

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)

13.03.03 Энергетическое машиностроение
(код и наименование направления подготовки / специальности)

Проектирование и эксплуатация автомобилей с гибридными силовыми установками
(направленность (профиль) / специализация)

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)**

на тему Разработка несущей пространственной рамы болида “Formula Student”

Обучающийся

А.Д. Серебrenников
(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

канд. техн. наук, доцент А.В. Бобровский
(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Консультант

канд. фил. наук, доцент М.М. Бажутина
(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Тольятти 2025

Аннотация

Выпускная квалификационная работа посвящена разработке новой конструкции пространственной рамы болида класса Formula Student. Главной задачей исследования является создание жёсткой, технологичной и соответствующей регламенту конструкции, которая обеспечит надёжную фиксацию агрегатов и безопасность пилота при минимальной массе изделия. В работе представлены результаты анализа требований Formula Student Rules 2025, а также конструктивных решений, реализованных в предыдущих версиях болида и в зарубежных командах-участниках. На основании полученных данных разработана новая конструкция, выполнена её трёхмерная модель и проведён конечно-элементный анализ. Уделено внимание прочностным характеристикам, крутильной жёсткости, соответствию антропометрическим шаблонам и шаблонам проверки технической инспекцией.

Разработанная рама отличается улучшенной геометрией, оптимизированной под ключевые нагруженные зоны, и обеспечивает надёжную интеграцию с подвеской, силовой установкой и системой удержания пилота. Полученные результаты рекомендованы к использованию в дальнейших итерациях разработки студенческого гоночного болида.

Выпускная квалификационная работа состоит из пояснительной записки в размере 47 страниц, содержащей 3 таблицы, 29 рисунков и графической части, содержащей 6 листов.

Abstract

The bachelor's thesis focuses on the development of a new tubular space frame for a Formula Student class race car. The main objective is to design a structurally sound and regulation-compliant frame that ensures safety and rigidity while minimizing overall weight and simplifying manufacturing.

The project includes an in-depth review of the current Formula Student Rules 2025, as well as benchmarking of previous designs developed by the team and international competitors. Based on this comparative analysis, a new concept was developed using CAD tools, with the emphasis on packaging efficiency, structural integrity, and manufacturability. The model was then subjected to finite element analysis under typical load cases, such as frontal, side, and rollover impacts.

Special attention was paid to torsional stiffness, ergonomic compliance with cockpit and Percy templates, mounting zones for key subsystems such as the suspension, powertrain, and safety harness points. Additionally, weldability and material selection were considered to meet both technical and economic requirements.

The resulting structure demonstrates an improved stiffness-to-weight ratio and enhanced integration with vehicle components, while satisfying competition regulations. The frame is recommended as a baseline for further development and prototyping in future seasons.

The bachelor's thesis consists of 47 pages, 3 tables, 29 figures, and 6 drawings.

Содержание

Введение.....	5
1 Состояние вопроса	7
1.1 Характеристика соревнований Formula Student	7
1.2 Несущая система автомобиля: типы и функции	8
1.3 Несущие системы гражданских автомобилей: конструкции и особенности.....	10
2 Исследование вводных данных	13
2.1 Определение конструктивных параметров автомобиля.	13
2.2 Анализ конструкций рам других команд Formula Student.....	15
3 Проектирование и расчет	24
3.1 Определение исходных данных	24
3.2 Проектирование конструкции.....	26
4 Техничко-экономическое обоснование	37
4.1 Расчет себестоимости сварочных работ	37
4.2 Расчет себестоимости ручной резки	40
4.3 Расчет себестоимости покрасочных работ	42
4.4 Общий расчет себестоимости технологических процессов.....	43
Заключение	45
Список используемой литературы и используемых источников.....	46

Введение

Formula Student – это международный инженерный конкурс, объединяющий студентов технических вузов со всего мира в стремлении спроектировать, собрать и испытать полнофункциональный гоночный болид. Конкуренция, выходящая за рамки национальных границ, требует не только технических знаний, но и умения принимать грамотные проектные решения, опираясь на реальный инженерный опыт, стандарты и ресурсы команды.

Соревнования Formula Student ведут свою историю с 1981 года, когда в США был впервые проведён студенческий инженерный конкурс Formula SAE. Первоначально он носил учебный характер и был ориентирован на развитие проектного мышления у студентов, однако уже в 1990-х годах движение вышло за пределы Северной Америки. В Европе соревнования стартовали с Formula Student UK (Сильверстоун), а позже – в Германии, Италии, Австрии, Венгрии и других странах. В России первые официальные старты прошли в 2012 году, и с тех пор интерес к серии устойчиво растёт.

Современные соревнования включают в себя как класс болидов с ДВС (CV), так и с электрической силовой установкой (EV), а также автономные болиды (DV). Помимо трассовых дисциплин, оцениваются проектные решения, бизнес-обоснование и конструкторская документация. При этом особое внимание уделяется безопасности водителя и соответствию конструкции жёстким требованиям регламента.

Одним из ключевых элементов болида является несущая система, от которой зависит не только пространственная компоновка узлов, но и общая жёсткость, безопасность и соответствие техническому регламенту соревнований. В рамках Formula Student именно рама – будь то трубчатая конструкция или композитный монокок – служит основой, на которой строится весь болид. При этом каждый год регламент соревнований актуализируется, вводя новые требования, особенно в части безопасности пилота и соответствия шаблонам проверки. Актуальные изменения 2025 года

требуют от команд особого внимания к точкам крепления ремней, зазору над шлемом и жёсткости конструкции.

Целью данной работы является разработка новой пространственной рамной конструкции для болида Formula Student, обеспечивающей повышенную жёсткость при минимальной массе, с учётом всех действующих требований регламента.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

- провести анализ действующего регламента Formula Student 2025 года применительно к конструкции рамы;
- изучить существующие подходы к проектированию рам в командах-участниках соревнований;
- сформировать исходные проектные данные на основе компоновки болида;
- разработать и оптимизировать конструкцию рамы в CAD-среде;
- выполнить конечно-элементный прочностной расчёт рамы;
- оценить соответствие конструкции установленным критериям (шаблоны Percy, Cockpit, Section, SES).

Научно-техническая значимость данной работы заключается в попытке сбалансировать конструкторскую простоту, производственную реализацию и техническое соответствие современным международным требованиям. Практическая ценность проекта определяется возможностью внедрения разработанной конструкции в состав болида нового сезона Formula Student.

1 Состояние вопроса

1.1 Характеристика соревнований Formula Student

Formula Student – это международные инженерные соревнования, целью которых является практическая реализация теоретических знаний студентов в виде разработки и изготовления прототипа гоночного болида. Главной особенностью соревнований является ориентация не только на динамические показатели автомобиля, но и на комплексную инженерную, экономическую и презентационную составляющие проекта.

Соревнования проходят на ежегодной основе в различных странах Европы и мира, включая Германию, Великобританию, Австрию, Венгрию, Нидерланды, Китай, а также Россию. Все этапы подчиняются единому международному техническому регламенту Formula Student Rules, который регулярно обновляется и определяет требования к конструкции, безопасности и процессу оценки.

Участие в Formula Student предполагает прохождение двух больших групп испытаний: статических и динамических.

К статическим дисциплинам относятся: защита инженерного проекта и обоснование технических решений (Engineering Design Event), экономический анализ и модель стоимости серийного производства (Cost and Manufacturing Event), презентация бизнес-идеи с учётом рыночной стратегии (Business Plan Presentation).

Динамическая часть включает в себя: ускорение (Acceleration) – измерение времени разгона; Восьмерка (Skidpad); автокросс (Autocross) – скоростное прохождение трассы с поворотами; заезд на выносливость (Endurance) – гонка на 22 км; оценка эффективности (Efficiency) – расчёт расхода энергии за пройденную дистанцию.

Перед участием в динамических испытаниях каждый болид проходит техническую инспекцию, включающую проверку жесткости рамы,

безопасности электросистемы (для EV), тест на шум, тормоза и устойчивость автомобиля.

Соревновательные классы подразделяются на: CV (Combustion Vehicle) – болиды с двигателем внутреннего сгорания; EV (Electric Vehicle) – электрические болиды с системой высоковольтного питания; DV (Driverless Vehicle) – автономные платформы, управляемые системой навигации и сенсорами [16].

Российские команды преимущественно выступают в классах CV и EV. При этом переход к электроприводу требует более строгого подхода к проектированию несущих и защитных систем, включая аккумуляторный контейнер.

Рама болида, как основа несущей структуры, играет ключевую роль в реализации проекта – она объединяет в себе требования прочности, компоновки, технологичности и соответствия строгим параметрам инспекции. Именно конструкция рамы определяет потенциал болида в дисциплинах жёсткости, управляемости и общей надёжности.

1.2 Несущая система автомобиля: типы и функции

Несущая система автомобиля выполняет ключевую роль в обеспечении целостности конструкции, распределении нагрузок и интеграции всех функциональных узлов в единую пространственную компоновку. В рамках проектирования болида класса Formula Student выбор и конструктивное исполнение несущей системы определяет не только прочностные характеристики машины, но и её соответствие требованиям технического регламента [19].

В контексте студенческого болида несущая система должна обеспечивать:

- геометрическую жёсткость конструкции при всех режимах нагружения (ускорение, торможение, повороты, крены);

- защиту пилота при опрокидывании и ударных воздействиях;
- надёжные точки крепления для подвески, силового агрегата, аккумуляторных батарей, рулевого механизма, ремней безопасности;
- соответствие установленным шаблонам инспекции (Cockpit - шаблон вертикальный, Cross Section – шаблон горизонтальный, Percy – шаблон человека 95 процентиля).

В современных болидах Formula Student применяются три основных типа несущих систем [4].

Пространственная рамная конструкция – наиболее распространённый вариант. Представляет собой сварной каркас из круглых труб (обычно стальных, реже – алюминиевых или титановых), расположенных в соответствии с принципами триангуляции. Преимущества: простота изготовления, ремонтпригодность, стабильные прочностные характеристики. Недостатки: сравнительно высокая масса, сложность повышения жёсткости без увеличения габаритов и веса.

Полумонокок – комбинированный подход, при котором передняя часть кокпита выполняется из композитного сэндвича (углеволокно + сердцевина), а задняя часть остаётся рамной. Позволяет выиграть в массе и жёсткости в области, где находятся пилот и органы управления. Преимущества: снижение массы, возможность повышения жёсткости передней секции. Ограничения: необходимость в тестировании композитных панелей на соответствие требованиям SES (Structural Equivalency Spreadsheet) и наличии лабораторной базы.

Полный монокок – полностью композитная конструкция (чаще всего – углеродное волокно на эпоксидной матрице), воспринимающая все внешние и внутренние нагрузки. Плюсы: минимальный вес, высокая удельная жёсткость, лучшая аэродинамическая интеграция. Минусы: высокая стоимость, сложность в проектировании и верификации (обязателен SES с физическими тестами), плохая ремонтпригодность.

Выбор типа несущей системы зависит от:

- бюджета проекта и доступных производственных технологий;
- уровня подготовки инженерной команды;
- наличия оборудования для сварки, формовки, автоклава или вакуумной пропитки;
- стратегических целей: надёжность, лёгкость, оригинальность, простота сертификации.

В рамках данной работы в качестве основы принята пространственная рамная конструкция, как наиболее технологически доступная и проверенная концепция, соответствующая регламенту Formula Student 2025 и опыту команды.

1.3 Несущие системы гражданских автомобилей: конструкции и особенности

Конструктивная схема несущей системы определяет общую архитектуру транспортного средства и оказывает влияние на его массу, прочность, безопасность и ремонтпригодность. В серийных автомобилях применяются различные виды несущих структур, выбор которых зависит от назначения автомобиля, условий эксплуатации и требований к производству.

Рамные конструкции: несущая рама представляет собой основу автомобиля, на которую монтируются все основные агрегаты и кузов. Такая схема характерна для машин, работающих в тяжёлых условиях: внедорожников, грузовиков, спецтехники.

Типы рам, применяемых на автомобиле, могут быть нескольких типов, далее разберем основные.

Лестничная – два продольных лонжерона, соединённые поперечинами. Простота, высокая вертикальная прочность, низкая крутильная жёсткость (рисунок 1).

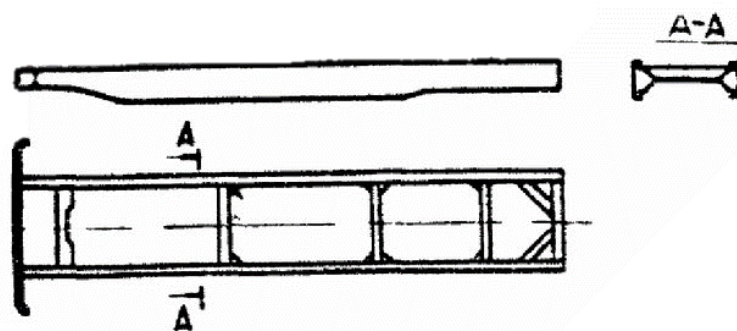


Рисунок 1 – Пример лестничной рамы автомобиля

Х-образная – диагональные связи в центре. Повышенная жёсткость в центре, но ограничена по защите при боковых ударах (рисунок 2).



Рисунок 2 – Пример Х-образной рамы автомобиля

С подрамниками – силовые элементы для агрегатов, сочетаемые с кузовом. Распространённое решение в среднетоннажных ТС.

Коробчатая (замкнутая) – замкнутые профили с высокой жёсткостью и прочностью.

Конструкция несущего кузова: кузов воспринимает нагрузки, играет роль несущей оболочки. Включает пороги, стойки, лонжероны, поперечины пола, крыши, усилители зон.

Методы усиления кузова:

- применение высокопрочной стали в стойках и порогах;
- вставки и косынки в зонах повышенных нагрузок;
- дополнительные поперечные балки;
- клеевые соединения и лазерная сварка;
- замкнутые кольца жёсткости (торсионные контуры).

Комбинированные платформы: совмещают несущие элементы кузова с функциональными силовыми модулями, особенно в электромобилях.

Выводы по разделу

В ходе анализа состояния вопроса установлено, что современная инженерная практика в Formula Student требует строгого соответствия регламентам, высокой точности проектных решений и глубокого понимания конструктивных особенностей несущих систем болида. Были изучены типы конструкций, включая пространственные рамы, а также принципы жёсткости и эргономики. Проведён обзор существующих решений, что позволило выявить сильные и слабые стороны различных конструктивных подходов, включая триангуляцию и использование коробчатых сечений.

2 Исследование вводных данных

2.1 Определение конструктивных параметров автомобиля.

Проектирование новой пространственной рамы начинается с определения ключевых габаритных, компоновочных и конструктивных параметров автомобиля, а также анализа требований регламента и текущих инженерных задач [5]. Принятые решения напрямую влияют на конструкцию несущей системы, прочностные характеристики и соответствие шаблонам технической инспекции.

Габаритные и конструктивные параметры болида:

- передняя колея – 1200 мм;
- задняя колея – 1170 мм;
- колёсная база – 1540 мм;
- масса (без пилота) – около 220 кг;
- габаритная ширина – 1444 мм;
- габаритная высота – 1136 мм;
- распределение массы по осям – 40% (перед), 60% (зад).

Указанные значения подобраны с целью достижения стабильного поведения автомобиля в условиях разгона, поворота и торможения, а также соответствия допустимым габаритам по регламенту.

Материалы и сечения труб:

Конструкция новой рамы предусматривает использование труб диаметром 30 мм и толщиной стенки 2 мм в зонах главной и передней дуги, что превышает минимальные требования регламента Formula Student Rules 2025 [18] по площади сечения и моменту инерции. Это обеспечивает дополнительный запас прочности и повышенную жёсткость, особенно в зоне крепления ремней и при боковых ударах.

Модификации текущего сезона:

Высота главной дуги (Main Ноор) увеличена на 25 мм. Это изменение вызвано антропометрическими особенностями новых пилотов команды: увеличившаяся длина торса потребовала перерасчёта зазора над шлемом в соответствии с шаблоном Percy и пунктом T4.2 регламента [18].

Реализован новый подход к гибу дуги: увеличен радиус изгиба, что позволяет снизить остаточные напряжения, уменьшить вероятность локального смятия профиля и обеспечить более точную посадку при сварке.

Уточнены координаты посадки шаблонов Percy, Cockpit и поперечного сечения в соответствии с актуализированными данными по посадке пилота, высоте шлема и положению плеч.

Сравнение с предыдущими решениями:

В прошлых поколениях конструкции применялись трубы диаметром 25 мм с толщиной стенки 2,5 мм в зонах основной структуры. Несмотря на соответствие минимальным требованиям регламента, данный выбор приводил к увеличению массы конструкции без значительного прироста жёсткости.

В текущем проекте принято решение заменить указанные элементы на трубы 30×2 мм, что позволило:

- сохранить или повысить момент инерции поперечного сечения;
- снизить массу конструкции;
- улучшить удобство обработки при гибке и сварке;
- обеспечить больший радиусгиба с меньшим риском деформации.

Такой подход является компромиссом между требуемой прочностью, технологичностью изготовления и общей массой рамы. По результатам FEM-анализа, данный тип труб обеспечивает достаточную жёсткость в критических зонах при меньшей массе по сравнению с предыдущими поколениями болида.

2.2 Анализ конструкций рам других команд Formula Student

Анализ позволяет выявить как эффективные инженерные подходы, так и распространённые ошибки, которых следует избегать при проектировании [6].

Большинство команд применяют трубчатую пространственную раму, выполненную из стальных труб круглого сечения [3]. Встречаются и более сложные реализации с комбинированными элементами или полумонококом (передняя часть – композит, задняя – рама) [16].

Команда FaSTTUBe использует сложную пространственную раму (рисунок 3).



Рисунок 3 – Рама команды FaSTTUBe

В передней части мы видим съемную AIP (от англ. Anti Intrusion Plate – «анти инерционная пластина»), что очень удобно для ремонта и обслуживания автомобиля (при оценке структуры организаторами соревнований требует более тщательного осмотра и проверки, а также со стороны команды требуется

предоставить большее количество доказательств жесткости конструкции при фронтальном ударе). Х-образные распорки передней перегородки, а также сложная конструкция в передней части обусловлена подвеской автомобиля, у которого амортизаторы располагаются в верхней части рамы. Трубы в узлах приходят не непосредственно в другую трубу, а в перпендикулярно расположенную трубу. При изготовлении данное решение проще в реализации, однако создаются мягкие локальные зоны. Передняя дуга, главная дуга, а также верхняя труба зоны бокового удара произведены из трубы внешним диаметром 30 мм, толщина стенки 2 мм.

В задней части рамы распорки главной дуги идут не напрямую, а образуют узел с креплением плечевых ремней, что отлично сказывается на прохождении технической инспекции, т. к. в данном случае нагрузка в 13 кН будет распределяться очень равномерно по главной дуге, а также зоне бокового удара благодаря имеющимся распоркам к узлам.

По официальным данным данная конструкция весит 35 кг, что является внушительным весом, к этому привела сложная конструкция с большим количеством труб.

Команда Pravega racing использует простую трубную раму (рисунок 4).



Рисунок 4 – Рама команды Pravega racing

В передней части минимальное количество необходимых труб, что обеспечивает меньший вес, а также сбалансированную жесткость конструкции, в зоне бокового удара очень распорка передней дуги сделана с небольшим выносом, это обеспечивает меньший вес, но может привести к локальным концентрациям напряжений, что требует дополнительного анализа конструкции.

На рисунке 5 показано распределение нагрузки при ударе в переднюю дугу, а также деформации, переходящие в зону бокового удара. В задней части рамы труба для крепления плечевых ремней имеет три распорки, что перегружает конструкцию. Одной триангулирующей трубы было бы достаточно для выдерживания удара силой 13 кН.

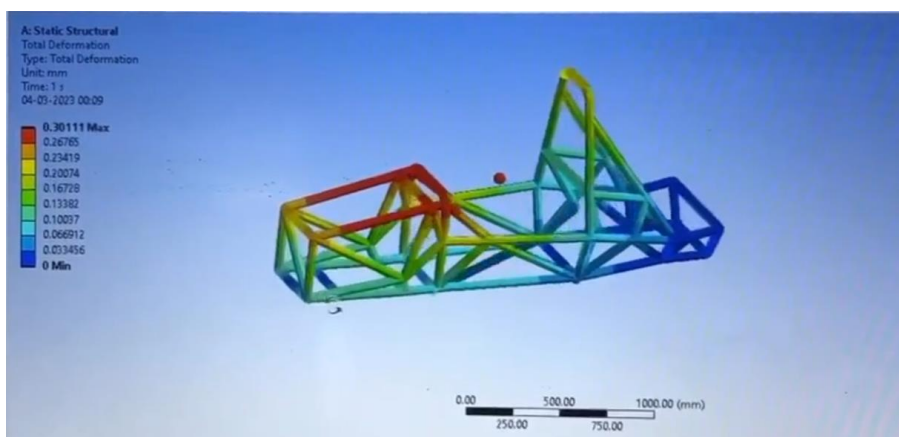


Рисунок 5 – Нагруженная рама команды Pravega racing

При разработке рамы командой Drift racing применяются неоправданные решения: на главной дуге есть распорка для крепления ремней безопасности, которая не сможет выдержать нагрузку в 13 кН, т. к. отсутствуют распорки (рисунок 6).

Также ниже данной трубы присутствует распорка между узлами зоны бокового удара. Распорки главной дуги приходят достаточно низко, что, вероятно, необходимо для размещения двигателя, а также трансмиссии.



Рисунок 6 – Рама команды Drift racing

Плохой пример усложнения рамы, в передней части рамы применяется сложная конструкция, которая не имеет значительного применения, а значит утяжеляет конструкцию необоснованно (рисунок 7). В местах, которых это не требуется, данная команда разрабатывает электрическую машину, в которой действительно необходимо делать защитные трубы в зоне крепления аккумулятора, а также в зоне мотора (рисунок 8).

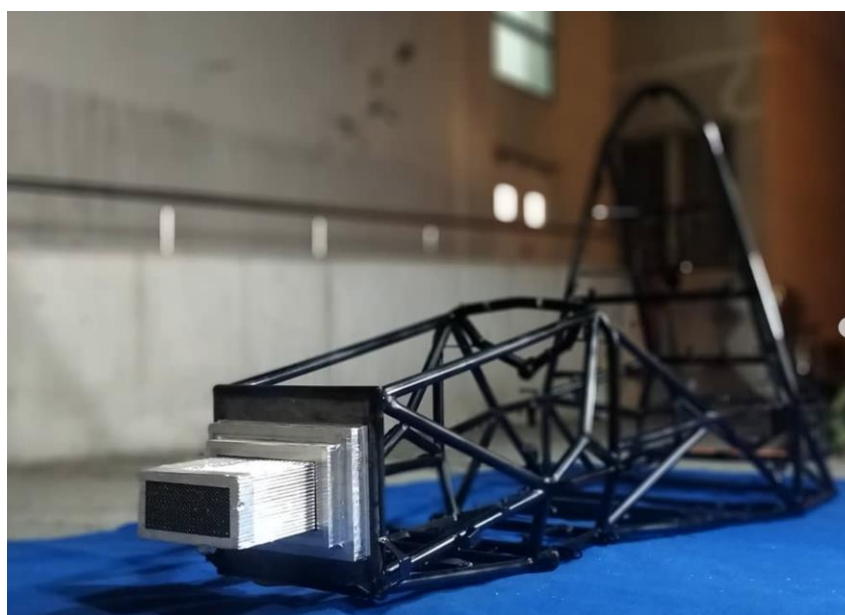


Рисунок 7 – Рама команды ИТ Bombay Racing



Рисунок 8 – Рама команды ИТ Bombay Racing

Данная команда использует практичные и качественные решения, применяются интересные решения с гнутыми креплениями двигателя в задней части рамы, в передней части X-образные крестовины в верхней части рамы используются для создания локально жесткости в местах крепления передней подвески, а также амортизаторов (рисунок 9).



Рисунок 9 – Рама команды UC Berkeley Formula

Следующая рама не соответствует техническому регламенту Formula Student, т. к. отсутствуют некоторые элементы, которые обеспечивают триангуляцию. Также отсутствуют распорки передней перегородки, что является основанием для недопуска команды на соревнования. В зоне бокового удара присутствует горизонтальная распорка, которая не образует узла, что недопустимо (рисунок 10).

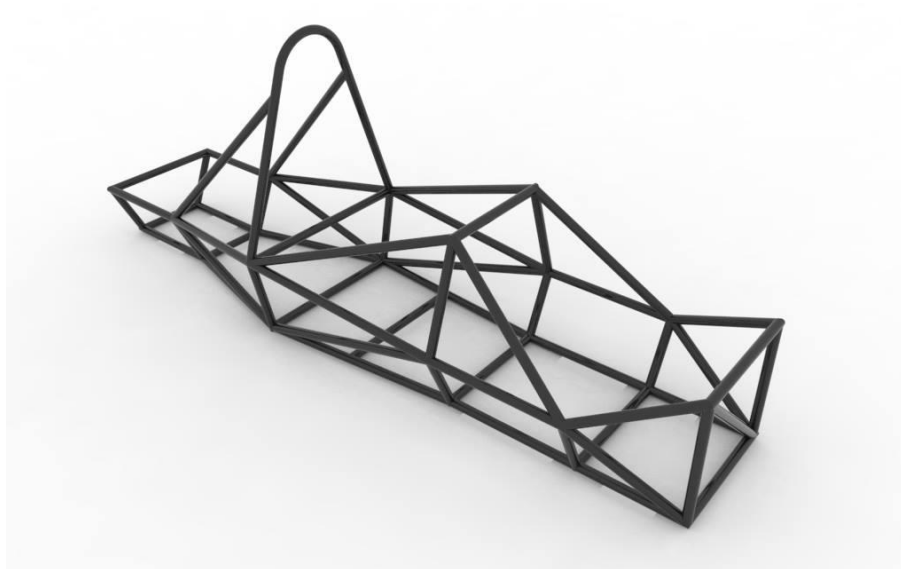


Рисунок 10 – Рама команды Ultimate Formula ONE Racers

Данная команда имеет хорошую конструкцию рамы, она продумана, все трубы приходят в узел и образуют крепкую и легкую конструкцию, передняя перегородка выполнена из алюминия, что снижает вес конструкции (рисунок 11).



Рисунок 11 – Рама команды MIT Motorsports

Итальянская команда представляет хорошую конструкцию, но применяет решения, которые недопустимы по регламенту Formula Student. Как мы можем увидеть на изображениях (рисунок 12), распорки передней дуги выполнены из трубы диаметром меньше 25 мм, также распорки приходят не в гиб передней дуги, а чуть ниже, что недопустимо. На нагруженной раме мы можем заметить хорошее распределение нагрузок, в основном всю нагрузку на себя берет передняя дуга, а также распорка передней перегородки и главной дуги (рисунок 13). Также трубы с внешним диаметром меньше 25 мм (рисунок 14). Можно заметить в нижней части у распорки главной дуги, а также передней дуги.

В передней части рамы мы видим включение точек крепления педального узла в силовую конструкцию рамы, а также применение дополнительной передней гули, для точек крепления передней подвески. Зато в задней части рамы применяется хорошее решение, труба крепления ремней безопасности имеет одну распорку, данное решение рационально.

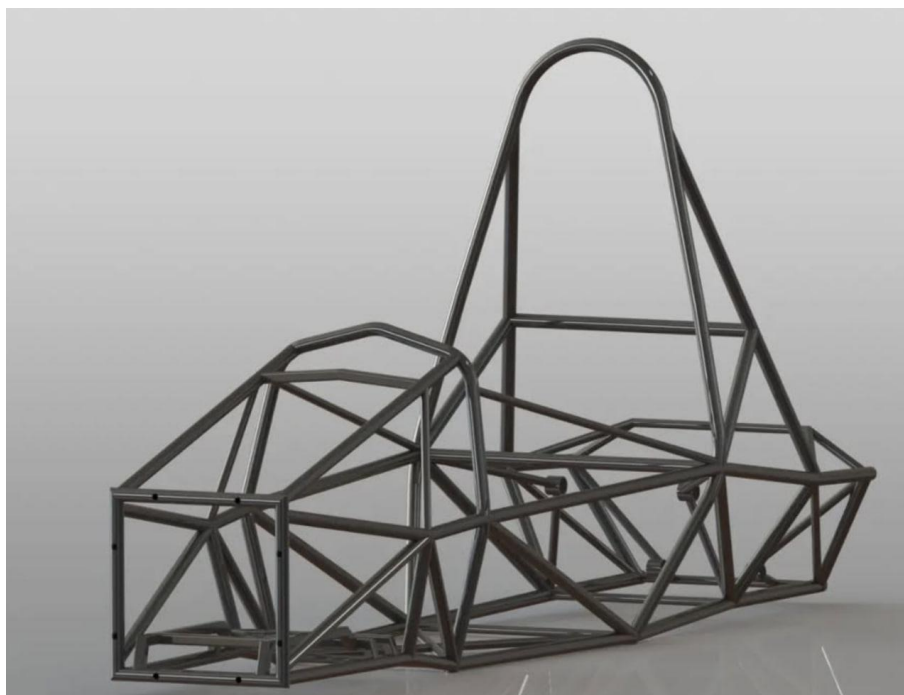


Рисунок 12 – Рама команды Firenze Race Team

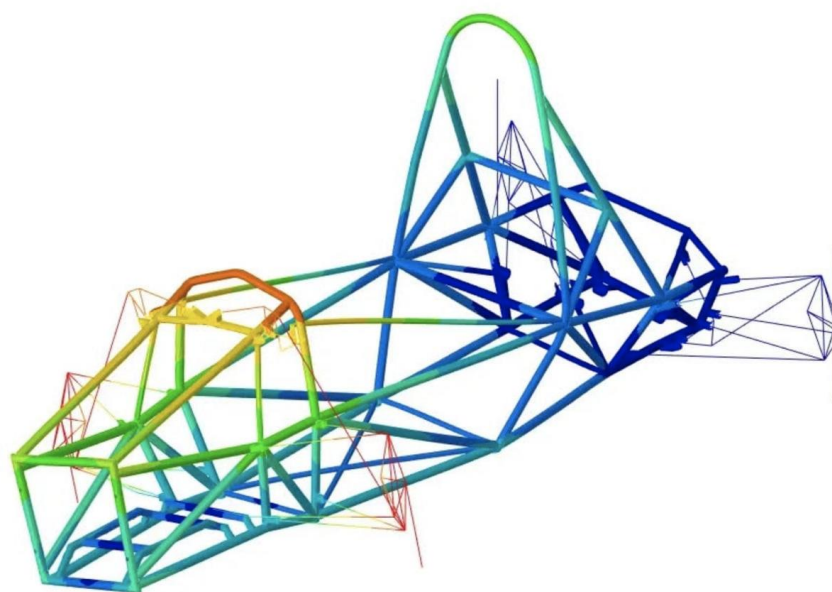


Рисунок 13 – Нагруженная рама команды Firenze Race Team

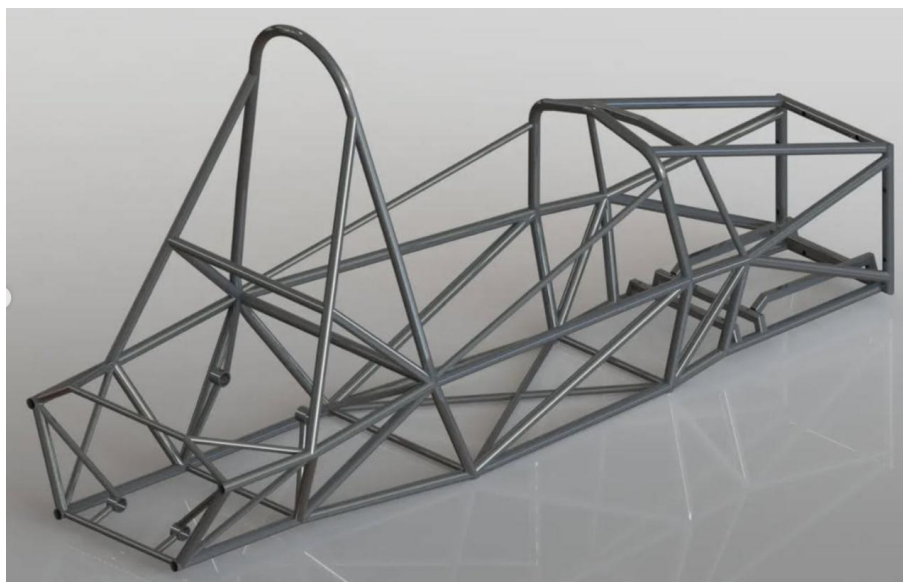


Рисунок 14 – Рама команды Firenze Race Team, вид сзади

Выводы по разделу

Определены ключевые габаритные параметры болида, включая колею, базу и распределение массы, что позволило заложить устойчивую и управляемую базу для дальнейшего проектирования. Также проведён анализ требований регламента Formula Student и особенностей пилотов команды, что послужило основой для геометрических изменений, в частности увеличения высоты главной дуги и применения труб с улучшенными прочностными характеристиками.

3 Проектирование и расчет

3.1 Определение исходных данных

Проектирование пространственной рамы начинается с понимания всех исходных данных, для чего определяются основные технические требования, а также ожидания [2]. В этом году мы хотели изменить несколько ключевых ошибок предыдущего шасси автомобиля:

1. Применение более простого в производствегиба главной дуги, т.к. при производстве предыдущих главных дуг необходимо было делать очень много попыток для получения трубы без приплюснутости в верхней части дуги.

2. Создание более жесткой структуры в центральной части рамы, т.к. прохождение технической комиссии было ужесточено и в предыдущие два года мы столкнулись с проблемами при проверке точек крепления ремней безопасности.

Также были определены базовые параметры автомобиля:

- передняя колея,
- задняя колея,
- колесная база,
- габаритная высота автомобиля,
- двигатель, размеры, точки крепления, внешние скоростные характеристики.

При проектировании проводились расчеты:

1. Расчёт крутильной жёсткости.

Цель расчёта – определить способность рамы сопротивляться скручиванию, возникающему при диагональной нагрузке на переднюю подвеску. Это напрямую влияет на отзывчивость рулевого управления и общее поведение болида в повороте [17].

Постановка задачи: задняя ось рамы фиксируется жёстко. К точкам крепления передних амортизаторов прикладываются противоположно направленные вертикальные силы по 1500 Н каждая. Расстояние между точками – 1200 мм (передняя колея).

2. Торможение.

Симулируется нагрузка от экстренного торможения болида. Масса болида с пилотом: около 290 кг. Ускорение: 1.5g.

Продольная сила F , приложенная к точкам крепления передней подвески, рассчитывается по формуле (1):

$$F = m \times g \times l, \quad (1)$$

где m – масса автомобиля, кг;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

l – половина длины передней колеи автомобиля, м.

$$F = 290 \times 9,81 \times 1,5 = 4270 \text{ Н}$$

Нагрузка распределяется на переднюю часть рамы.

3. Поворот.

При боковом ускорении 1.8g скручивание воздействует на боковые диагонали, главную дугу и узлы с передней дугой. Усилия до 4000 Н передаются через рычаги и амортизаторы.

4. Крепления ремней безопасности.

Согласно регламенту точки крепления ремней, должны выдерживать следующие нагрузки:

- плечевые ремни – 13 кН,
- опоясывающие ремни – 13 кН,
- паховые ремни – 6,5 кН.

Данный расчет был ключевым для нашей команды, т.к. при прохождении технической инспекции к данным местам применяется тщательная проверка [18].

5. Модальный анализ.

Проводится для исключения резонансных частот. Находятся собственные формы колебаний рамы, исключаются совпадения с рабочими частотами двигателя, подвески, а также аэродинамических элементов.

3.2 Проектирование конструкции

Проектирование пространственной рамы болида основывается на анализе нагрузок, передаваемых от подвески, пилота и силовой установки. Главная цель – достижение высокой жёсткости при сохранении минимальной массы конструкции. Особое внимание уделяется точкам крепления ремней безопасности, главной дуге и зонам, воспринимающим фронтальные и боковые удары [7, 18, 20].

В ходе работы были проведены расчеты итерационным методом, для ускорения процесса проектирования конструкция проектировалась с помощью каркасного моделирования, которое позволяет быстро оценить прочностные характеристики [10, 11, 15].

В ходе проектирования было проверено пять схем силовой структуры рамы, а также производился подбор сечения труб для соответствия требованиям технического регламента [12].

3.2.1 Первая конструкция рамы

Изначально была заложена конструкция с измененной структурой бокового удара:

- распорка передней дуги приходит в главную дугу;
- уменьшение количества триангуляция в связи с изменением количества узлов в зоне бокового удара.

Также было принято решение о применении трубы сечением 30 мм, толщина стенки 2 мм, т. к. данная труба удовлетворяет требованиям технического регламента, а также позволяет сэкономить 7% веса и является более устойчивой при ударе, т. к. момент инерции больше на 35% [13].

При проведении нагрузок была выявлена недостаточная жесткость конструкции, 634 МПа, что превышает допустимые напряжения равные 380 МПа, а также деформация трубы на 100 мм (допускается деформация трубы до 25 мм) [17]. Наложены ограничения, жесткая заделка в точках крепления подвески, приложены силы в точках крепления ремней безопасности, 6500 Н в точках крепления паховых ремней, а также 13000 Н в точках крепления опоясывающих ремней (рисунок 15).

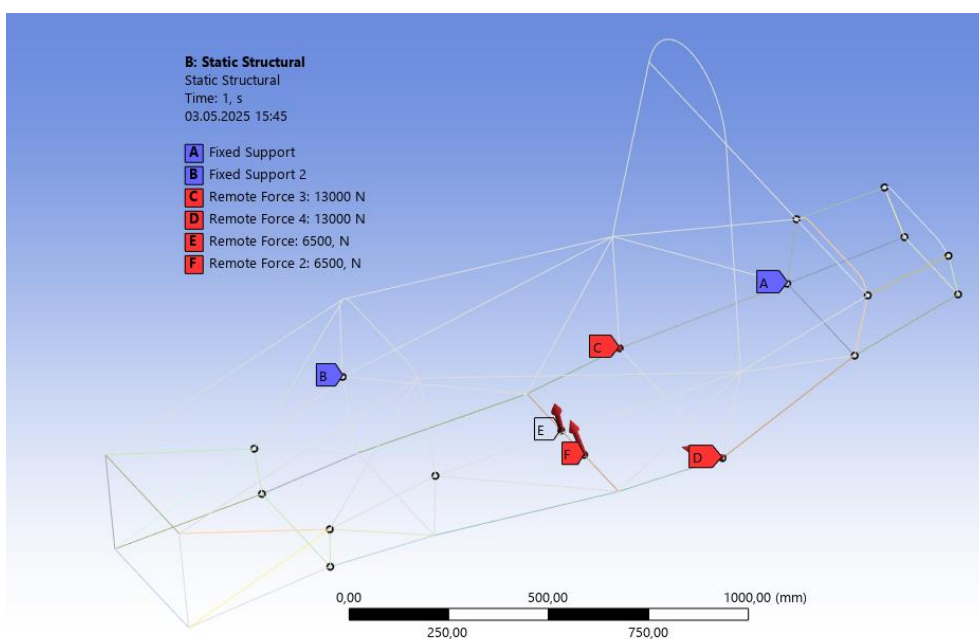


Рисунок 15 – Приложенные нагрузки на раму в первой итерации

Мы видим, что нагрузка сосредотачивается в узле, что очень критично, также в трубах напряжения превышают допустимые 380 МПа (рисунок 16).

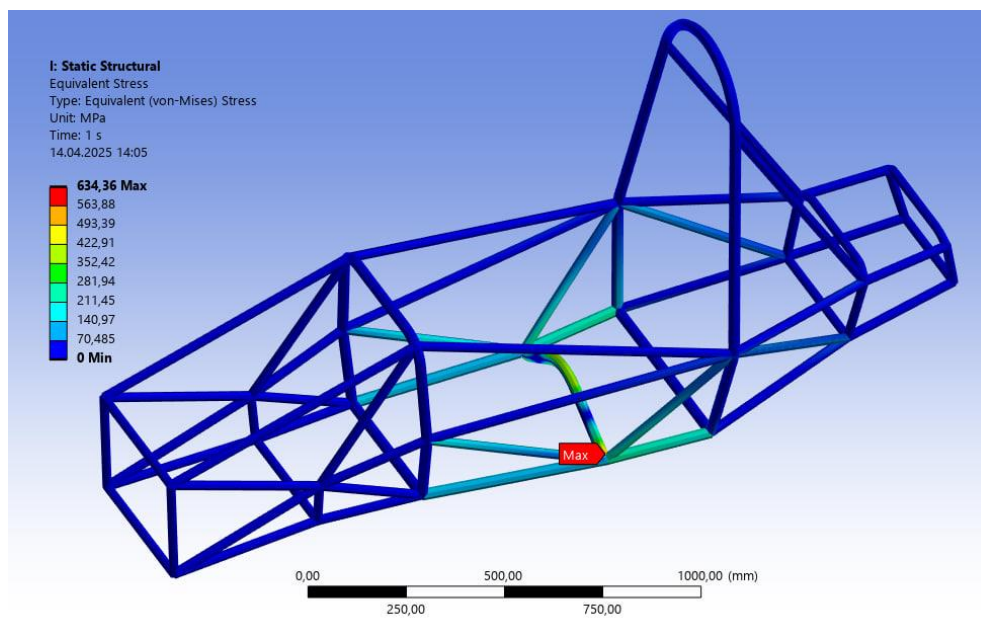


Рисунок 16 – Распределение напряжений в первой итерации рамы

При оценке деформаций (рисунок 17) становится понятно, что труба креплений паховых ремней «вытянулась» вверх на 100 мм, что является недопустимым.

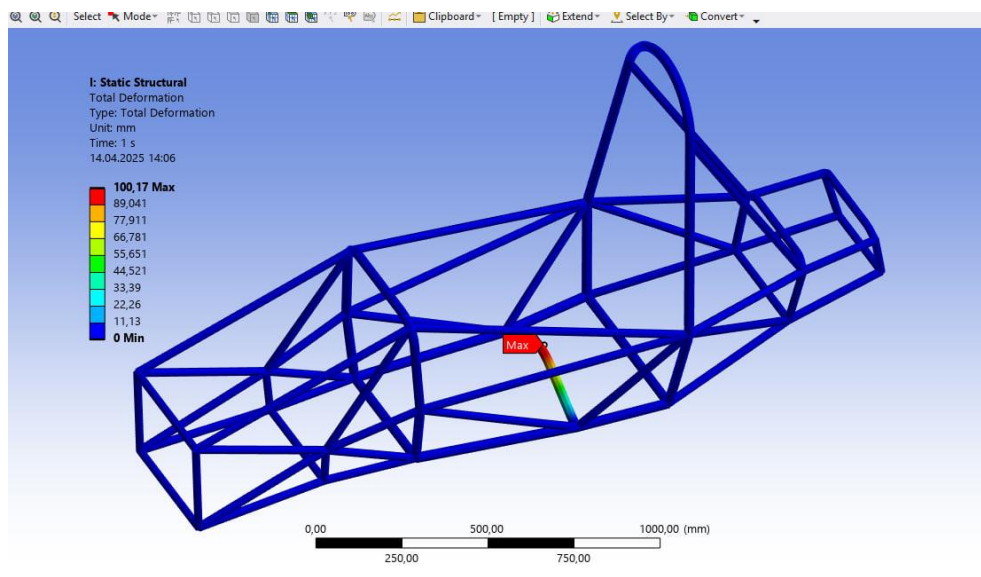


Рисунок 17 – Деформации при приложенной нагрузке в первой итерации рамы

Вес данной конструкции по расчетам в САПР-программе равна 29 980 г.

3.2.2 Вторая версия конструкции рамы

Первичное решение по решению проблемы превышающих допустимые напряжения было усиление рамы с помощью диагональных распорок в нижней части силовой конструкции [15].

Ограничения и приложенные нагрузки отображены на рисунке 18.

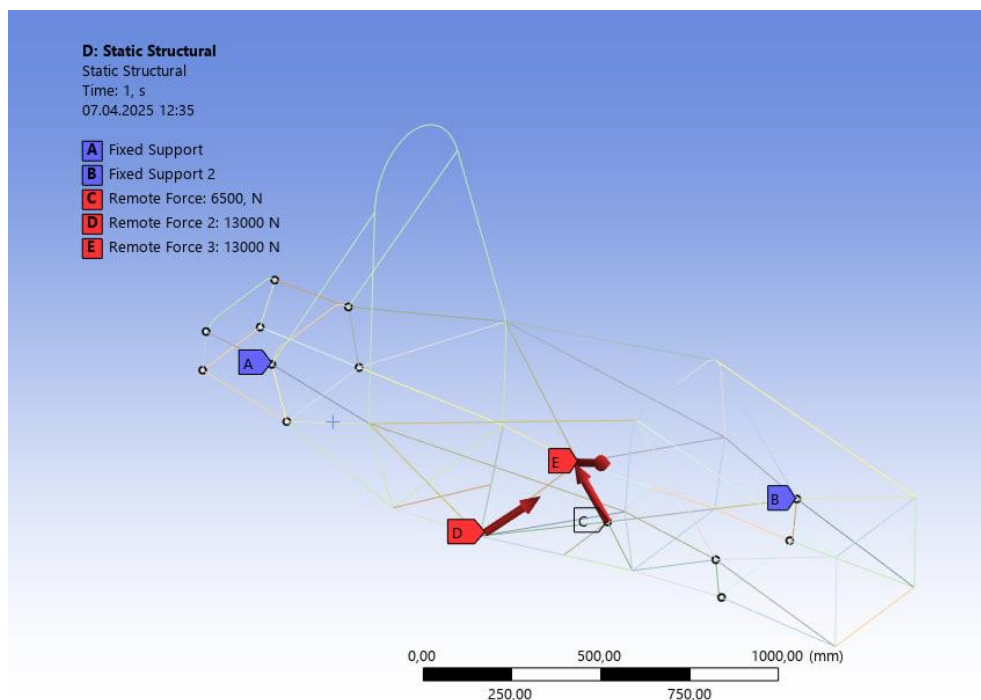


Рисунок 18 – Приложенные нагрузки ко второй итерации рамы

При проведении нагрузки было выявлено следующее:

- диагональные распорки достаточно хорошо поглощают напряжения в конструкции;
- отсутствие распорок в вертикальном направлении приводит к изгибанию всего узла по оси Z;
- максимальные напряжения равны 269 МПа (рисунок 19);
- максимальные перемещения равны 2,8 мм (рисунок 20);
- конструкция удовлетворяет регламенту Formula Student;

- добавление диагоналей приводит к увеличению веса рамы на 2,2 кг.

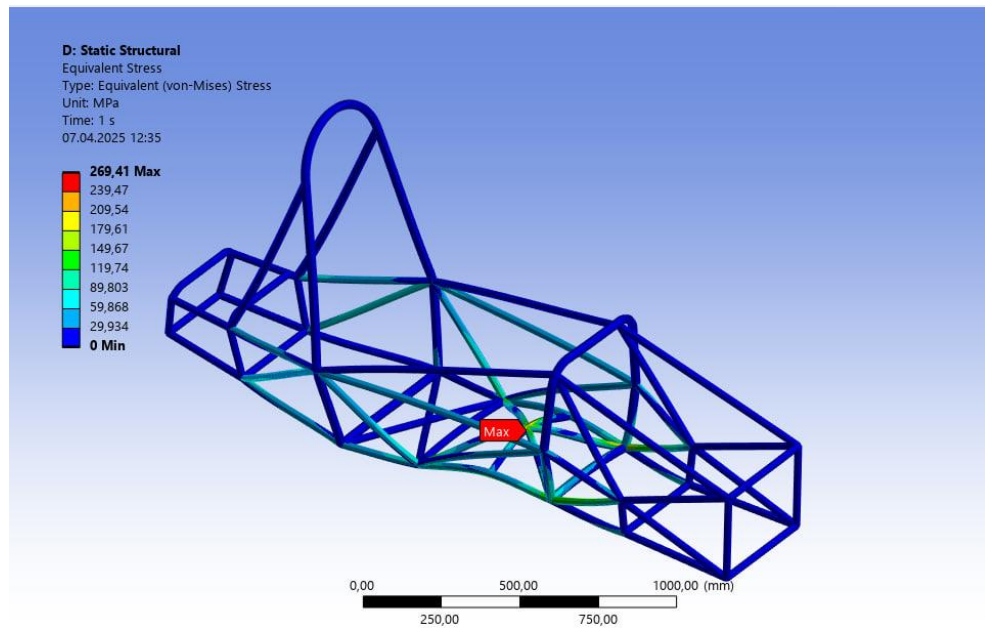


Рисунок 19 – Распределение напряжений во второй итерации рамы

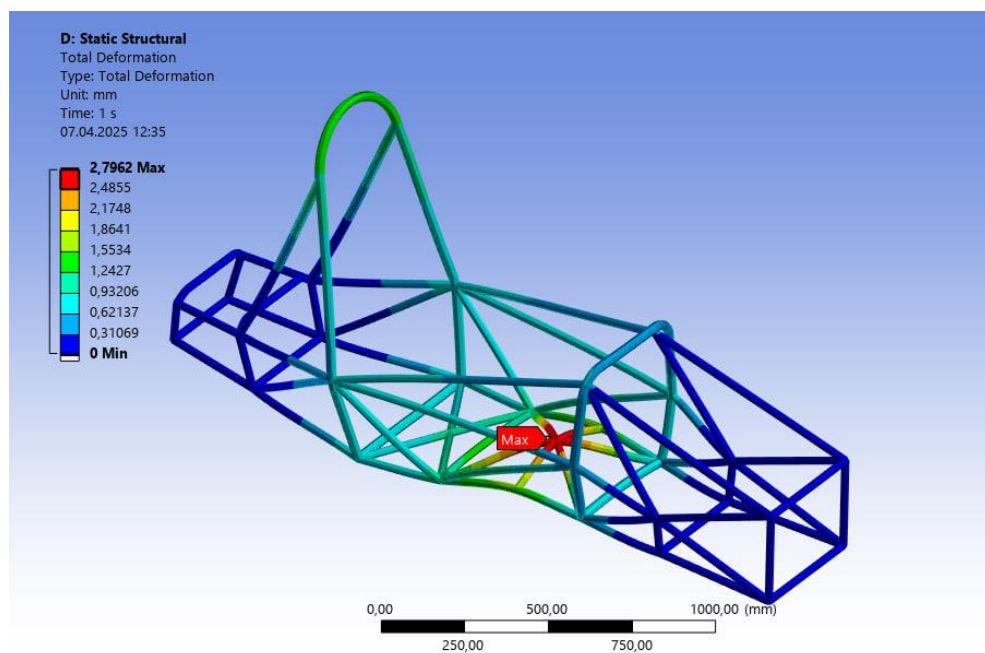


Рисунок 20 – Деформации при приложенной нагрузке во второй итерации рамы

Для более детального обзора рамы конструкция представлена на рисунке 21.

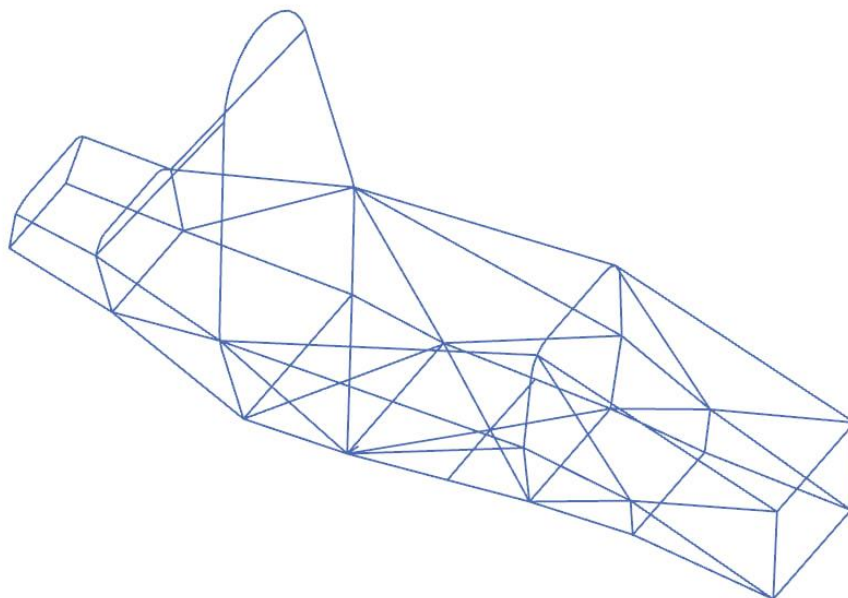


Рисунок 21 – Стержневая модель второй итерации рамы

Вес данной конструкции по расчетам в САПР-программе равна 32 250 г.

3.3.3 Третья версия конструкции рамы

После проведения предыдущих расчетов было принято решение проверки предыдущей конструкции рамы с применением диагональных распорок в нижней части рамы.

В результате проведения расчета мы получили следующие результаты:

Напряжения допустимые, 261 МПа, образуются в самом центральном узле нижней части рамы и выдерживает нагрузку (рисунок 22).

Деформации очень похожи на предыдущую итерацию, 2,2 мм возникают также в центральном узле, сила вытягивает узел вверх (рисунок 23).

Вес данной конструкции по расчетам в САПР-программе равна 32 050 г.

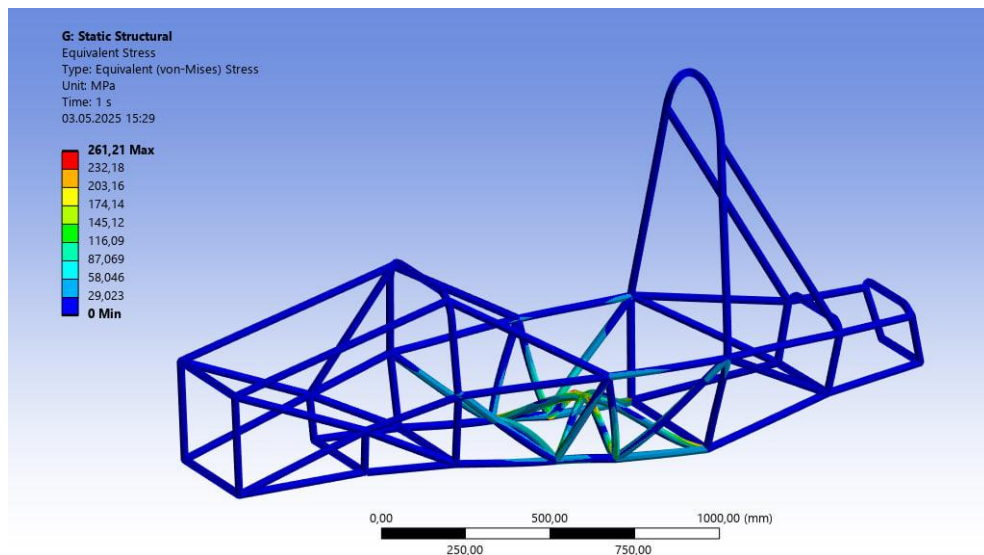


Рисунок 22 – Распределение напряжений в третьей итерации рамы

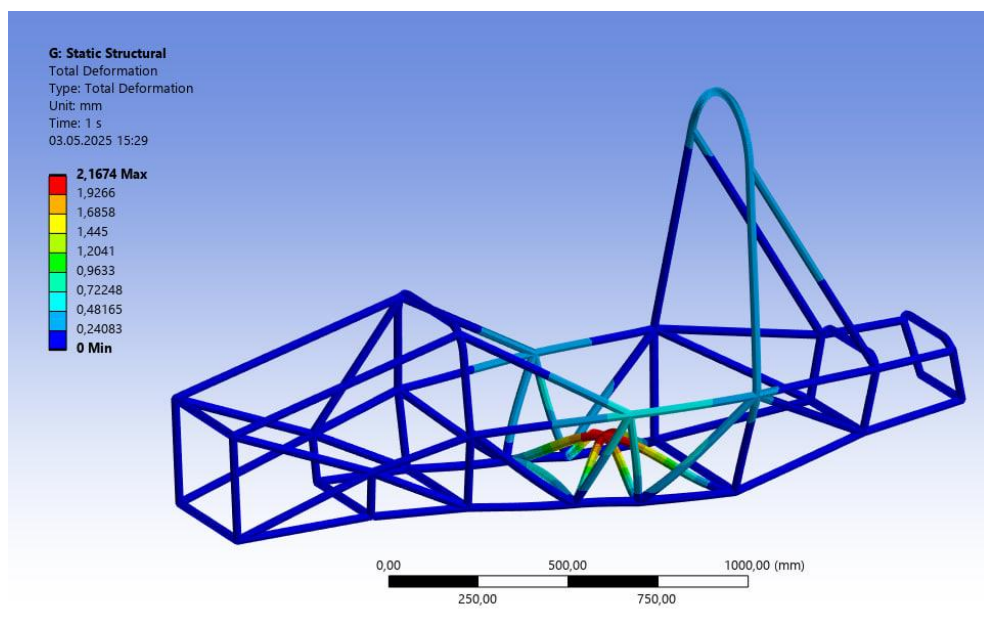


Рисунок 23 – Деформации при приложенной нагрузке в третьей итерации рамы

3.3.4 Четвертая версия конструкции рамы

В четвертой итерации было принято решение применения единого креста от главной дуги до передней дуги, а также проектирование дополнительных распорок для крепления опоясывающих ремней.

В данной конфигурации сила, прилагаемая на точку крепления паховых ремней, находится непосредственно в узле креста, а точки крепления опоясывающих ремней находятся в узле нижней трубы зоны бокового удара, а также распорок (рисунок 24).

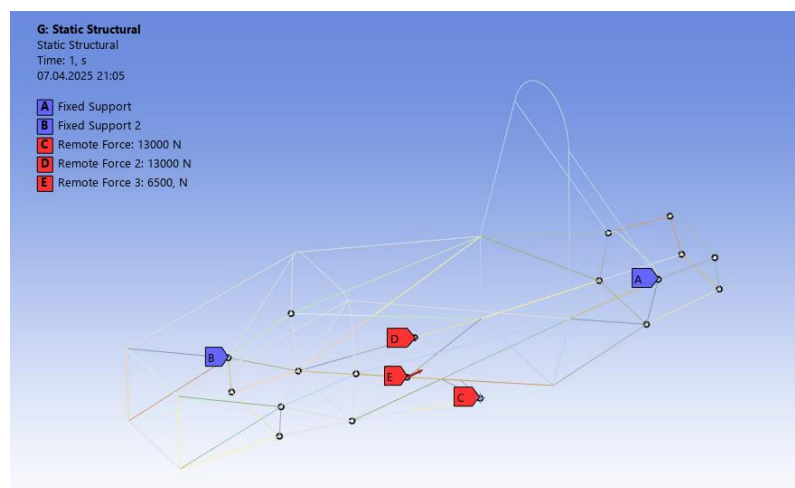


Рисунок 24 – Приложенные нагрузки к четвертой итерации рамы

В результате мы получаем напряжения равные 333 МПа, что соответствует техническому регламенту (рисунок 25). Зона критического напряжения расположена в распорке крепления опоясывающих ремней безопасности.

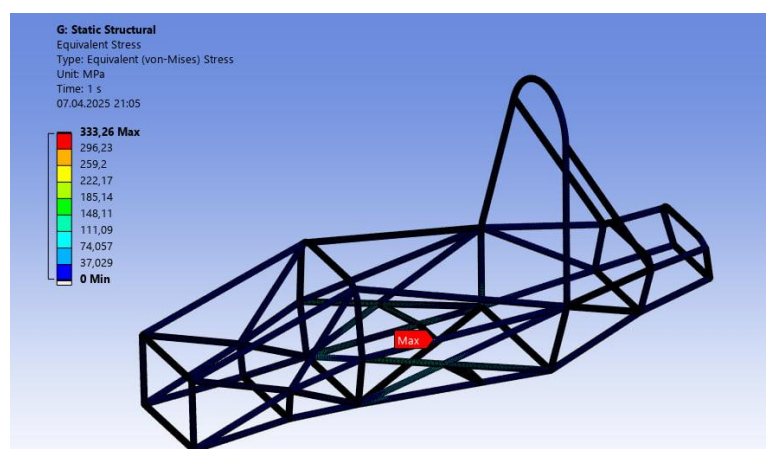


Рисунок 25 – Распределение напряжений в четвертой итерации рамы

В данной итерации деформации также находятся в допустимом уровне, 2,2 мм, критическое место находится в узле схождения двух элементов креста, сила вытягивает весь крест вверх (рисунок 26).

Вес данной конструкции по расчетам в САПР-программе равна 31 350 г.

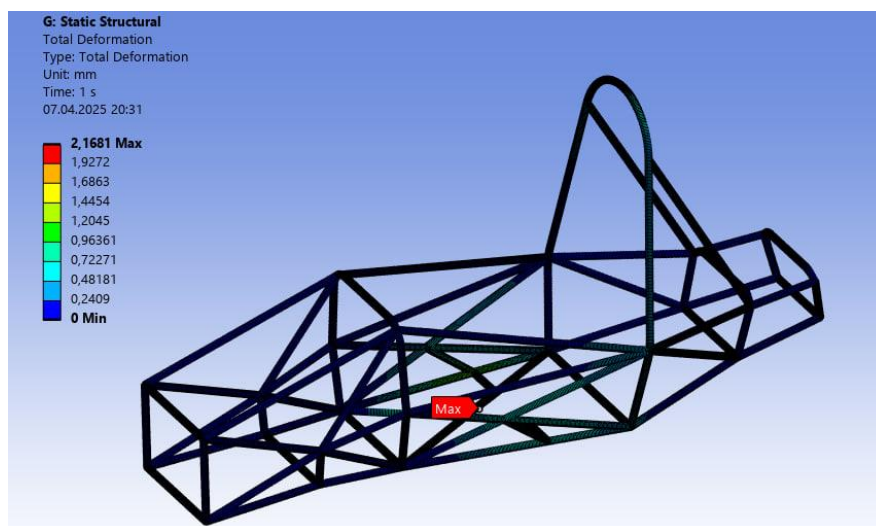


Рисунок 26 – Распределение деформаций в четвертой итерации рамы

3.3.5 Финальная версия конструкции рамы

В финальной версии было принято решение вернуться к первоначальному концепту, но изменить сечение нижней трубы зоны бокового удара, а также распорки нижней, которая обеспечивает крепление паховых ремней, предыдущий сортамент труб 25 мм внешний диаметр труб, 2,5 мм толщина стенки, новый сортамент 30 мм внешний диаметр, 3 мм толщина стенки. Изменена главная дуга, теперь она гнется в средней части для смещения узла вперед на 150 мм, что обеспечивает крепление опоясывающих ремней непосредственно в узле главной дуги.

При приложении нагрузок точки крепления опоясывающих ремней находятся непосредственно в узлах главной дуги, точки крепления паховых ремней находятся на распорке нижних труб боковой зоны удара на расстоянии 100 мм друг от друга (рисунок 27).

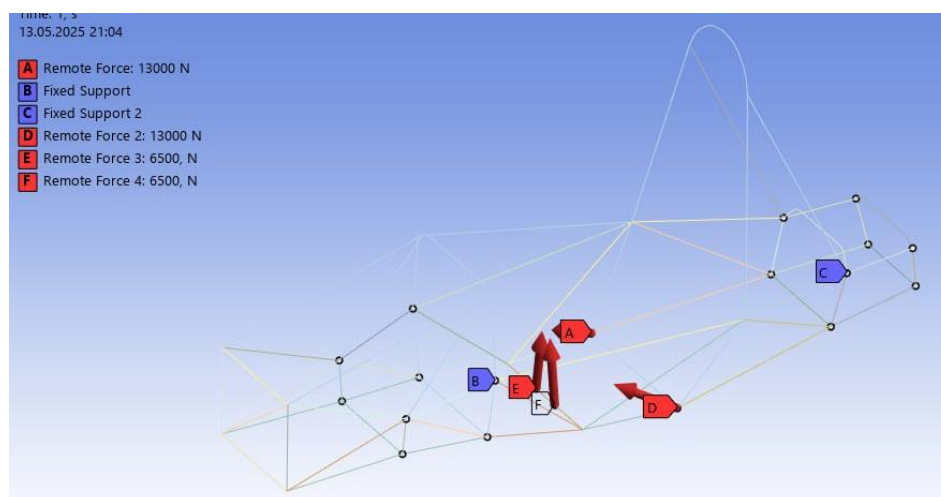


Рисунок 27 – Приложенные нагрузки к финальной версии рамы

В результате получаем напряжения равные 254 МПа (рисунок 28), это говорит о том, что труба не переходит в зону пластических деформаций, а продолжает находиться в зоне упругих деформаций, это обеспечивает очень хорошую жесткость.

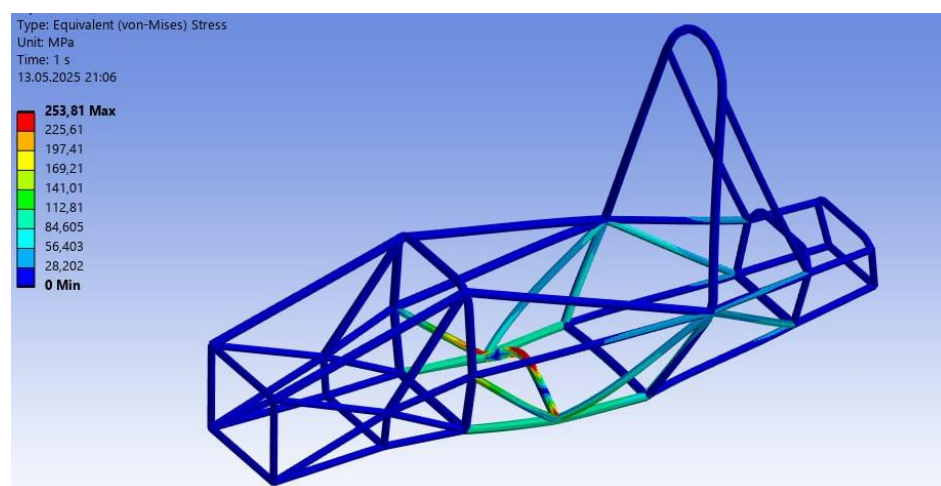


Рисунок 28 – Распределение напряжений в финальной версии рамы

В результате распределение деформаций мы видим следующее (рисунок 29), в основном происходит изгиб нижней распорки, на 3,7 мм, но

также при приложении нагрузок на опоясывающие ремни, эту нагрузку держит вся главная дуга, по которой распределяются напряжения.

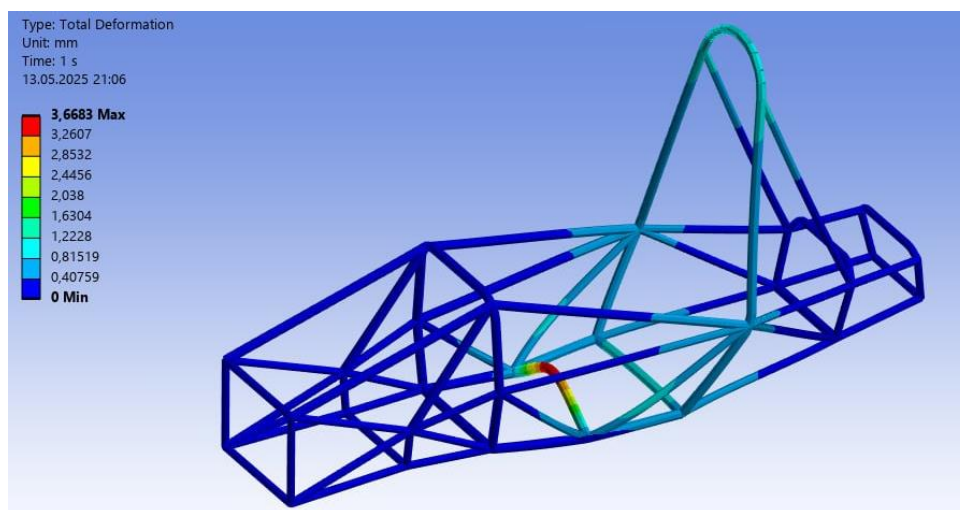


Рисунок 29 – Распределение деформаций в финальной итерации рамы

Вес данной конструкции по расчетам в САПР-программе равна 31 880 г.

Выводы по разделу

На основе результатов итеративного моделирования была достигнута оптимизация конструкции рамы. Учитывались как расчётные напряжения, так и деформации в ключевых зонах. Путём поэтапного усиления и изменения сечений элементов достигнута приемлемая жёсткость, соответствие регламенту и снижение массы конструкции. Расчёты проводились с использованием ANSYS, что обеспечило высокую точность оценки поведения конструкции под нагрузкой.

4 Технико-экономическое обоснование

4.1 Расчет себестоимости сварочных работ

Для изготовления разработанной рамной конструкции была выбрана модель сварочного аппарата PDG-160-1 Delta. В таблице 1 прописаны ключевые входные параметры для дальнейших расчетов [11].

Таблица 1 – Параметры для расчета себестоимости сварочных работ

Время использования оборудования в год	T	1976 ч
Время использования нашей командой	T _%	9,92%
	T _u	196 ч
Стоимость приобретения	B	20 337 руб.
Годовая стоимость обслуживания	C _g	9 581
Годовая стоимость обслуживания для нашей команды	C _m	950 руб.
Норма амортизации	N	33,33%
Амортизация за год	N _a	6 780 руб.
Амортизация для нашей команды	N _u	3,31%
Амортизация для нашей команды за год	N _{ug}	673 руб.
Зарплата оператора оборудования	C _s	510 руб.
Накладные расходы на зарплату	C _d	65%
Потребляемая мощность	W	4 кВт
Тариф на электроэнергию	P	6,43 руб.
Аренда помещений в год	A	7 231 руб.
Занимаемая площадь	S	0,141 м ²
	S _r	1 020 руб.
Стоимость аренды с учетом использования нашей команды	S _{ru}	101 руб.

Для расчета стоимости сварки использовались нормативы времени и коэффициенты [3]:

Основное время (T_0): 0,0658.

Штучное время (T_{pcs}): 1,15.

Общее время сварки C_1 за 1 см считается по формуле (3):

$$C_1 = T_0 \times k, \quad (3)$$

где T_0 – коэффициент времени основного процесса;
 k – длина сварного шва, мм.

$$C_1 = 0,0658 \times 10 = 0,66$$

Время сварки C_2 для расчета поштучно считается по формуле (4):

$$C_2 = T_{pcs} \times C_1, \quad (4)$$

где T_{pcs} – коэффициент времени процесса поштучной сварки;
 C_1 – время основного процесса, мин.

$$C_2 = 1,15 \times 0,66 = 0,76$$

Стоимость выполнения работ сварщиком C_w считается по формуле (5):

$$C_w = C_2 \times C_s, \quad (5)$$

где C_s – зарплата оператора оборудования / 60 мин, руб./мин.

$$C_w = 0,76 \times 8,33 = 6,33 \text{ руб.}$$

Затраты на электроэнергию C_e считаются по формуле (6):

$$C_e = C_2 \times P \times W, \quad (6)$$

где P – тариф на электроэнергию, руб.;;
 W – потребляемая мощность оборудования / 60 мин, кВт/мин.

$$C_e = 0,76 \times 6,43 \times 0,05 = 0,224 \text{ руб.}$$

Затраты на обслуживание C_3 считаются по формуле (7):

$$C_3 = C_2 \times \frac{C_m}{T_u \times 60}, \quad (7)$$

где C_m – годовая стоимость обслуживания для команды, руб.;
 T_u – время использования оборудования нашей командой, ч.

$$C_3 = 0,76 \times \frac{950}{196 \times 60} = 0,0614 \text{ руб.}$$

Затраты на амортизацию C_4 рассчитываются по формуле (8):

$$C_4 = C_2 \times \frac{\frac{B}{100 \times N_u}}{T_u} \times 60, \quad (8)$$

где B – стоимость приобретения оборудования, руб.;
 N_u – амортизация для команды, %.

$$C_4 = 0,76 \times \frac{6780}{100 \times 3,31} / 196 \times 60 = 0,0017 \text{ руб.}$$

Затраты на аренду C_5 рассчитываются по формуле (9):

$$C_5 = C_2 \times \frac{S_{ru}}{T_u \times 60}, \quad (9)$$

где S_{ru} – стоимость аренды с учетом использования командой, руб.

$$C_5 = 0,76 \times \frac{101}{196 \times 60} = 0,00065 \text{ руб.}$$

Итого затраты на один сантиметр сварки C_w рассчитываются по формуле (10):

$$C_w = C_e + C_3 + C_4 + C_5 \quad (10)$$

$$C_w = 6,33 + 0,0224 + 0,0614 + 0,0017 + 0,00065 = 6,42 \text{ руб.}$$

Итого за всю раму C_f рассчитывается по формуле (11):

$$C_f = F \times C_a, \quad (11)$$

где F – сумма длин сварных швов на раме, см.

$$C_f = 1068,8 \times 6,42 = 6861,7 \text{ руб.}$$

4.2 Расчет себестоимости ручной резки

Ручная резка производится угловой шлифовальной машинкой.

Время выполнения (T) для данной операции рассчитывается по формуле (12):

$$T = t_m + t_a + t_s, \quad (12)$$

где t_m – резка 1 см материала, мин;

t_a – время на подготовку к резке, выполнение измерений, установка отрезного диска на угловую шлифовальную машинку, мин;

t_s – уборка на рабочем месте, складывание инструмента, мин.

$$T = 0,1 + 4,8 + 3 = 7,9 \text{ мин}$$

Если стоимость выполнения работ рабочего составляет 332,4 руб./ч, то в минуту D_r он будет получать 5,42 руб.

Зная трудозатраты рабочего в минуту, расчетная стоимость процесса будет следующей [8]:

Подготовительные и уборочные работы D_{pcs} рассчитываются по формуле (13):

$$D_{pcs} = D_r \times (t_a + t_s), \quad (13)$$

где D_r – стоимость оплаты выполнения работ рабочему в минуту, руб.

$$D_{pcs} = 5,42 \times 7,9 = 42,3 \text{ руб.}$$

Стоимость выполнения ручной резки D_m за один см материала рассчитывается по формуле (14):

$$D_m = D_r \times t_m \quad (14)$$

$$D_m = 5,42 \times 0,1 = 0,54 \text{ руб.}$$

В случае «отрезного» процесса T (применяется для труб и прутков) время на операцию рассчитывалось по формуле (15):

$$T = t_{pcs} + t_a + t_s, \quad (15)$$

где t_{pcs} – резка 1 см материала, мин.

$$T = 0,2 + 5 + 3 = 8,2 \text{ мин}$$

Зная трудозатраты рабочего в минуту, расчетная стоимость процесса выполнения одного реза C_c рассчитывается по формуле (16) [8]:

$$C_c = D_m \times T, \quad (16)$$

$$C_c = 5,42 \times 8,22 = 44,44 \text{ руб.}$$

4.3 Расчет себестоимости покрасочных работ

Покраска выполняется с помощью краскопульта.

Процесс выполнения покраски T_p рассчитывался по формуле (17):

$$T_p = t_a + t_b + t_d, \quad (17)$$

где t_a – покраска один m^2 детали, мин;

t_b – время на подготовку к покрасочным работам, подготовка к покраске, подготовка краскопульта, мин;

t_d – уборка на рабочем месте, мин.

$$T_p = 5 + 10 + 15 = 30 \text{ мин}$$

Зная трудозатраты рабочего в минуту, расчетная стоимость процесса будет следующей:

Стоимость выполнения подготовительных и уборочных работ на единицу изготовления P_{pcs} рассчитываются по формуле (18):

$$P_{pcs} = P_r \times Y, \quad (18)$$

где P_r – стоимость оплаты выполнения работ рабочему в минуту, руб.;

Y – время выполнения покрасочных работ, мин.

$$P_{pcs} = 5,42 \times 14,5 = 78,6 \text{ руб.}$$

Стоимость выполнения покрасочных работ за один m^2 P_s рассчитывается по формуле (19):

$$P_s = P_r \times t_a, \quad (19)$$

где P_r – стоимость оплаты выполнения работ рабочему в минуту, руб.;

t_a – покраска 1 m^2 детали, мин.

$$P_s = 5,42 \times 5 = 27,1 \text{ руб.}$$

Расчет стоимости выполнения покрасочных работ за один м² с учетом нанесения двух слоев грунта и двух слоев краски C_{pm} рассчитывается по формуле (20):

$$C_{pm} = P_s \times L_p, \quad (20)$$

где P_s – стоимость выполнения покрасочных работ за один слой, руб.;

L_p – количество слоев, шт.; $L_p = 4$.

$$C_{pm} = 27,1 \times 4 = 108,4 \text{ руб.}$$

Расчет стоимости выполнения покрасочных работ за один м² C_{paint} рассчитывается по формуле (21) [9]:

$$C_{paint} = (C_{pm} + B_c) \times \frac{B_l}{B_m}, \quad (21)$$

где C_{pm} – стоимость выполнения покрасочных работ за 1 м² с учетом нанесения двух слоев грунта и двух слоев краски, руб.;

B_c – стоимость краски для покраски детали, руб.;

B_l – объем необходимой для окраски детали, л;

B_m – стоимость краски, руб./л.

$$C_{paint} = 108,4 + 234,5 \times \frac{0,2}{1172,63} = 342,9 \text{ руб.}$$

4.4 Общий расчет себестоимости технологических процессов

Гибка труб производится из расчета 57,85 рублей за один гиб.

Стоимость закупки труб приведена в таблице 2.

Таблица 2 – Стоимость закупки труб

Наименование трубы	Цена за м, руб.	Общая длина, м	Общая стоимость, руб.
Ø30 × 2 мм	405,90	4,5	1 826,55
Ø30 × 3 мм	567,36	4,0	2 269,44
Ø25 × 1,8 мм	257,07	20,0	5 141,40
Ø25 × 1,5 мм	221,99	5,0	1 109,95

В таблице 3 ниже приведена общая стоимость производства рамы.

Таблица 3 – Стоимость производства рамы

Процесс	Цена	Количество	Стоимость (руб.)
Сварочные работы	7,23 руб./см	1 068,8 см	7 712,50
Резка труб	44,3 руб./рез	118 резов	5 215,39
Покраска	342,58 руб./м²	2.82 м²	964,00
Гибка труб	57,85 руб./гиб	15 гибов	879,45
Амортизация и обслуживание	—	—	950,00
ИТОГО	—	—	26 068,67

Выводы по разделу

Выполнен анализ стоимости изготовления пространственной рамы, включая закупку материалов, затраты на сварку, гибку, покраску и амортизацию [11]. Результаты показывают высокую рентабельность предлагаемого решения и подчёркивает важность распределения ресурсов [1]. Это подтверждается исследованиями по организации производства в машиностроения [14]

Заключение

В ходе выполнения данной выпускной квалификационной работы разработана пространственная рама гоночного болида класса Formula Student. На первоначальном этапе проектирования был проведён подробный анализ конструкций рам, используемых другими командами Formula Student. Это позволило учесть опыт существующих разработок при создании собственной конструкции. Проектирование осуществлялось в строгом соответствии с действующим регламентом соревнований Formula Student, а также с учётом предусмотренных им шаблонов кокпита, перцентилия и поперечного сечения. Такой подход обеспечил выполнение всех требований регламента по безопасности и эргономике пилота.

Разработанная рама представляет собой пространственную конструкцию, выполненную по комбинированной схеме с использованием труб различного поперечного сечения. Такой подход позволил оптимально распределить нагрузки в каркасе и обеспечить высокие прочностные показатели при минимально возможной массе конструкции. Для оценки прочностных и жесткостных характеристик рамы проведено её численное моделирование методом конечных элементов в программном комплексе ANSYS [17]. В ходе данного расчётного исследования была определена жёсткость конструкции на кручение и проверена её прочность при воздействии расчётных нагрузок.

Результаты расчётов показали, что спроектированная рама обладает необходимой жёсткостью на кручение и прочностью. Она выдерживает все эксплуатационные нагрузки, а возникающие при этом напряжения не превышают допустимых значений. Кроме того, рама отличается технологичностью изготовления. Таким образом, разработанная рама пригодна для практического применения в условиях соревнований Formula Student [13, 18].

Список используемой литературы и используемых источников

1. Абрашкин М. С. Организация и развитие предприятий наукоёмкого машиностроения. – М.: МГТУ «СТАНКИН», 2018. – 160 с.
2. Анурьев В. И. Справочник конструктора-машиностроителя: в 3-х т. – Т.3. – 8-е изд., перераб. и доп. / Под ред. И.Н. Жестоковой. – М.: Машиностроение, 2001. – 864 с.
3. Горбачев А. Ф., Шкред В. А. Курсовое проектирование по технологии машиностроения: учебное пособие для вузов. – М.: ООО ИД «Альянс», 2007. – 256 с.
4. Голубина С. А., Карпов М. А., Черенков А. Г. АНАЛИЗ НЕСУЩИХ СИСТЕМ СОВРЕМЕННЫХ ЛЕГКОВЫХ АВТОМОБИЛЕЙ // Архивариус. 2021. №4 (58). 3 с.
5. Головин Д. В. Анализ и определение геометрических характеристик несущей системы болида класса «Формула Студент» // Вестник науки и образования. 2015. №7 (9). 5 с.
6. Головин Д. В. Оценка погрешностей при производстве рамы болида "Формула Студент" // МНИЖ. 2016. №8-3 (50). 3 с.
7. Головин Д. В. Прочностной анализ рамы болида «Формула Студент» ПНИПУ // МНИЖ. 2015. №9-2 (40). 4 с.
8. Иванов А. С., Давыденко П. А., Шамов Н. П. Курсовое проектирование по технологии машиностроения: учебное пособие. – М.: ИЦ РИОР: НИЦ ИНФРА-М, 2014. – 276 с.
9. Капрова В. Г. Учебно-методическое пособие к выполнению курсовой работы по дисциплине «Организация производства» для студентов специальности 190201 – «Автомобиле- и тракторостроение» всех форм обучения. – Тольятти: ТГУ, 2016. – 45 с.
10. Ключев В. В., Зайцев В. А. Расчёт сварных конструкций на прочность и устойчивость: учебное пособие. – М.: Инфра-Инженерия, 2019. 232 с.

11. Краснопевцева И. В., Зубкова Н. В. Экономика и управление машиностроительным производством, учебное пособие – Тольятти, 2014, 184 с.
12. Регламент Formula Student Russia 2025 [Электронный ресурс] URL: <https://fsrussia.ru> (дата обращения: 03.04.2025).
13. Сапон В. М. ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ТРУБЧАТОЙ РАМЫ БОЛИДА КЛАССА "ФОРМУЛА СТУДЕНТ" // E-Scio. 2020. №9 (48). 14 с.
14. Туровец О. Г., Родионова В. Н. Экономические проблемы организации производства на предприятиях машиностроения // ЭКОНОМИНФО. 2018. №1. 8 с.
15. Чернов С. А. Результаты численного анализа вариантов моделирования узлов рамы автомобиля // Вестник УлГТУ. 2014. №1 (65). 4 с.
16. Agarwal S., Awasthi P., Saatyaki T., Kushwaha M., Jaiswal V. Design and analysis of spaceframe chassis for FSAE vehicle // International Journal of Engineering Research & Technology. 2020.3 pp.
17. ANSYS Inc. ANSYS Theory Reference Manual. – ANSYS Inc., 2023. [Электронный ресурс] URL: https://ansyshelp.ansys.com/public/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v242/en/ans_thry/ans_thry.html (дата обращения: 21.04.2025).
18. FS Rules 2025, v1.1 – Formula Student Germany [Электронный ресурс] URL: <https://fsg.one> (дата обращения: 15.04.2025).
19. Pukhkal V.A., Mottaeva A.B. FEM MODELING OF EXTERNAL WALLS MADE OF AUTOCLAVED AERATED CONCRETE BLOCKS // Magazine of Civil Engineering. 2018. №5 (81). 10 pp.
20. Valiullin D., Chizhov S. Bolted connections stiffness of steel trusses for bridge superstructures // Magazine of Civil Engineering. 2022. №6. 10 pp.