input type="checkbox"/>
15	Poisson's Ratio: Scale	1			<input type="checkbox"/>
16	Poisson's Ratio: Offset	0			<input type="checkbox"/>
17	Bulk Modulus: Scale	1			<input type="checkbox"/>
18	Bulk Modulus: Offset	0	Pa		<input type="checkbox"/>
19	Shear Modulus: Scale	1			<input type="checkbox"/>
20	Shear Modulus: Offset	0	Pa		<input type="checkbox"/>
21	Strain-Life Parameters			<input type="checkbox"/>	
29	S-N Curve	Tabular		<input type="checkbox"/>	
33	Tensile Yield Strength	2,5E+08	Pa		<input type="checkbox"/>
34	Compressive Yield Strength	2,5E+08	Pa		<input type="checkbox"/>
35	Tensile Ultimate Strength	4,6E+08	Pa		<input type="checkbox"/>
36	Compressive Ultimate Strength	0	Pa		<input type="checkbox"/>

Рисунок 42 – Перечень заданных свойств Ст.3

Как уже было сказано ранее, при высоких температурах изменяются физические свойства материалов.

Этот факт необходимо было учесть и при проведении инженерного анализа, поэтому были введены зависимости изменения плотности, коэффициента термического расширения, модуля Юнга, коэффициента Пуассона, теплопроводности и удельной теплоемкости от температуры.

Соответствующие графические зависимости, взятые из источника [24], были введены в раздел Engineering Data. Для стали стапеля (Ст.3) данные зависимости представлены на рисунках 43-47.

Анализ распределения температур будем выполнять в модуле Steady-State Thermal (рисунок 48), позволяющего анализировать температурные поля на основе решения стационарного уравнения теплопроводности.

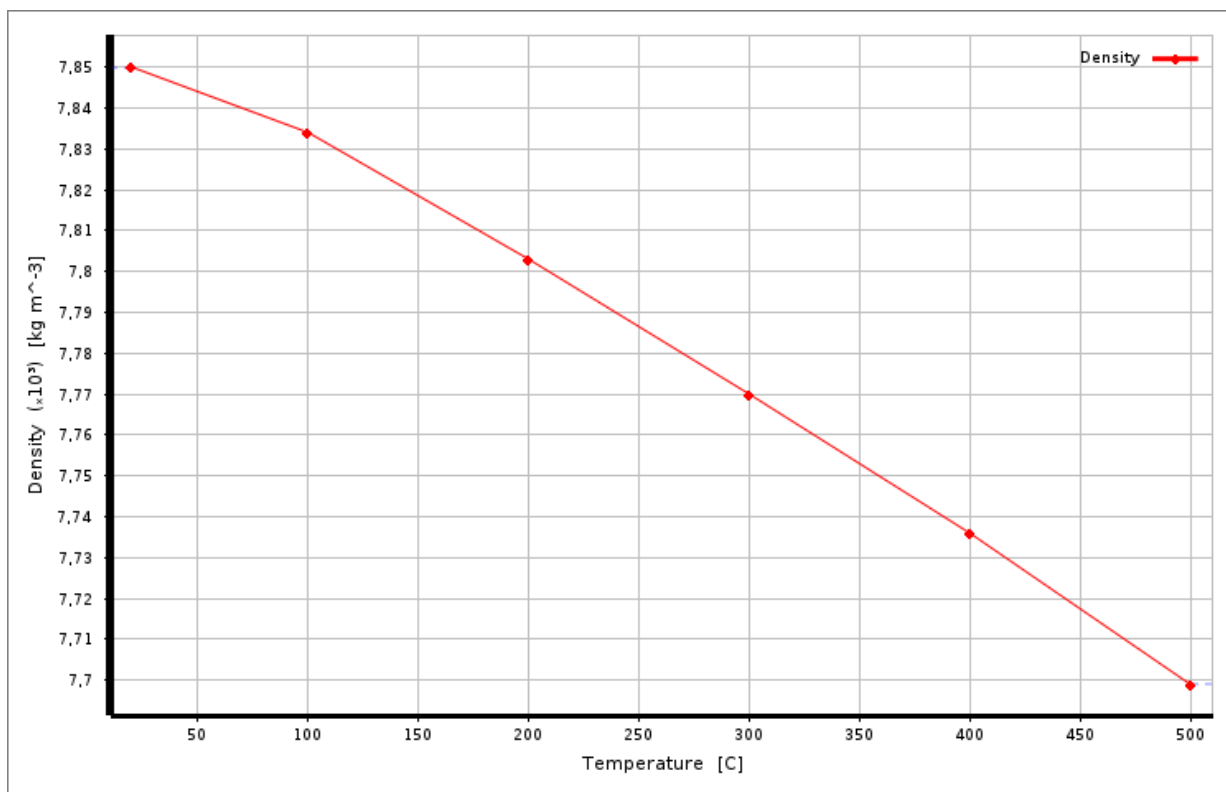


Рисунок 43 – Зависимость плотности от температуры

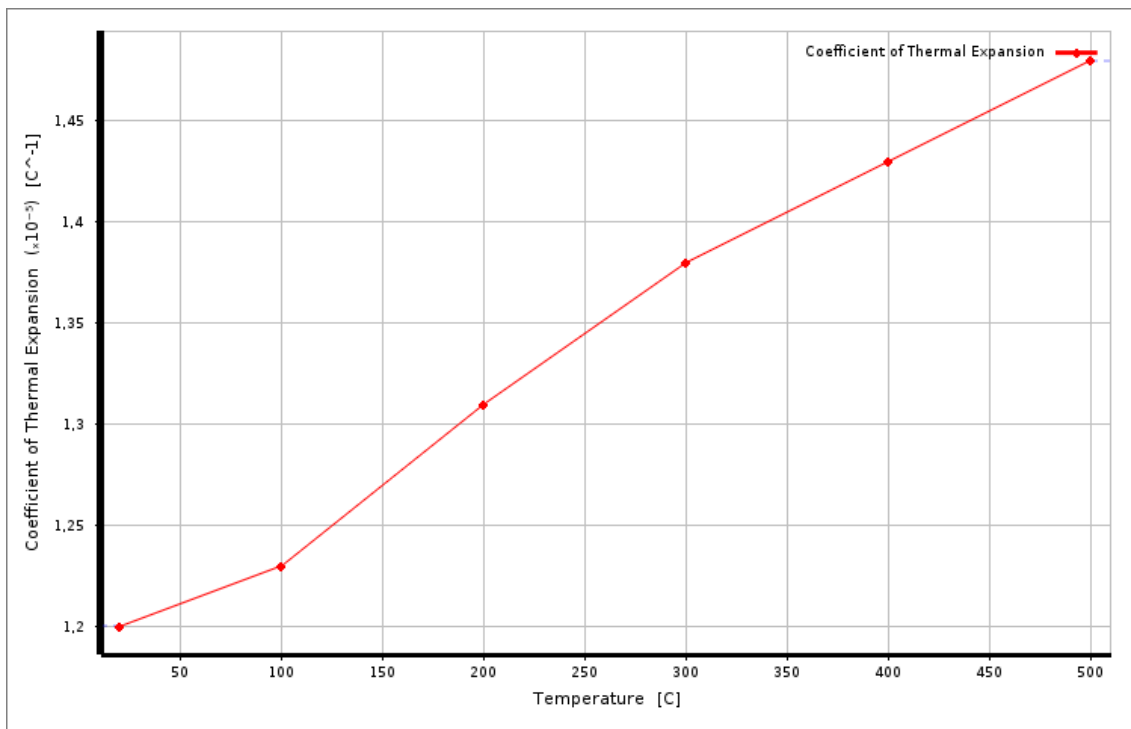


Рисунок 44 – Зависимость коэффициента термического расширения от температуры

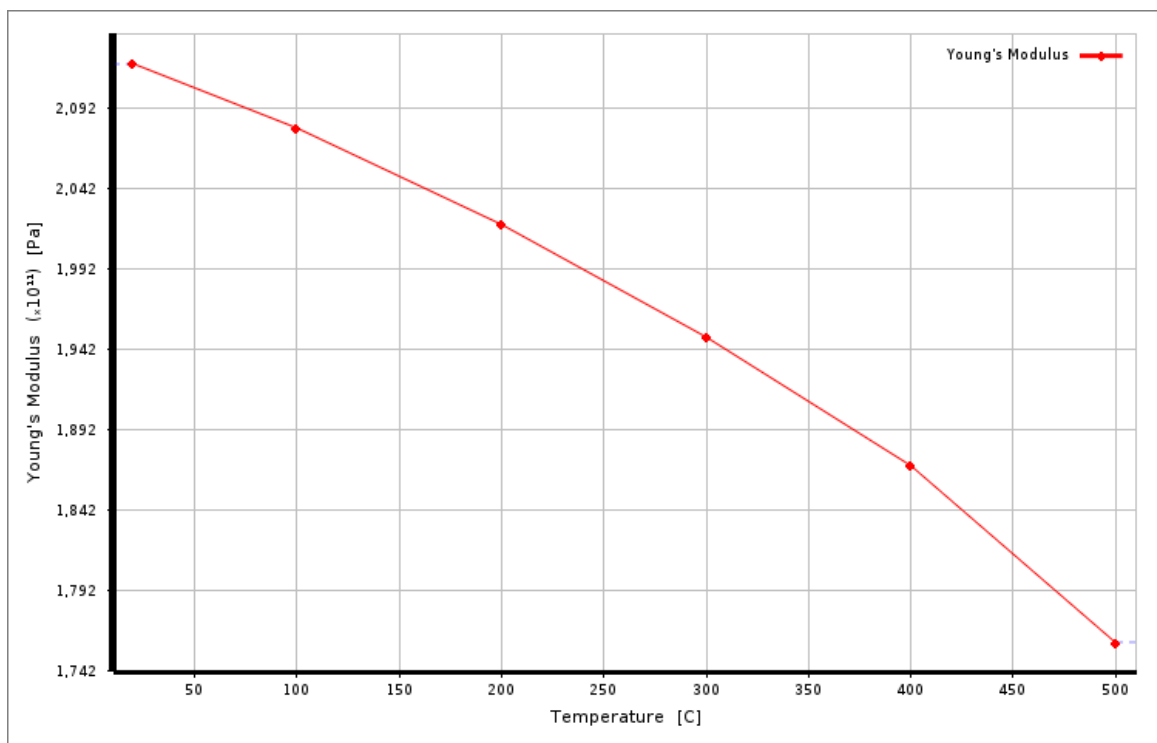


Рисунок 45 – Зависимость модуля Юнга от температуры

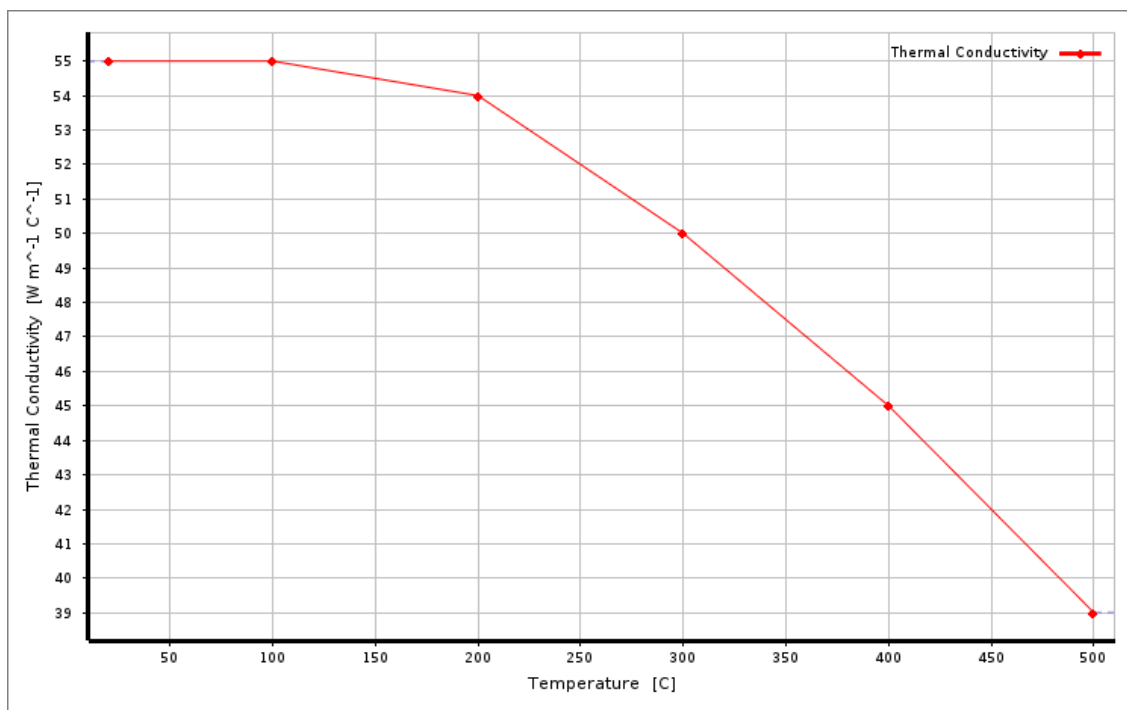


Рисунок 46 – Зависимость теплопроводности от температуры

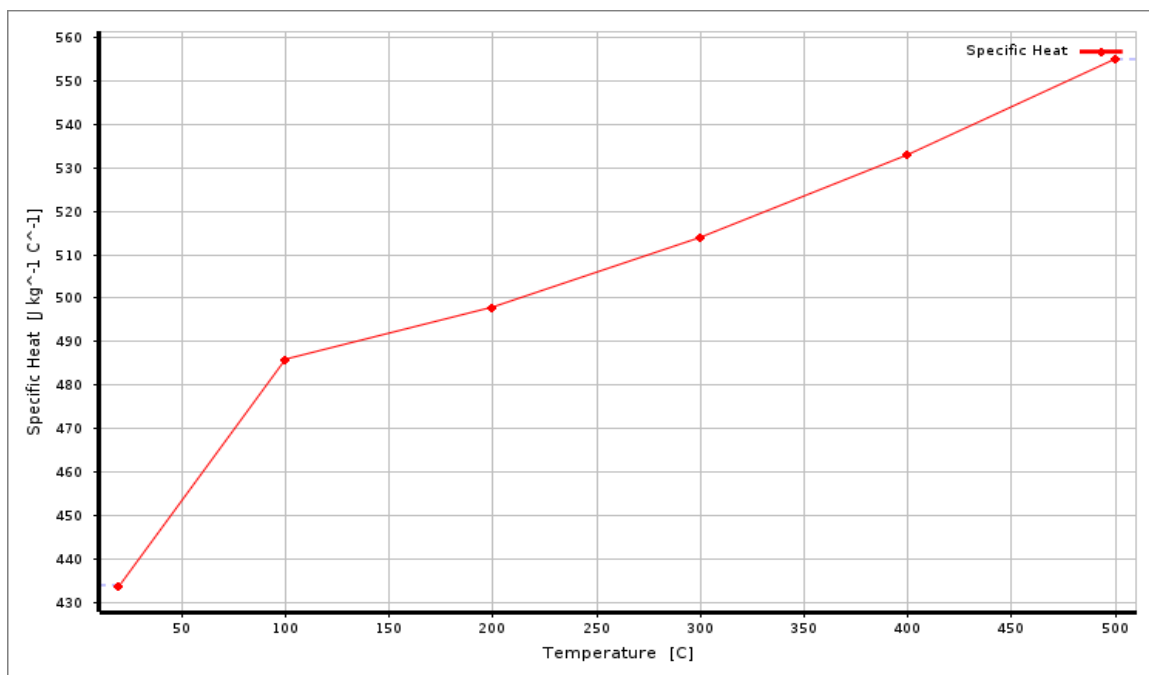


Рисунок 47 – Зависимость удельной теплоемкости от температуры

Такие же зависимости были введены и для стали 20, из которой изготавливается рама карта.

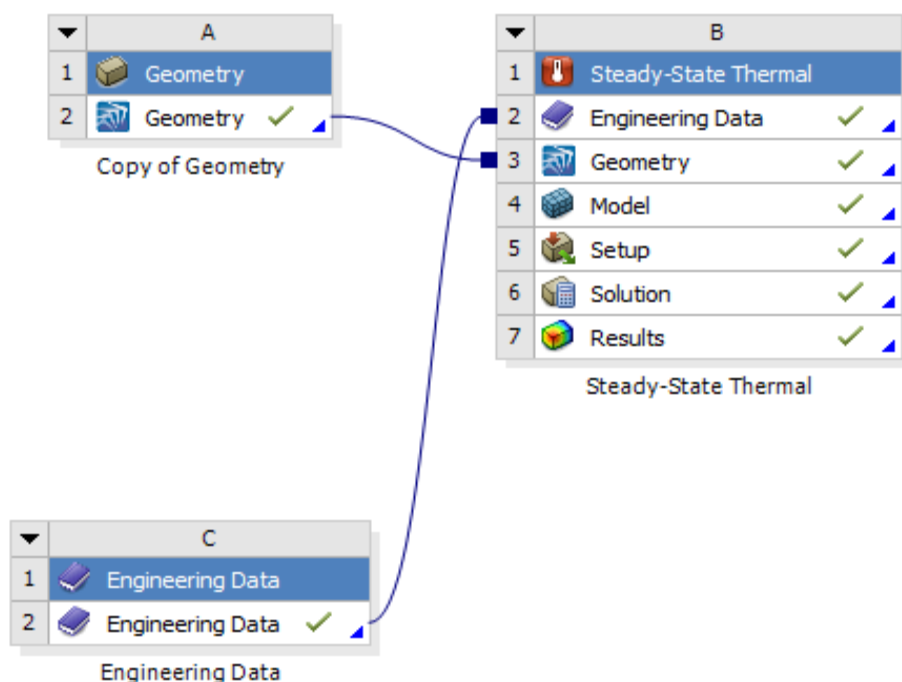


Рисунок 48 – Проект Steady-State Thermal

Как видно по рисунку 48 проект на данном этапе состоит из трех блоков – Geometry, Engineering Data и Steady-State Thermal. Данные блоки взаимосвязаны, а выделение разделов Geometry и Engineering Data в отдельные блоки позволят проводить параллельные расчеты, не подготавливая заново геометрию и не вводя физических свойств материалов. Далее переходим в раздел Model, упрощенное дерево проекта которого представлено на рисунке 49.

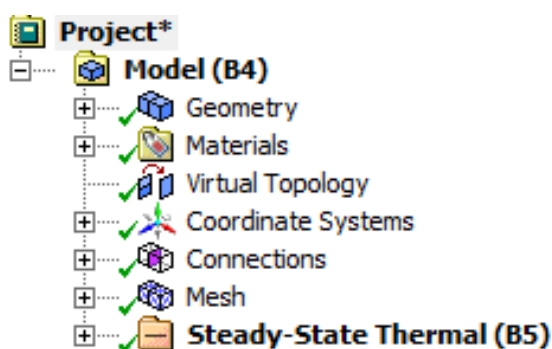


Рисунок 49 – Дерево проекта

На вкладке геометрия (рисунок 50) присваиваем материал элементам конструкции стапеля и рамы карта. На данном этапе мы можем проанализировать габариты, массу и соответствующие моменты инерции. Так на рисунке 51 представлены параметры для рамы гоночного карта.

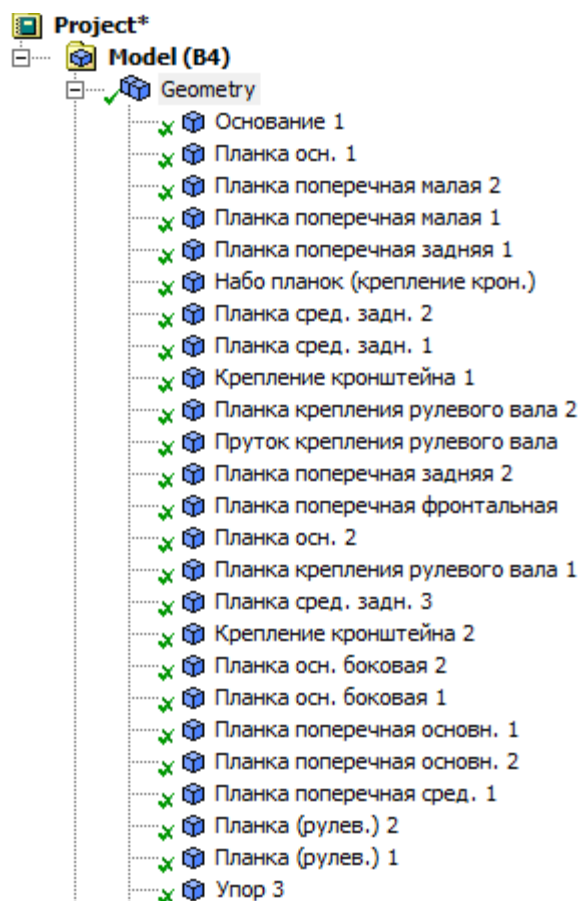


Рисунок 50 – Перечень конструктивных элементов анализируемой геометрии

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

Рисунок 51 – Детальное описание параметров рамы карта

Следующим шагом необходимо задать все контакты моделируемой конструкции. Так как анализ конструкции стапеля мы будем выполнять посредством нагружения рамы карта изгибающими моментами, то необходимо указать также контакты рамы с элементами стапеля. При моделировании будем использовать 4 типа контакта (рисунок 52).

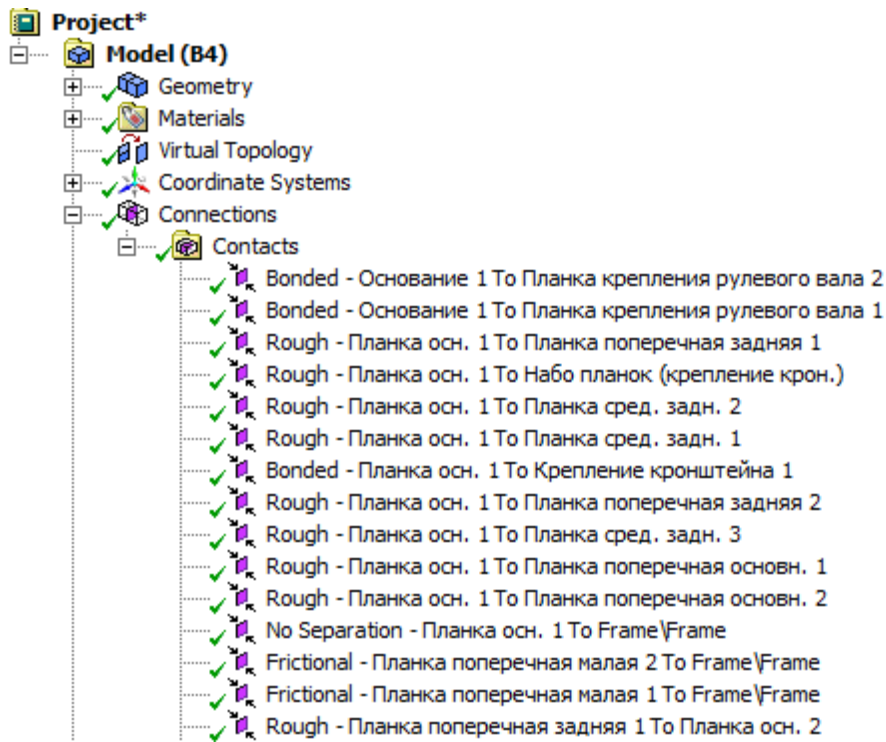


Рисунок 52 – Типы контактов

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).

На рисунках 53-55 представлены примеры контактов.

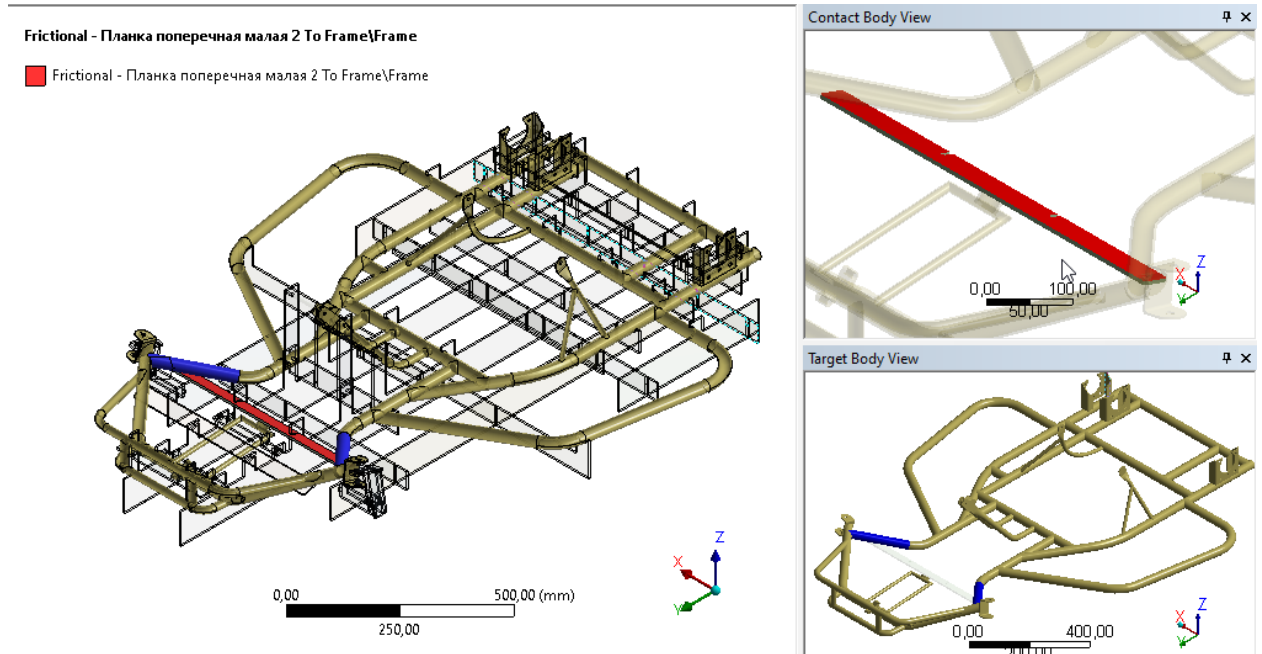


Рисунок 53 – Пример фрикционного контакта

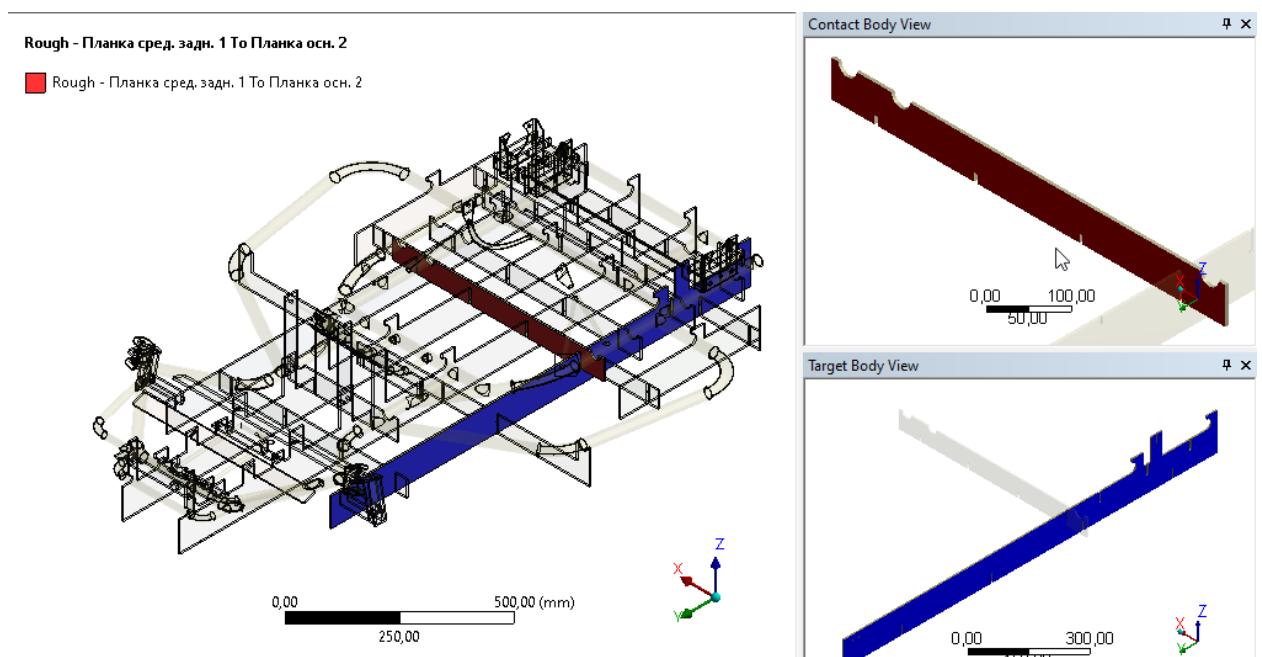


Рисунок 54 – Пример Rough-контакта



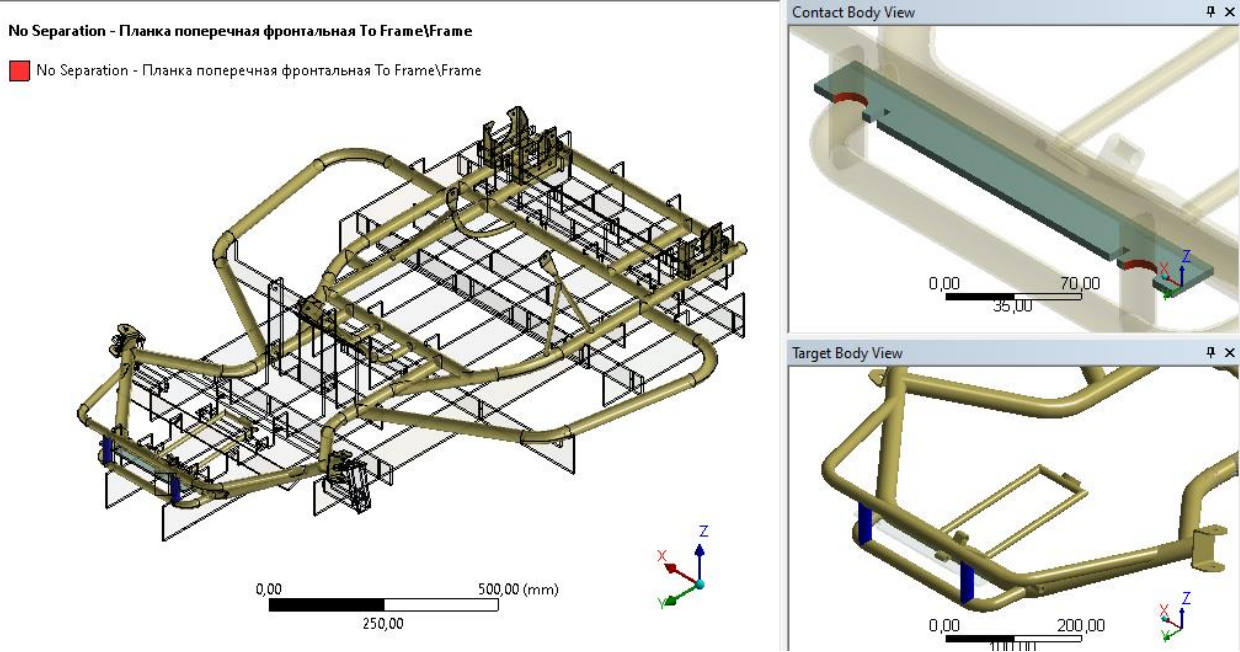


Рисунок 55 – Пример No Separation контакта

Далее разбиваем нашу конструкцию на конечные элементы. Результат разбиения представлен на рисунке 56. Для стапеля принципиально задали метод разбиения на гексагональные-элементы.

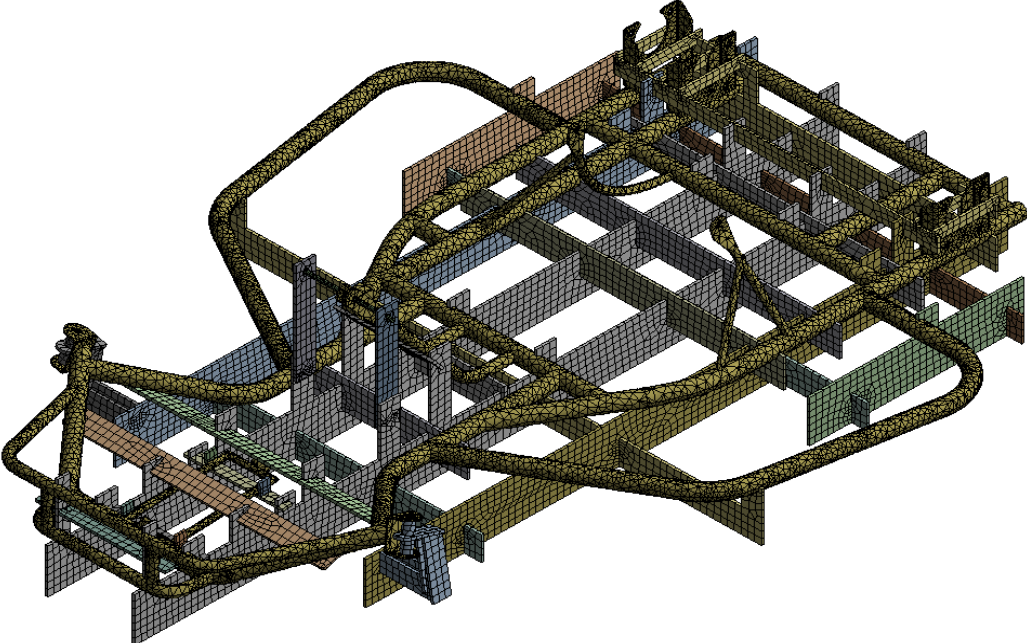


Рисунок 56 – Конечно-элементная модель

Ну и наконец, 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 будет происходить со всех поверхностей (рисунок 57).

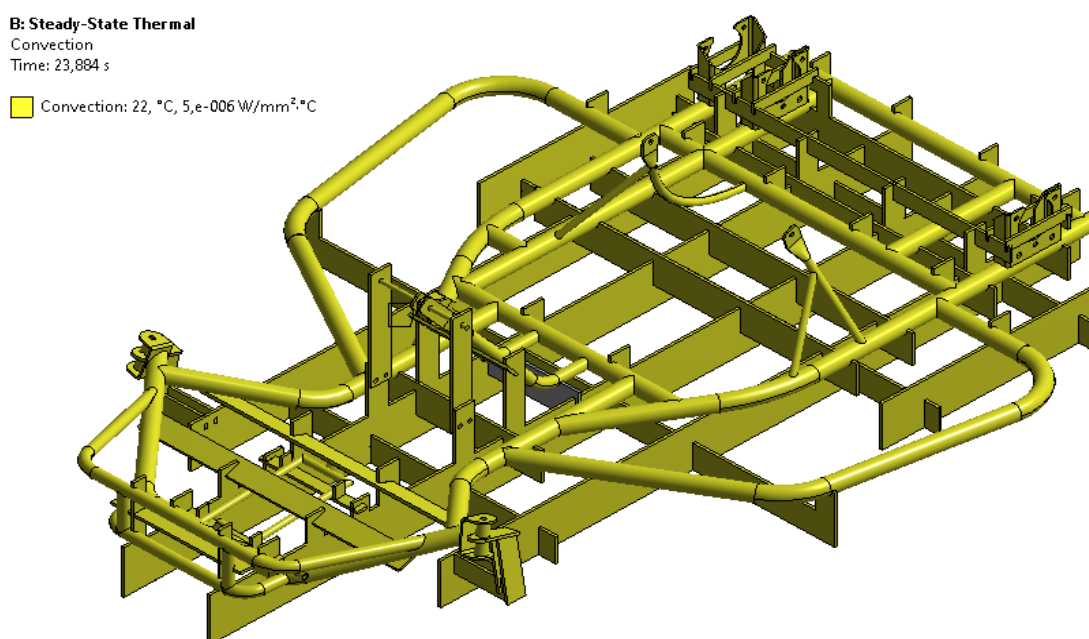


Рисунок 57 – Конвекция

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.

Так на рисунках 58-61 показаны места сварки и графики распределения температуры по шагам в четырех произвольных точках. Максимальную температуру, в соответствии с экспериментальными данными, задаем в 505°C.

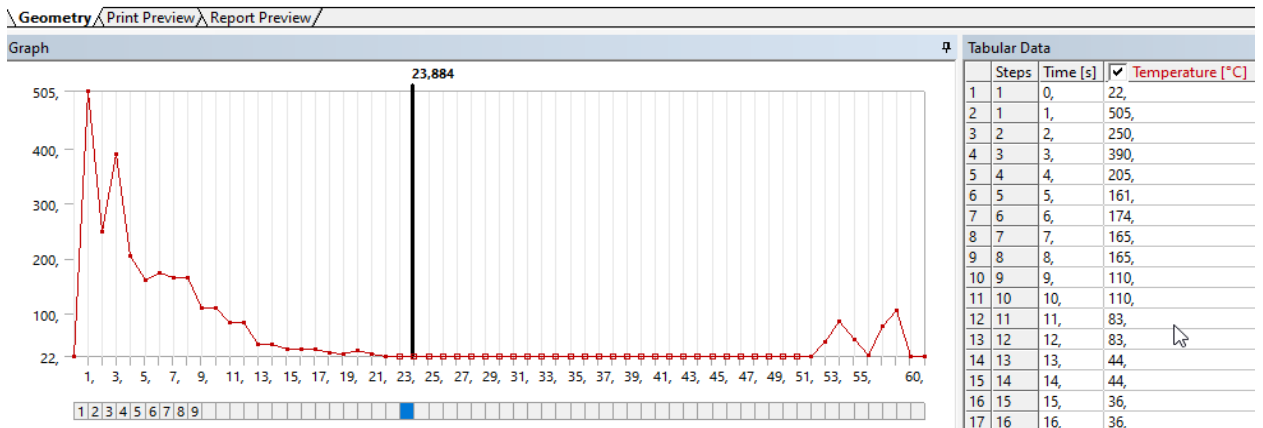
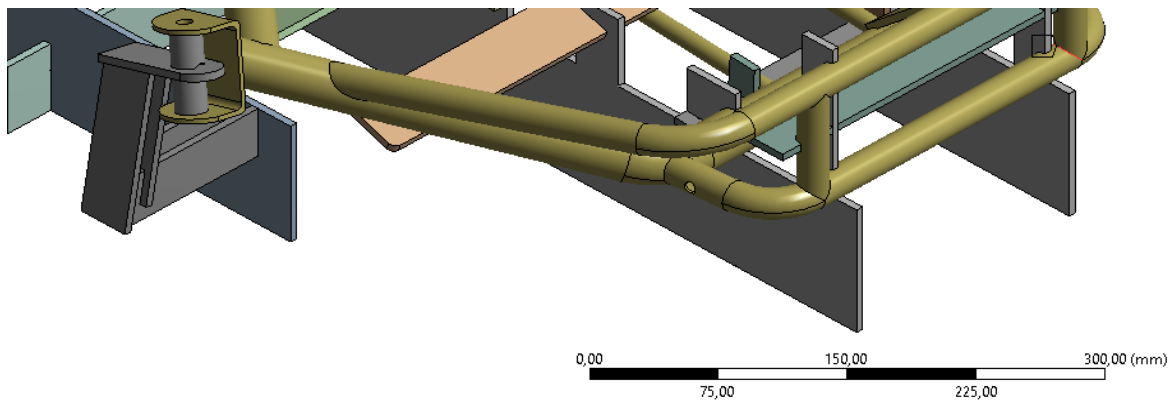


Рисунок 58 – График распределения температур на шаге 1

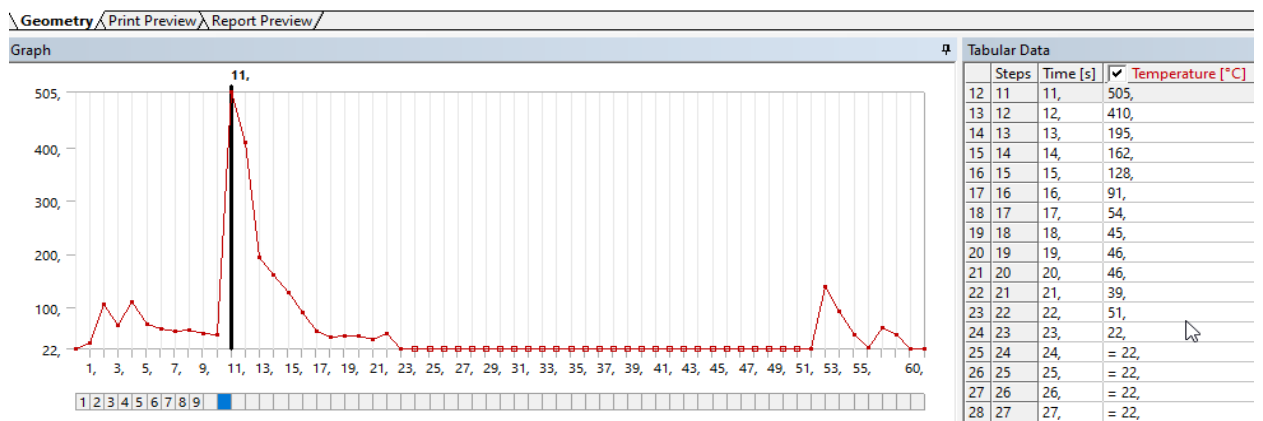
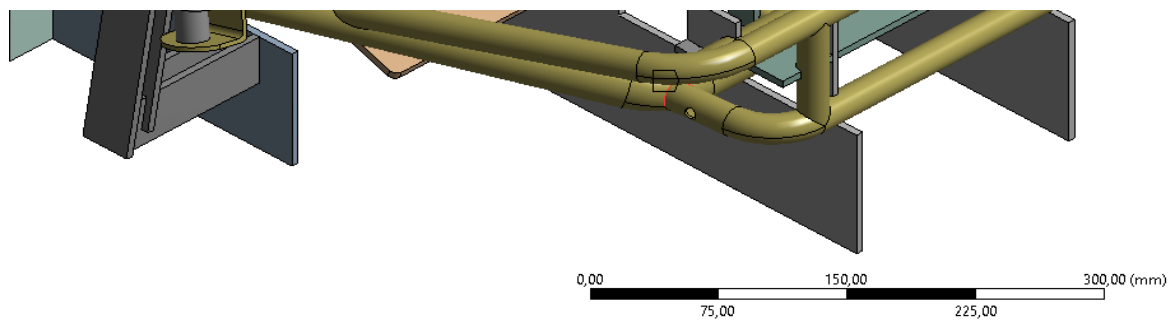


Рисунок 59 – График распределения температур на шаге 11

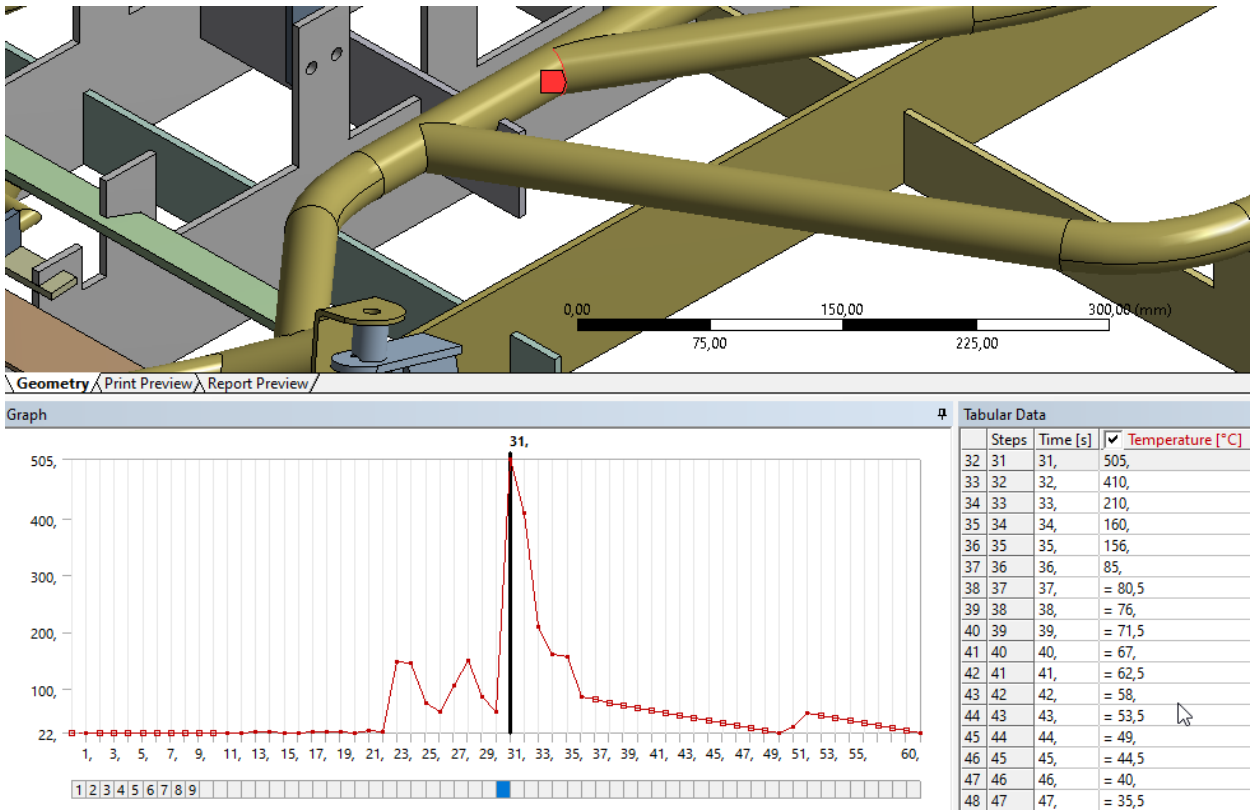


Рисунок 60 – График распределения температур на шаге 31

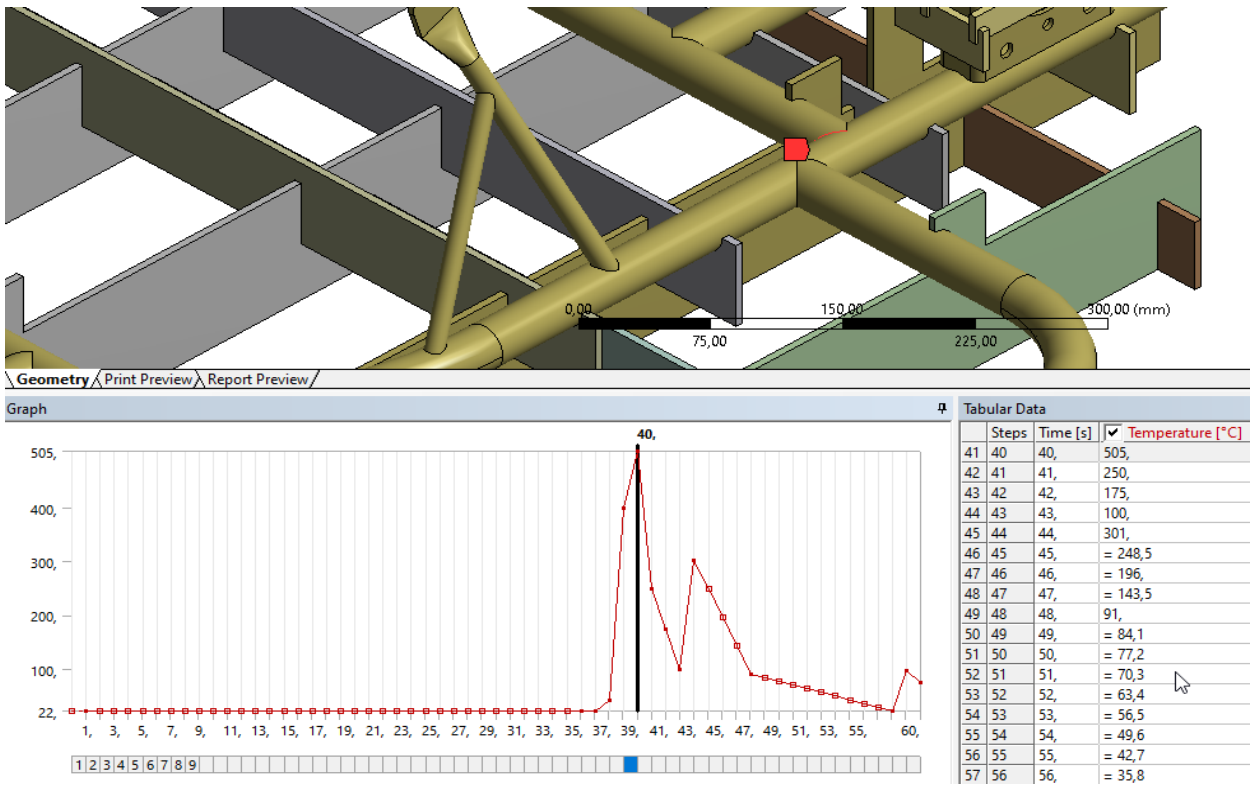


Рисунок 61 – График распределения температур на шаге 40

Объединенная графическая зависимость распределения температур на 60 шагах представлена на рисунке 62.

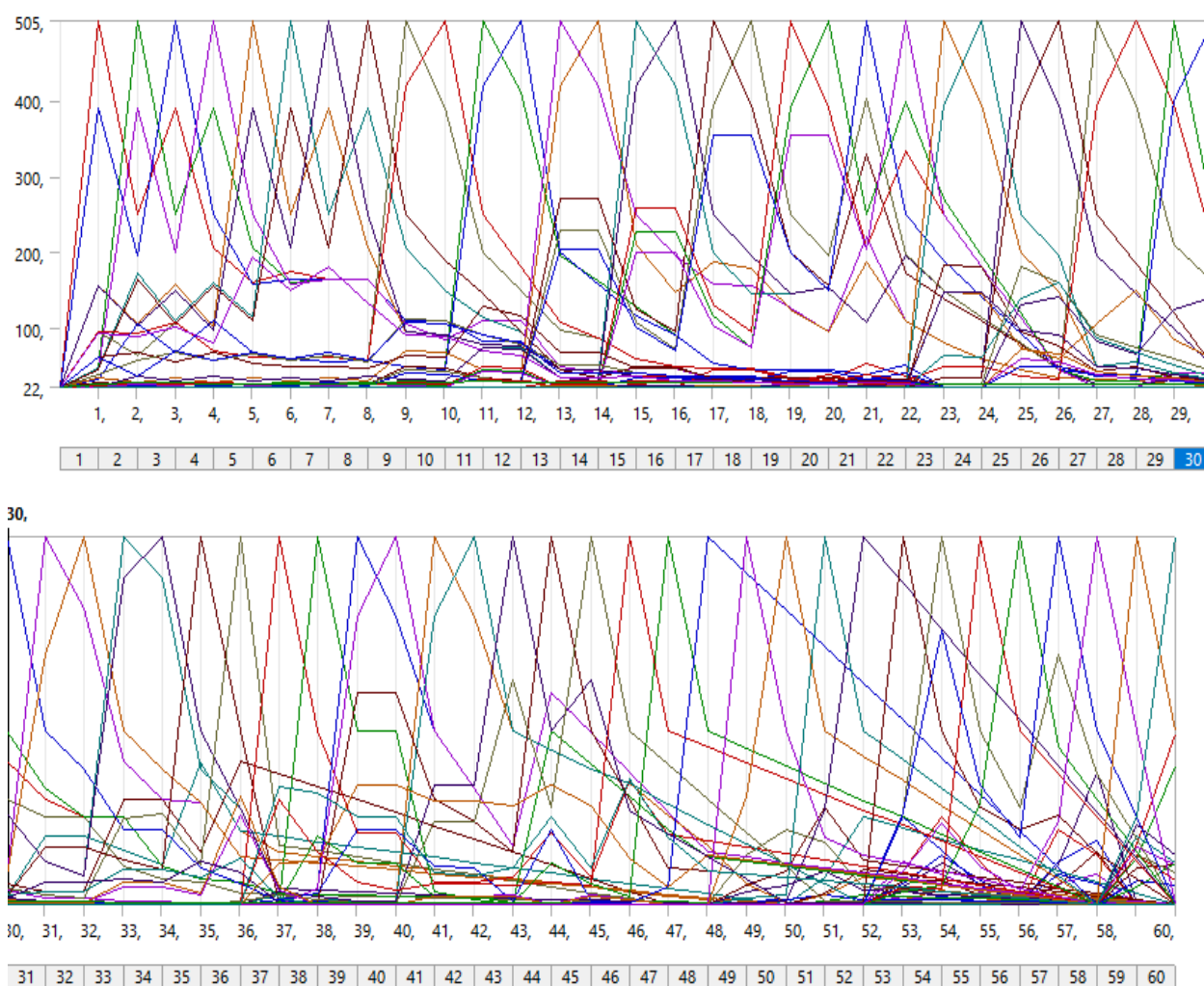


Рисунок 62 – Изменение температуры по шагам

На рисунках 63-70 представлены примеры распределения температур с учетом всех факторов моделирования. На рисунках 63-66 распределение температур показано с рамой карта, а на рисунках 67-70 рама карта скрыта и распределение температур можно наблюдать непосредственно на конструкции стапеля.

Распределение температур на каждом шаге задавали с учетом моделирования распределения температур на предыдущих шагах.

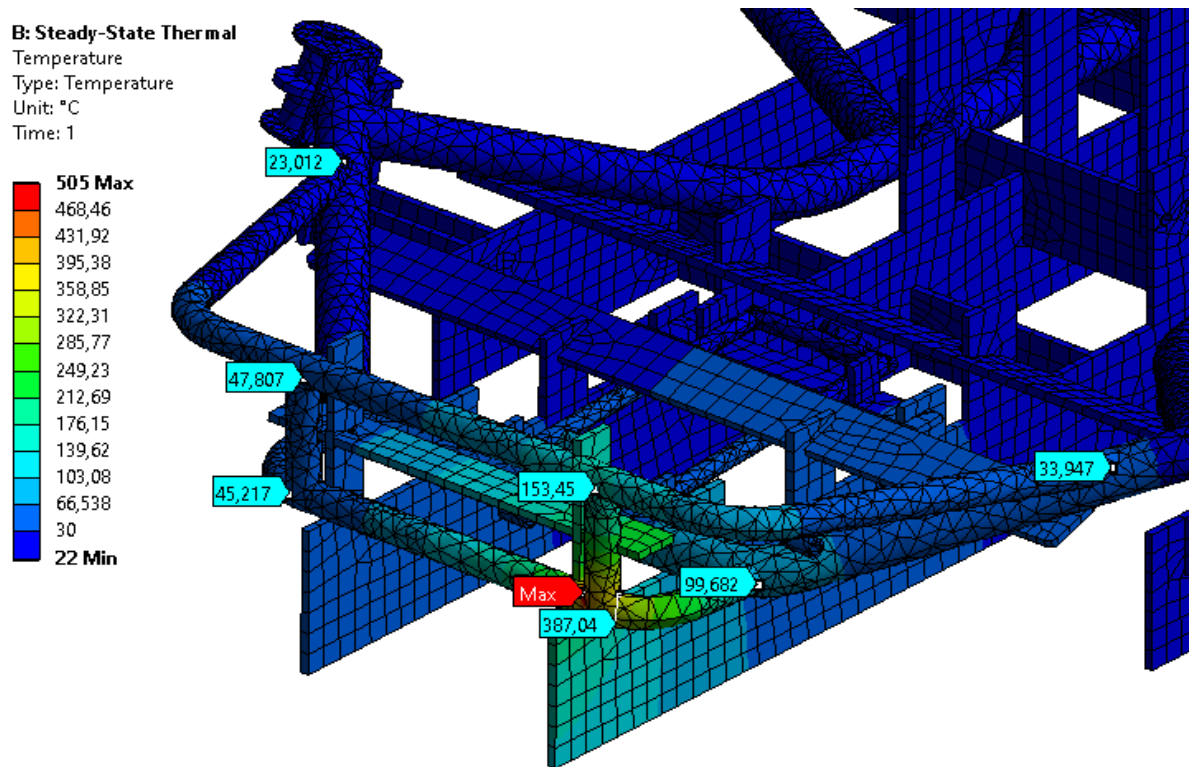


Рисунок 63 – Распределение температуры по раме карта на шаге 1

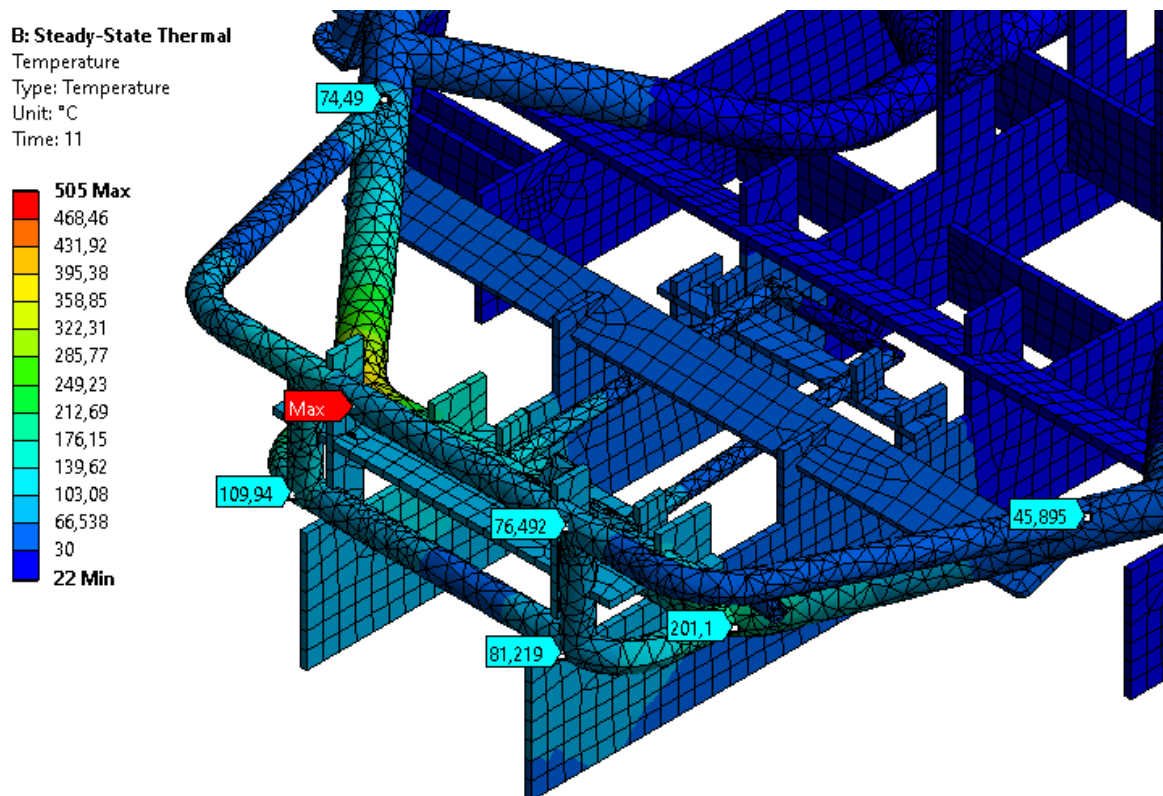


Рисунок 64 – Распределение температуры по раме карта на шаге 11

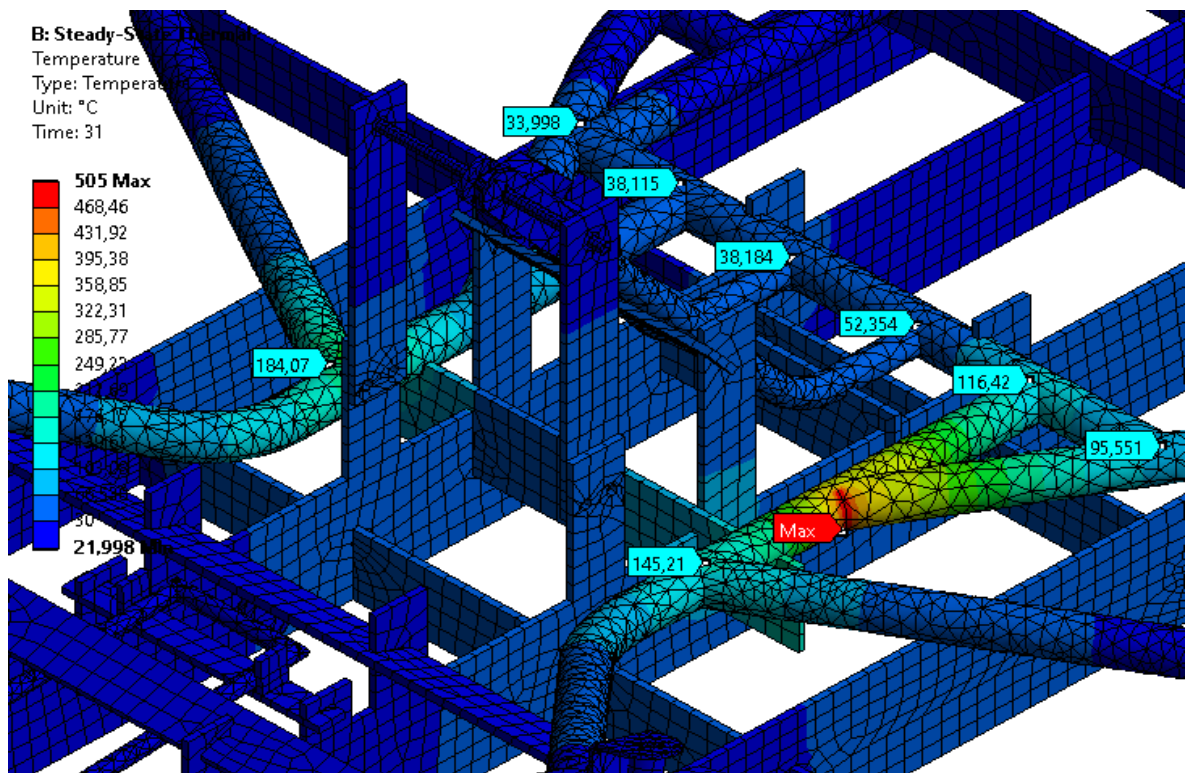


Рисунок 65 – Распределение температуры по раме карта на шаге 31

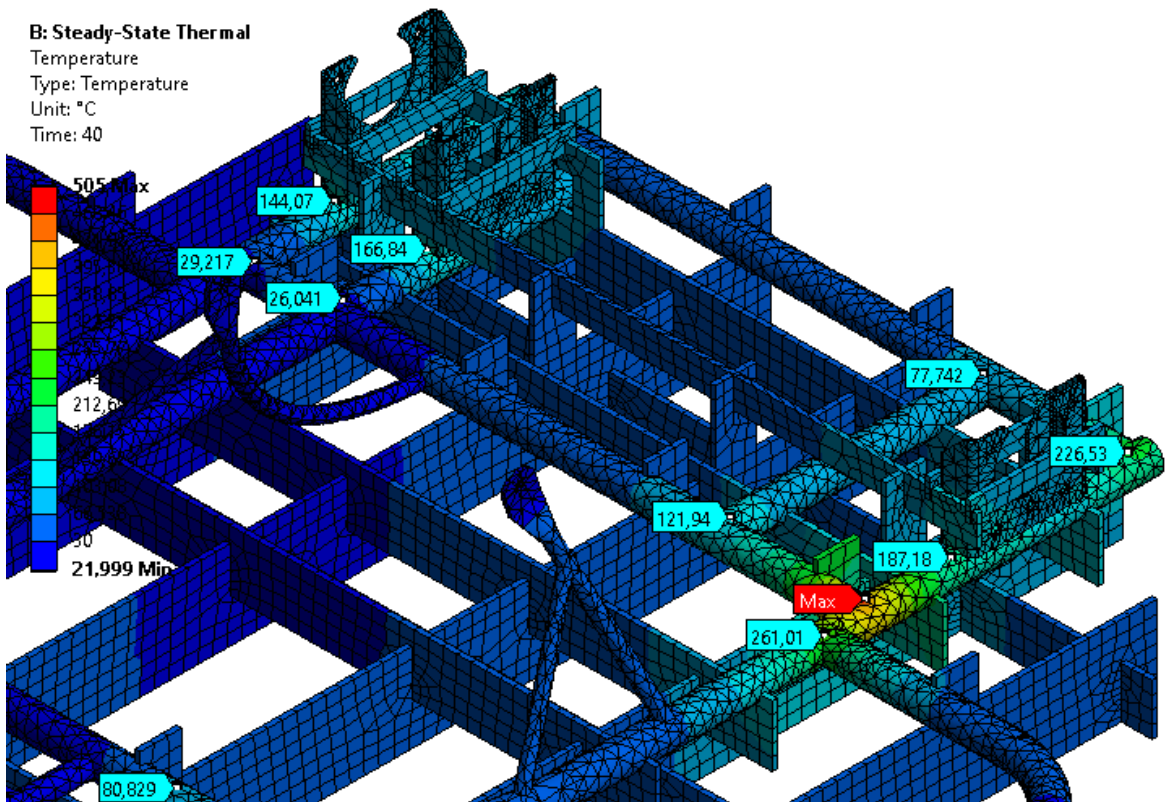


Рисунок 66 – Распределение температуры по раме карта на шаге 40

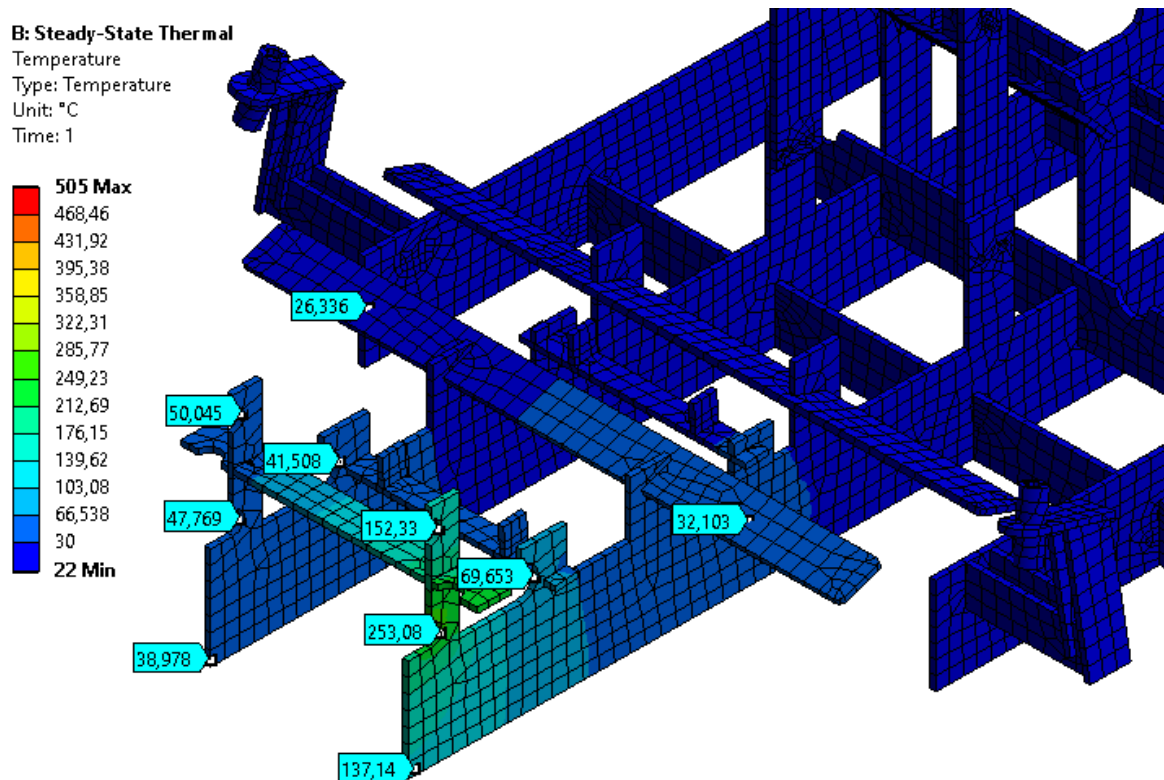


Рисунок 67 – Распределение температуры по стапелю на шаге 1

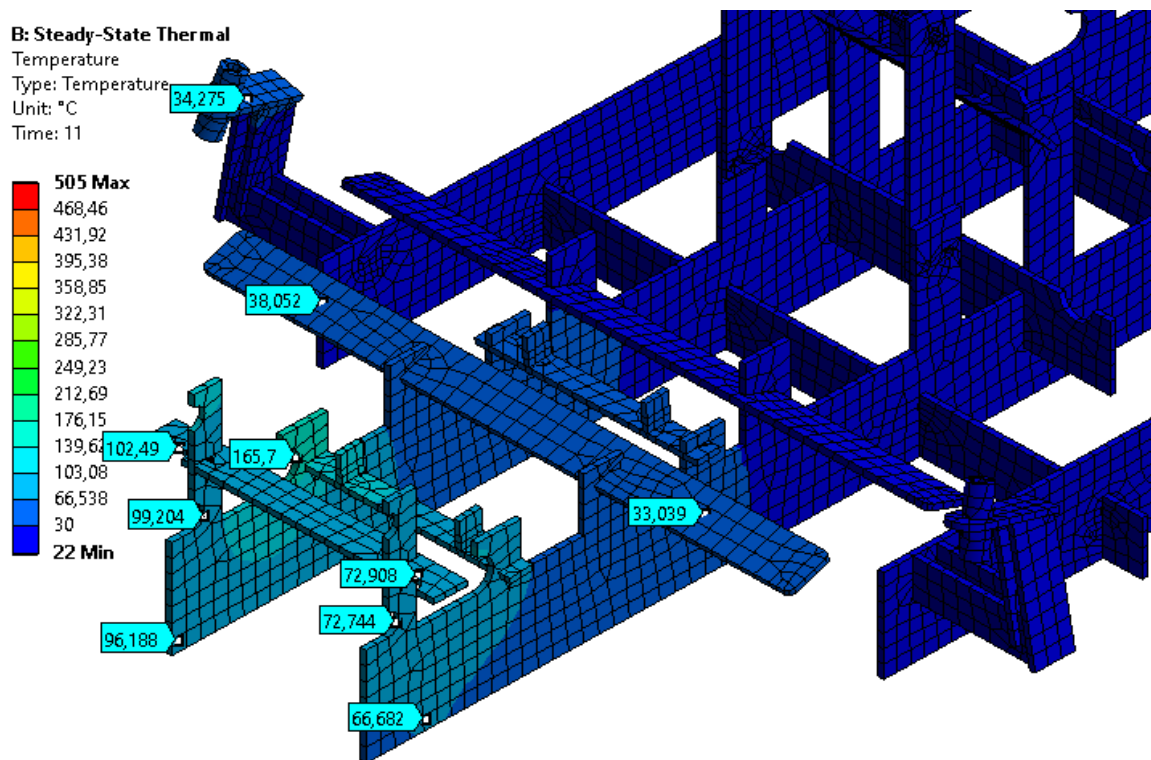


Рисунок 68 – Распределение температуры по стапелю на шаге 11



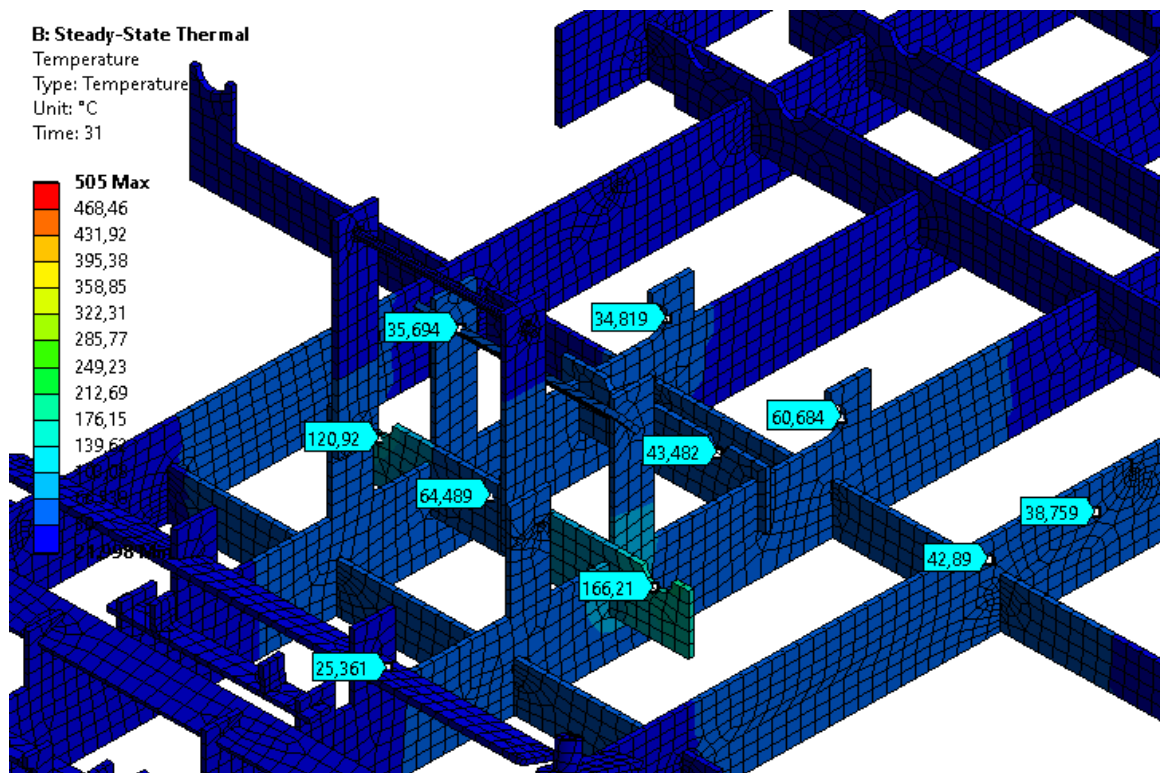


Рисунок 69 – Распределение температуры по стапелю на шаге 31

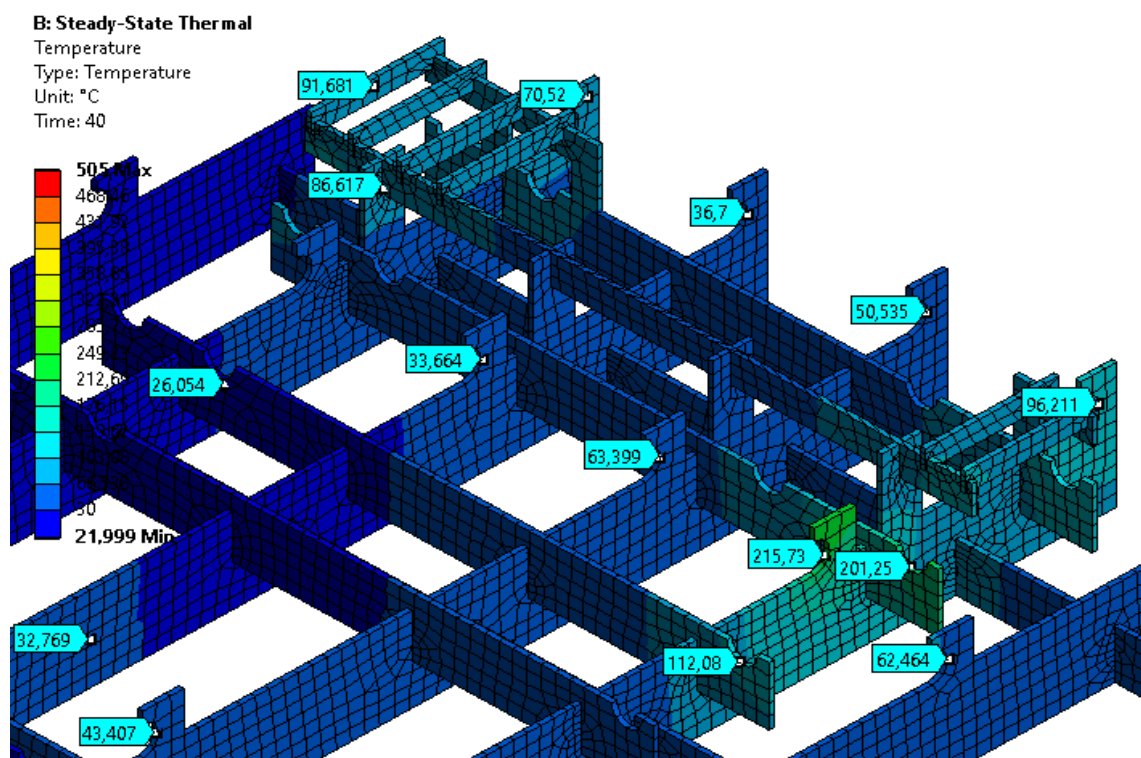


Рисунок 70 – Распределение температуры по стапелю на шаге 40

Следующим этапом необходимо нагрузить раму карта изгибающими моментами, величину которых мы определили экспериментально. Моменты будем задавать также по шагам, и анализировать величину деформаций стапеля поэтапно.

Для этого создаем Static Structural, в который импортируем все выполненные тепловые расчеты (рисунок 71).

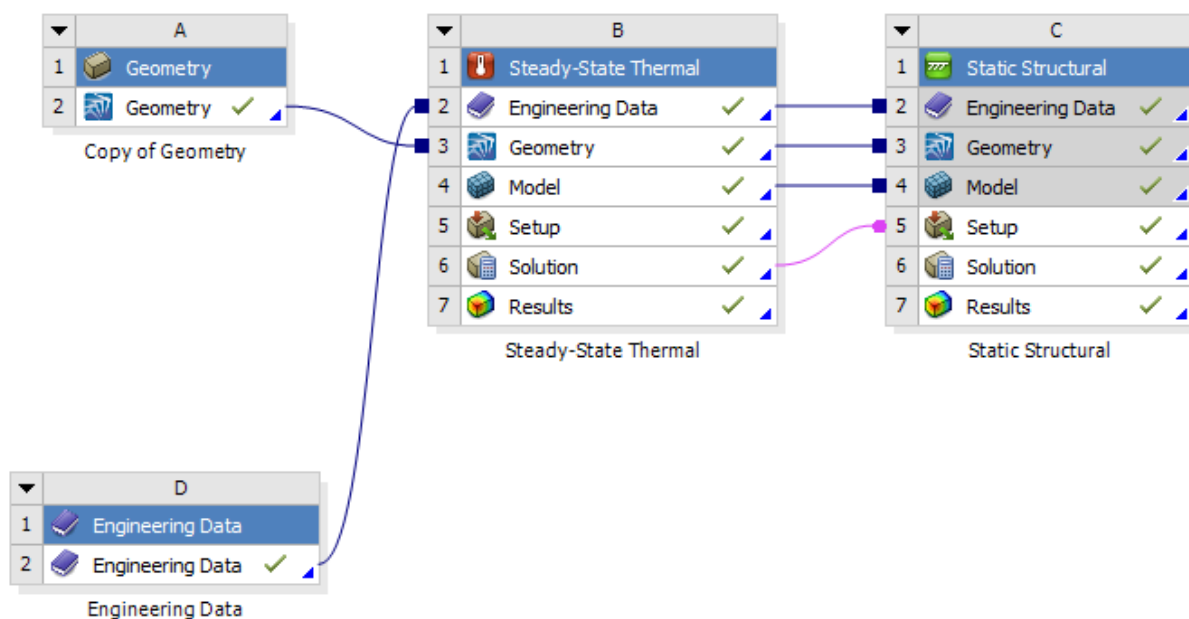


Рисунок 71 – Проект Steady-State Thermal - Static Structural

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 72 представлено графическое окно с установленным изгибающим моментом при наложении сварочного шва на крепление переемычки.

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

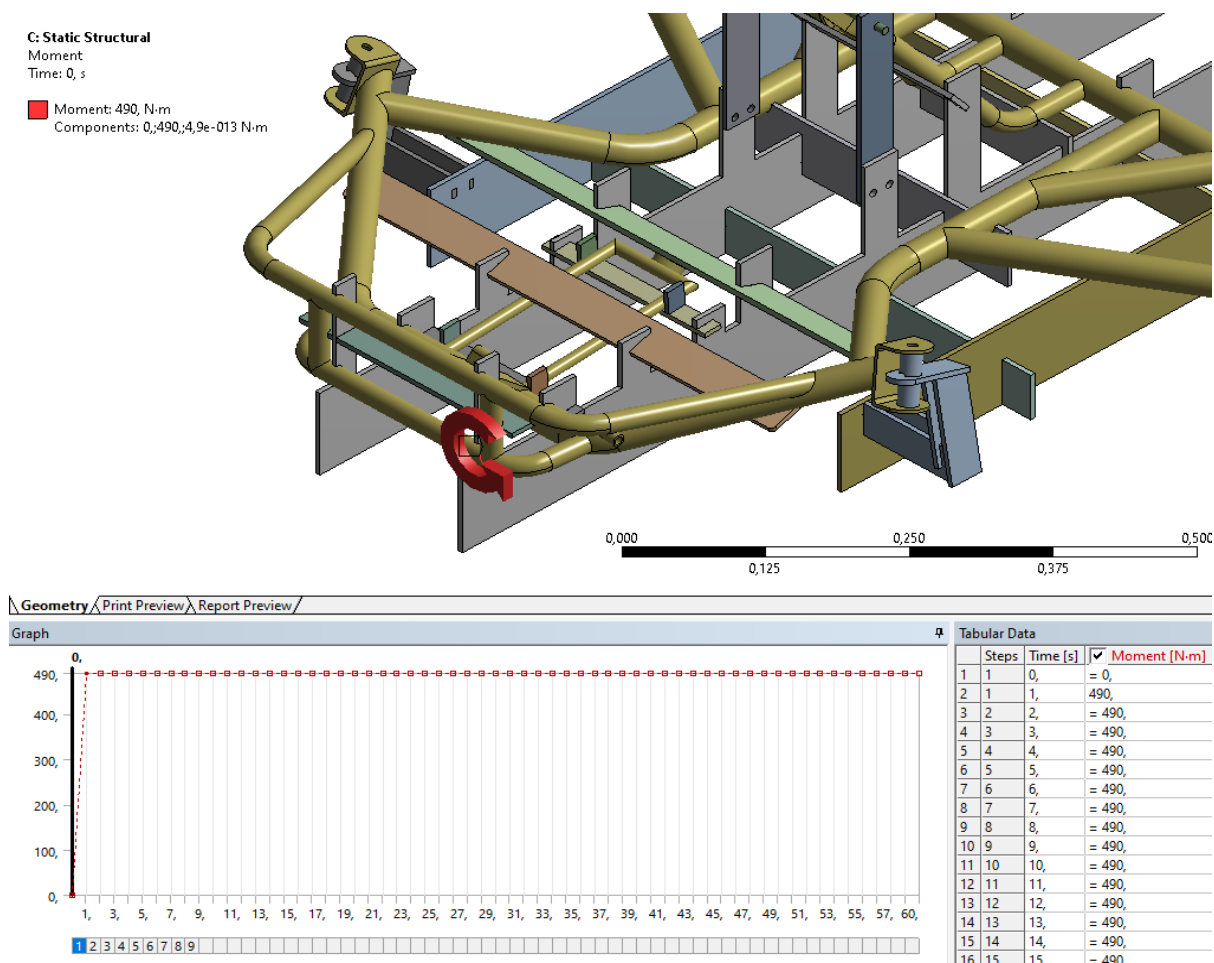


Рисунок 72 – Величина и направление момента на шаге 1

Как видно из графика, зависимости деформации от приложенных нагрузок (рисунок 73) – максимальная деформация стапеля, толщиной 5 мм с установленной на нем рамой карта не превышает 1,69 мм.

Данный результат считаем удовлетворительным. Важно понимать, что максимальные значения величины деформаций относятся к раме карта, а деформации стапеля несколько ниже. На рисунках 74-83 представлены примеры деформаций конструкции. На рисунках 74-78 – деформации стапеля с рамой карта, на рисунках 79-83 – деформации непосредственно самого стапеля.

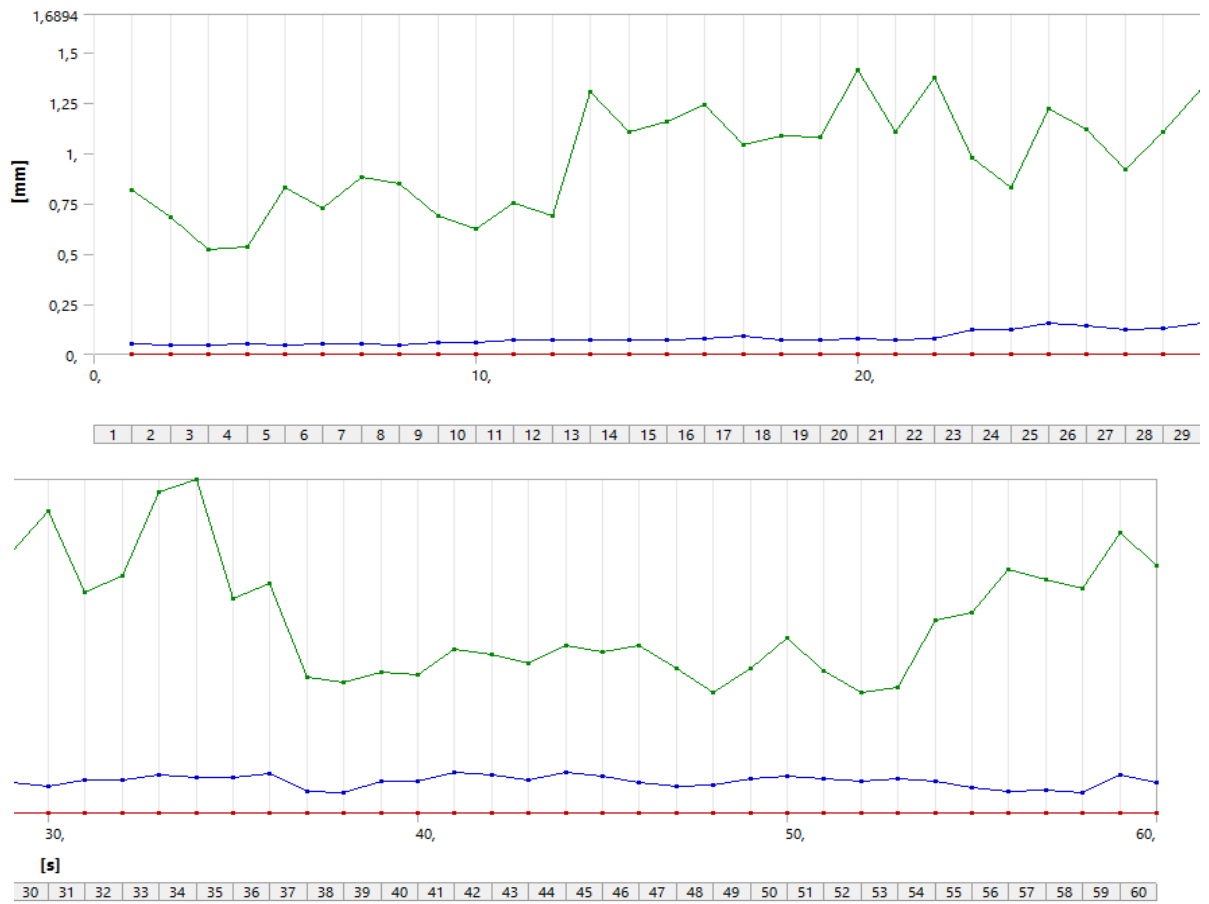


Рисунок 73 – График деформации конструкции

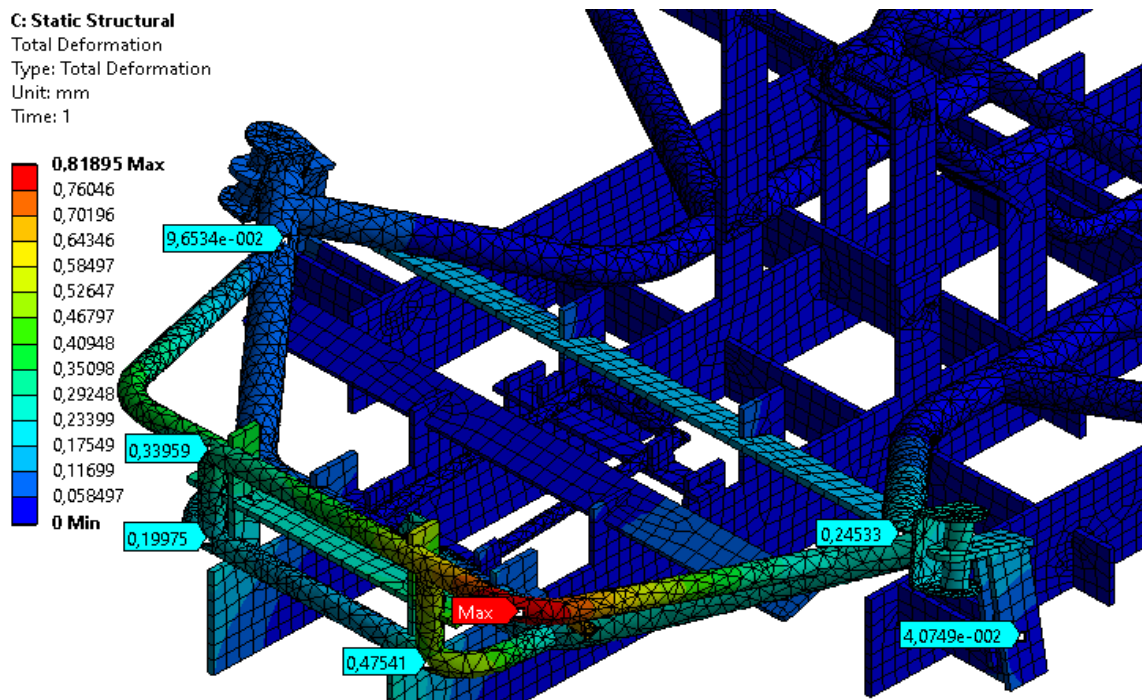


Рисунок 74 – Деформация стапеля с рамой на шаге 1

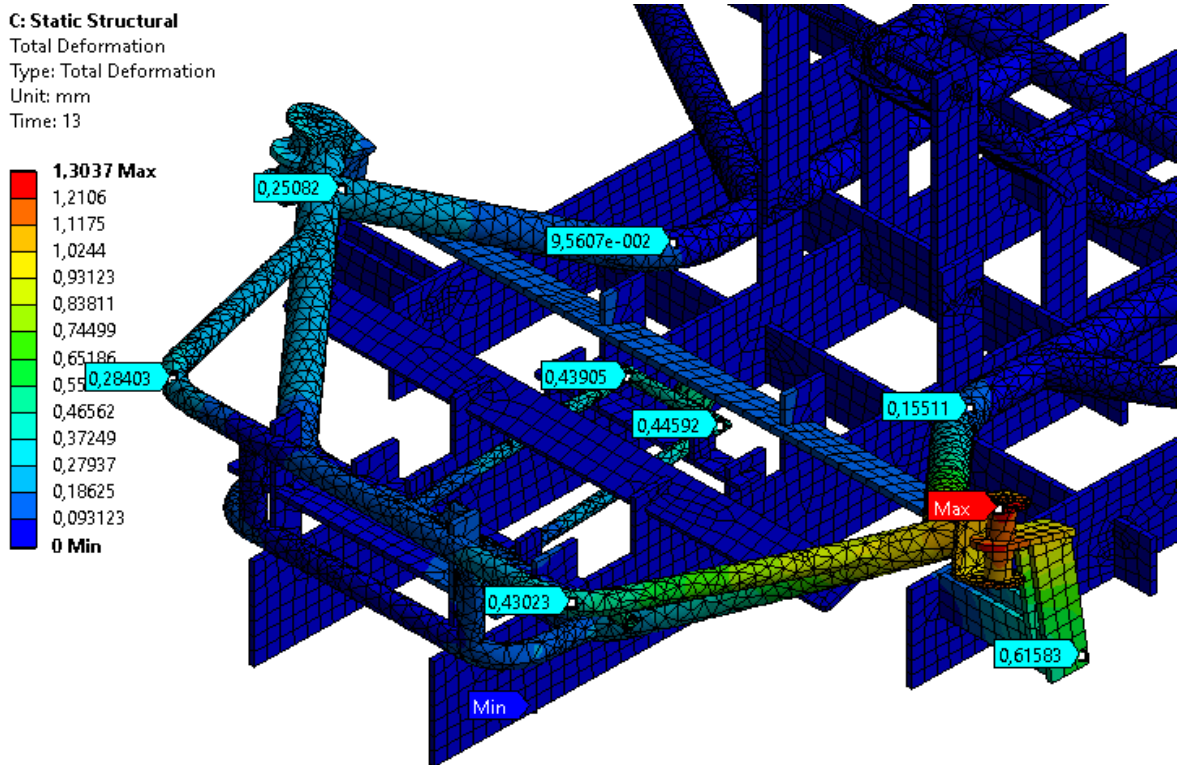


Рисунок 75 – Деформация стапеля с рамой на шаге 13

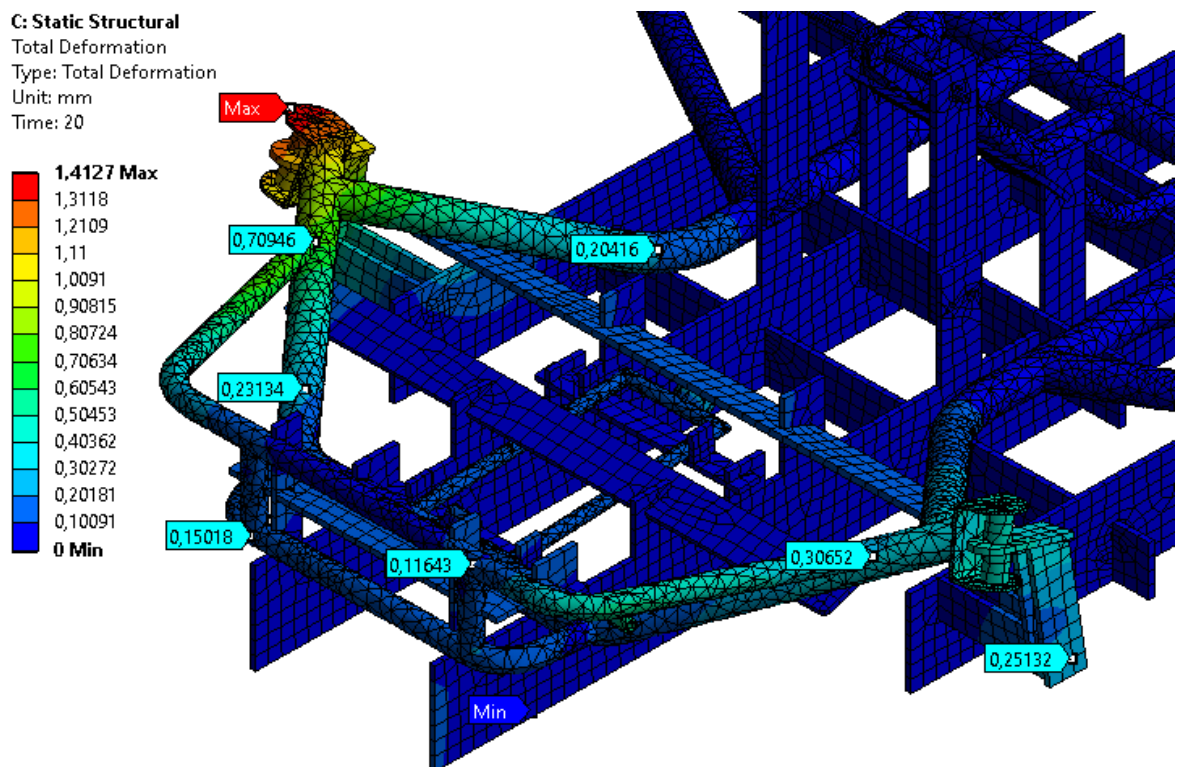


Рисунок 76 – Деформация стапеля с рамой на шаге 20

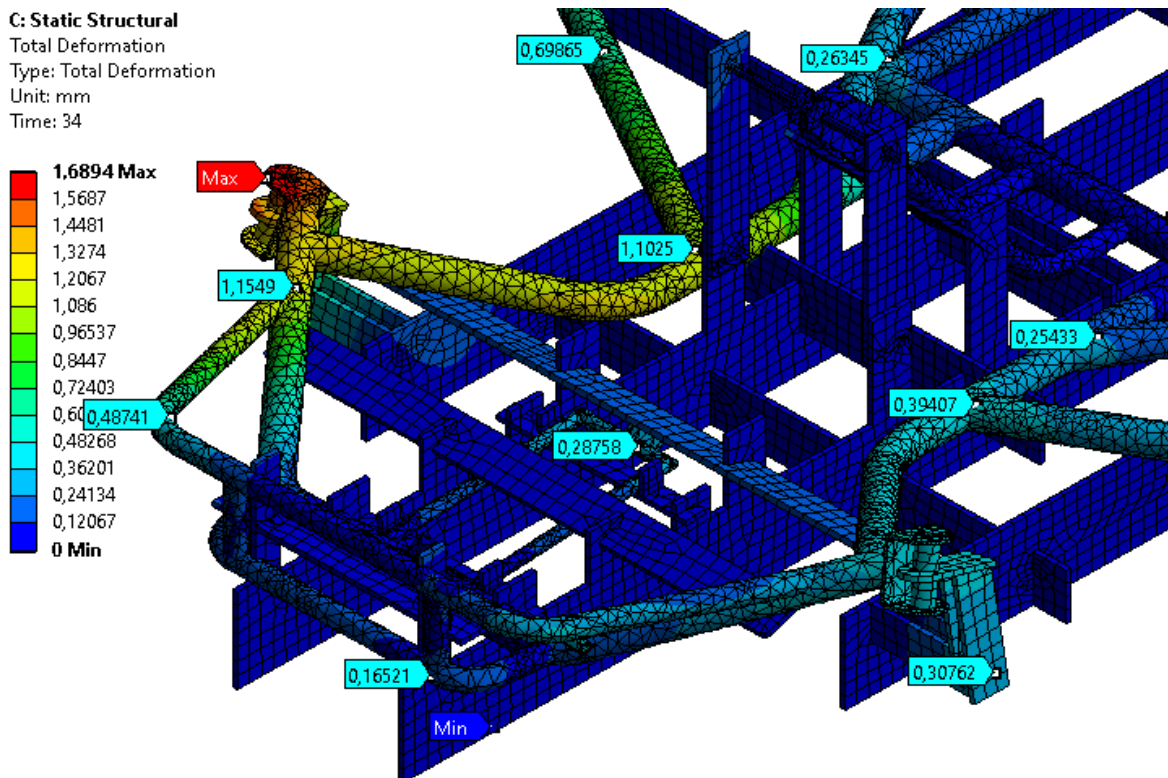


Рисунок 77 – Деформация стапеля с рамой на шаге 34

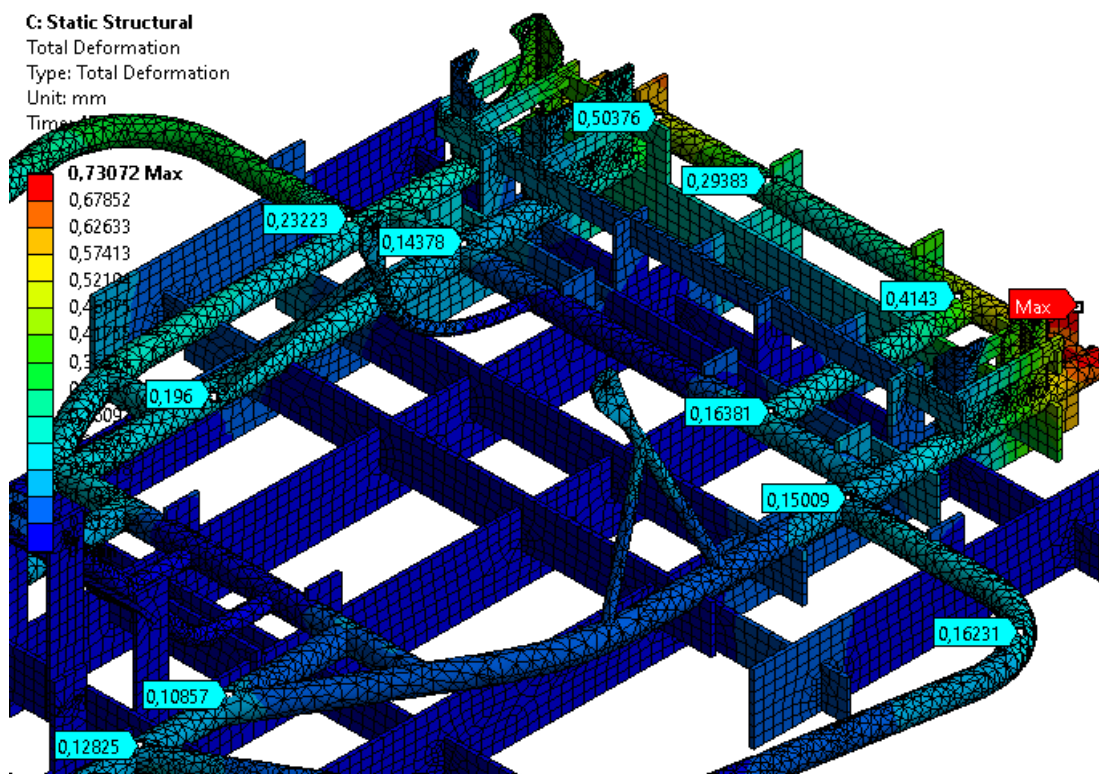


Рисунок 78 – Деформация стапеля с рамой на шаге 47

C: Static Structural  
 Total Deformation  
 Type: Total Deformation  
 Unit: mm  
 Time: 1

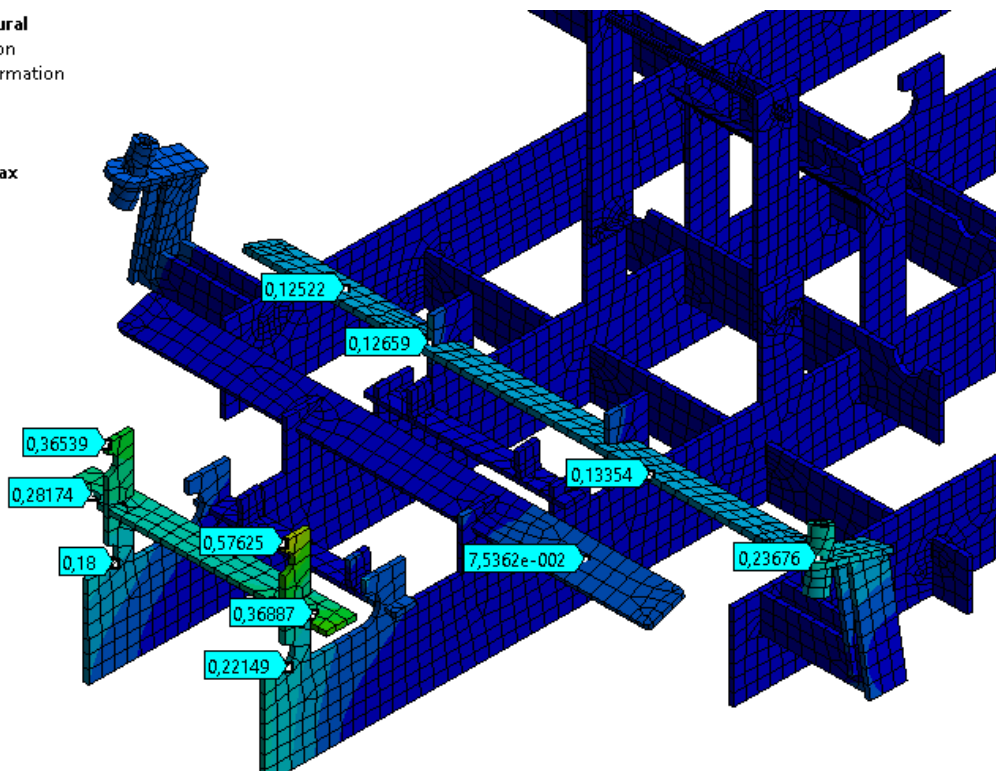
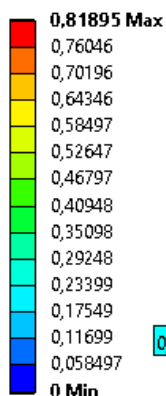


Рисунок 79 – Деформация стапеля на шаге 1

C: Static Structural  
 Total Deformation  
 Type: Total Deformation  
 Unit: mm  
 Time: 13

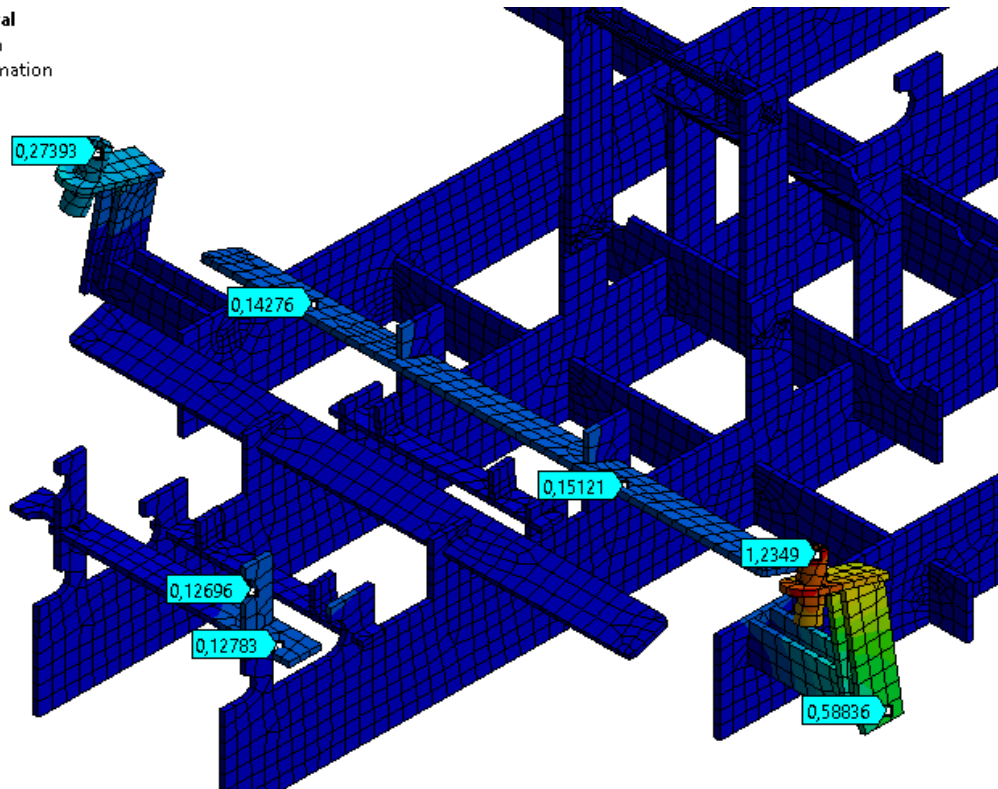
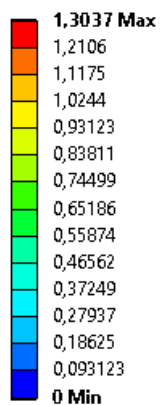


Рисунок 80 – Деформация стапеля на шаге 13

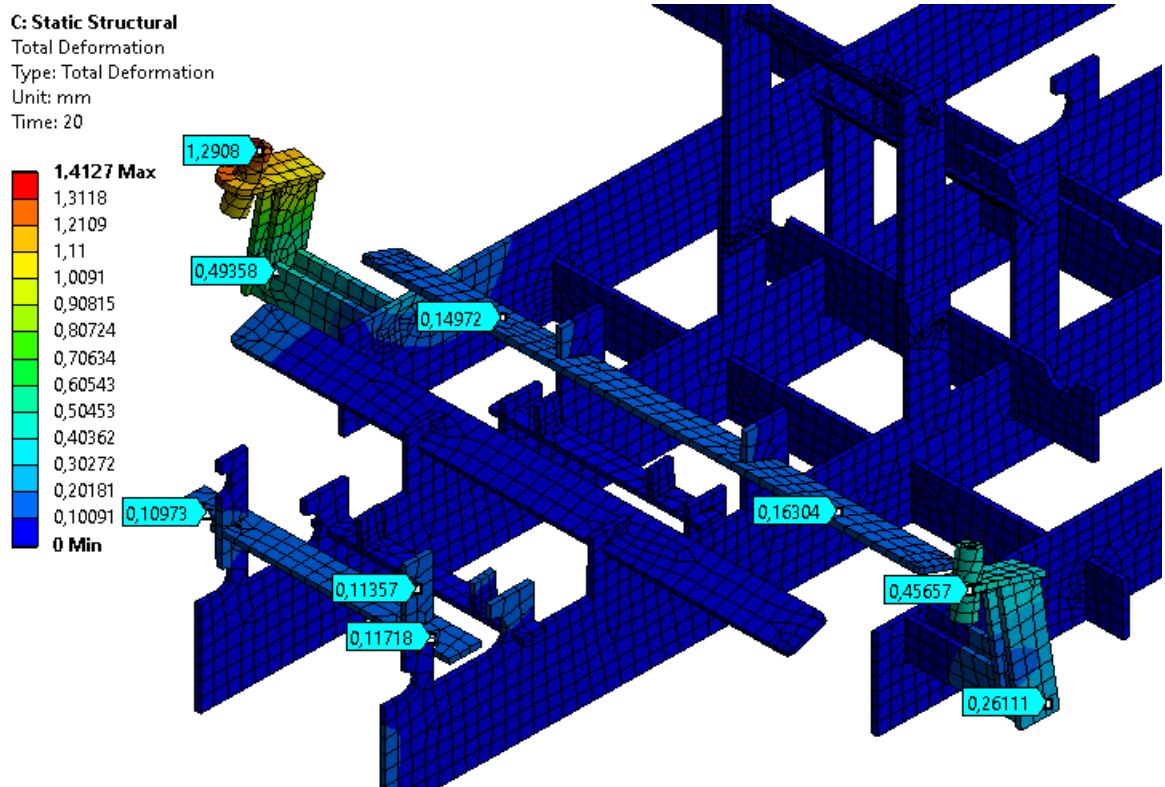


Рисунок 81 – Деформация сталея на шаге 20

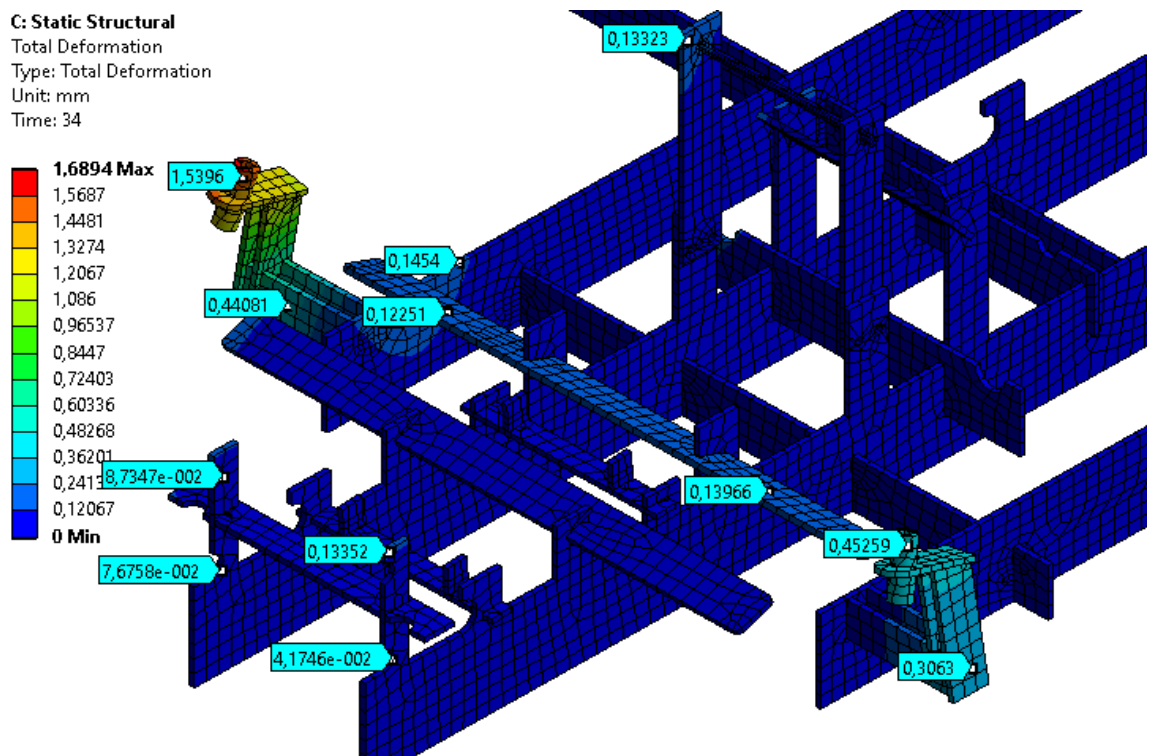


Рисунок 82 – Деформация сталея на шаге 34



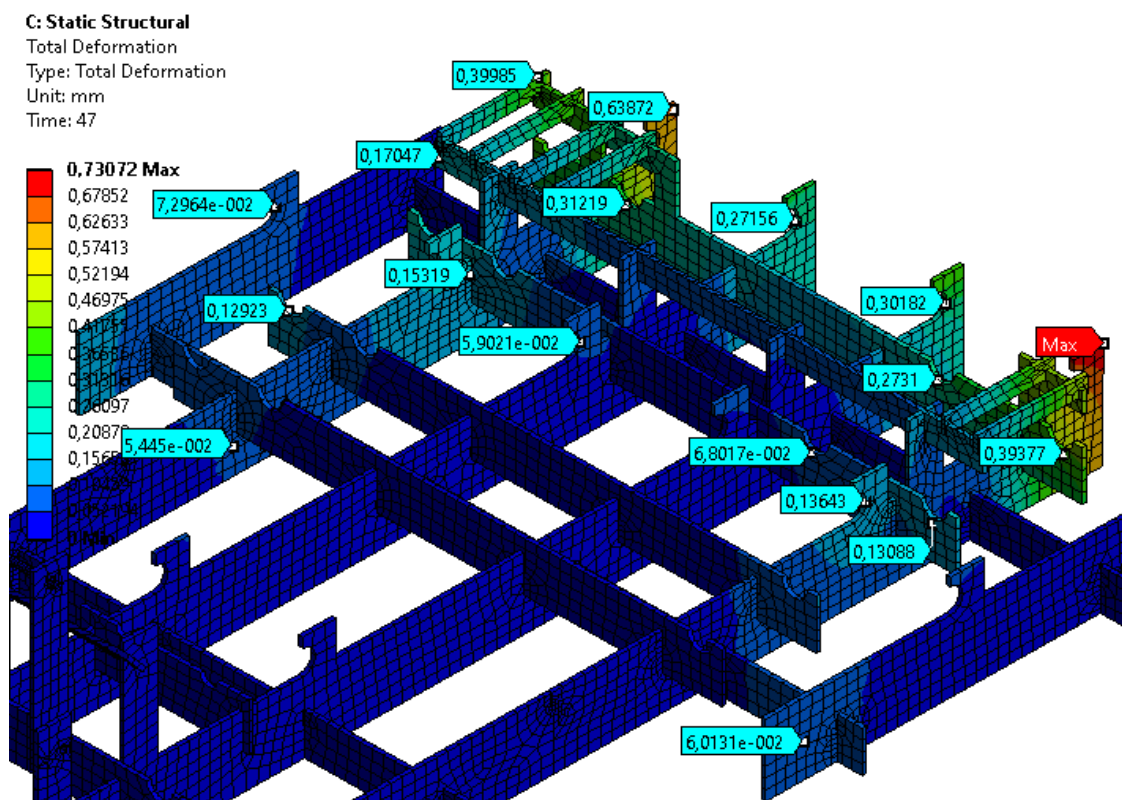


Рисунок 83 – Деформация стапеля на шаге 47

Таким образом, разработанная нами конструкция стапеля модульного типа обеспечивает достаточный уровень жесткости.

Выводы по главе: 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 натуральных экспериментов по определению температуры при сваривании труб и деформации элементов труб под действием, возникающих в сварном шве, напряжений.

Максимальное значение температуры зафиксировали в размере 505°C. Уменьшение температуры, при охлаждении сварочного шва, происходило по экспоненциальной зависимости.

По полученным деформациям определен изгибающий момент, максимальная величина которого составила 490 Н·м.

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 работе приведены особенности конструкции малолитражных гоночных автомобилей класса карт. Рассмотрены вопросы прочности несущей конструкции карта. Представлены основные прочностные характеристики материала AISI 1020, который был использован при конструировании рамного каркаса.

Показано, что разработка оптимальной конфигурации несущей системы малолитражного автомобиля, является необходимым шагом для разработки технологической оснастки для последующей сборки элементов этой системы.

Представлена разработанная 3D-модель стандартной компоновки малолитражного гоночного автомобиля любительской серии. В качестве материала рамы карта выбрана Сталь 20, как аналог конструкционной стали AISI 1020.

Проведенный анализ рамы на кручение позволил выявить величину жесткости в 220 Н·м/град, что для малолитражного гоночного автомобиля любительской серии является оптимальной величиной.

Выполнен анализ конструкционной прочности разработанной рамы.

Запас прочности при анализе деформации конструкции от усилий, приложенных вдоль продольной оси автомобиля составил 2 единицы, а от усилий, приложенных вне оси автомобиля – 1,3 единицы. Запас прочности при имитации бокового удара составил также 1,3 единицы. Имитация удара сзади показала более чем четырехкратный запас прочности.

Показано, что применение технологической оснастки, типа стапелей позволяет свести к минимуму появление деформаций и обеспечить окончательную итоговую точность рамы после сварки.

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 составил 45 кг. В качестве материала пластин выбрана конструкционная углеродистая сталь обыкновенного качества Ст.3.

Представлен результат натуральных экспериментов по определению температуры при сваривании труб и деформации элементов труб под действием, возникающих в сварном шве, напряжений. Максимальное значение температуры зафиксировали в размере 505°C. Уменьшение температуры, при охлаждении сварочного шва, происходило по экспоненциальной зависимости. По полученным деформациям определен изгибающий момент, максимальная величина которого составила 490 Н·м.

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 примерами иллюстраций процесса на конечно-элементной модели рамы карта и стапеля.

Выполнен прочностной расчет в модуле Static Structural, где изгибающий моменты были заданы по шагам в корреляции с температурами. Проведен поэтапно анализ деформации стапеля.

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

1. Ansys : Ansys Mechanical Finite Element Analysis (FEA) Software for Structural Engineering [Электронный ресурс] // URL: <https://www.ansys.com/products/structures/ansys-mechanical> (дата обращения 07.04.2021).
2. Coutelieris F. A., Kanavouras A. Experimentation Methodology for Engineers. Cham : Springer, 2018. 118 p.
3. DT-8835 Инфракрасный термометр (пирометр) [Электронный ресурс] // URL: <http://www.cem-instruments.ru/pirometri/dt-8835-pirometr.html> (дата обращения: 01.05.2021).
4. Hemank D. Design and Fabrication of Superkart HD-250 // International Journal of Recent Trends in Engineering. 2009. № 5. PP 125-128.
5. 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.
6. 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.
7. Segerlind L. J., Wiley J. Applied Finite Element Analysis : перевод на русский язык. М. : МИР, 1979. 98 с.
8. 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.
9. 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.
10. Деев Г. Ф., Деев Д. Г. Зона сплавления в сварном соединении : монография. СПб. : Лань, 2018. 152 с.
11. Дэниэлс Дж. Современные автомобильные технологии. М. : Астрель : АСТ, 2007. 223 с.

12. Зорин Н. Е., Зорин Е. Е. Материаловедение сварки. Сварка плавлением : учеб. пособие. СПб. : Лань, 2018. 164 с.
13. Картинг – что это такое? [Электронный ресурс] // URL: <http://fb.ru/article/316895/karting-chto-eto-takoe-razvlechenie-ili-sport> (дата обращения 18.05.2021).
14. Космин В. В. Основы научных исследований : учеб. пособие. М. : РИОР : ИНФРА-М, 2019. 237 с.
15. Ли К. Основы САПР (CAD/CAM/CAE). СПб. : Питер, 2004. 560 с.
16. Марка стали 20 [Электронный ресурс] // URL: [https://metallicheskiy-portal.ru/marki\\_metallov/stk/20/](https://metallicheskiy-portal.ru/marki_metallov/stk/20/) (дата обращения: 01.05.2021).
17. Москалев Н. С., Пронозин Я. А., Парлашкевич В. С., Корсун Н. Д. Металлические конструкции, включая сварку : учебник. М. : АСВ, 2018. 352 с.
18. Овчинников В. В. Источники питания для сварки : учебник. М. : Инфра-Инженерия, 2020. 244 с.
19. Полуавтомат GROVERS MIG 250T 4 [Электронный ресурс] // URL: [https://www.tehnosvarka.ru/catalog/oborudovanie\\_apparaty/poluavtomat\\_grovers\\_mig\\_250t.htm](https://www.tehnosvarka.ru/catalog/oborudovanie_apparaty/poluavtomat_grovers_mig_250t.htm) (дата обращения: 01.05.2021).
20. Промышленное оборудование, зажимные приспособления и кондукторы [Электронный ресурс] // URL: <http://welding.com/promyshlennoe-oborudovanie-zazhimnye-prisposobleniya-konduktory> (дата обращения 19.04.2021).
21. Развесовка карта [Электронный ресурс] // URL: <http://kartingzone.com/articles/kartweight> (дата обращения: 18.05.2021).
22. Рыжков И. Б. Основы научных исследований и изобретательства : учеб. пособие. СПб. : Лань, 2019. 224 с.
23. Сварочно-сборочные столы [Электронный ресурс] // URL: <http://tolyatti.regmarkets.ru/svarочно-sborочnye-stoly--52198/> (дата обращения: 19.04.2021).

24. Сорокин В. Г., Волосникова А. В., Вяткин С.А. Марочник сталей и сплавов. М. : Машиностроение, 1989. 640 с.
25. Соснин Э. А., Пойзнер Б. Н. Методология эксперимента : учеб. пособие. М. : ИНФРА-М, 2019. 162 с.
26. Сталь Ст3 [Электронный ресурс] // URL: [https://metallichekiy-portal.ru/marki\\_metallov/stk/St3](https://metallichekiy-portal.ru/marki_metallov/stk/St3) (дата обращения: 01.05.2021).
27. Трехмерное моделирование деталей и сборочных единиц в системе КОМПАС-3D [Электронный ресурс] // URL: <https://unecon.ru/askon/kursy/kompas-3d> (дата обращения 15.03.2021).
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: 18.05.2021).
30. Устройство гоночного автомобиля карт [Электронный ресурс] // URL: <https://kartodrom.com.ua/news/articles/ustroistvo-gonochnogo-avtomobilya-kart> (дата обращения: 18.05.2021).
31. 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. 205-208.