

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

---

(наименование института полностью)

Кафедра «Сварка, обработка материалов давлением и родственные  
процессы»  
(наименование)

15.04.01 Машиностроение  
(код и наименование направления подготовки)

---

Системы автоматизированного проектирования в машиностроении  
(направленность (профиль))

---

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА  
(МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)**

на тему «Совершенствование методов проектирования в САПР изделий  
автомобиля из пластмассы на основе обеспечения прочности изделий»

Обучающийся

А.А. Резцова

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Научный  
руководитель

к.т.н., доцент П.Н. Шенбергер

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

Консультант

к.т.н., доцент Е.Н. Почечуев

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

Тольятти 2023

## Содержание

Введение.....	4
1 Анализ методов проектирования изделий из пластмассовых материалов в автомобилестроении .....	8
1.1 Анализ тенденций использования пластмассовых деталей в конструкции легкового автомобиля.....	8
1.2 Виды материалов из пластмассы для легкового автомобиля .....	11
1.3 Обзор методов проектирования изделий из пластмассы в автомобилестроении .....	16
1.4 Обзор программного обеспечения для проектирования изделий из пластмассы .....	27
1.5 Обзор основных процессов получения пластиковых деталей.....	28
1.6 Дефекты, возникающие при эксплуатации полимерных деталей.....	35
2 Разработка в САПР электронных моделей пластмассовых деталей легкового автомобиля .....	38
2.1 Описание конструкции узлов из полимерных материалов легкового транспорта.....	38
2.2 Построение в САПР электронных моделей полимерных деталей панели управления легкового автомобиля .....	41
2.3 Построение в САПР электронной модели сборки системы панели управления автомобиля .....	51
3 Инженерный анализ деталей панели приборов в САПР.....	57
3.1 Построение сетки КЭ для полимерных деталей панели приборов.....	57
3.2 Инженерный анализ расчёта деталей панели управления.....	79
Заключение .....	88

Список используемой литературы и используемых источников.....	89
---	----

## Введение

Актуальность исследования. Интерес к проектированию изделий из пластмасс обозначен их широким применением в машиностроении. Недостаточная прочность и износостойкость полимерных деталей в интерьере автомобиля – также, является темой для обсуждения. В качестве износостойкого материала, работающего в условиях трение – износ, в автомобилестроении широко применяют полипропиленовые (PP), поликарбонатные (PC+ABS), акрилонитрил-бутадиен-стирольные (ABS) и полиамидные (PA) материалы. Замена металлических материалов на полимеры, вызвана снижением суммарной массы автомобиля для ряда возможностей: снижения потребляемой доли топлива, удешевления цены автомобиля и повышения экологичности производства [1]. Наибольшее распространение такие полимеры нашли в машиностроении, в частности для производства панели приборов (интерьерные детали), бамперов (экстерьерные детали) и разных декоративных вставок [1].

Для производства верхней накладки панели приборов используют полипропиленовый материал, который имеет хорошие прочностные характеристики, но при этом не является хрупким материалом, что важно для безопасности пассажиров в автомобиле и легкому вмешательству декоративных технологий для привлечения внимания потребителя.

Структура панели приборов изготавливается из поликарбоната, что важно для износостойкости и прочности в условиях эксплуатации автомобиля, как несущей конструкции. В зависимости от состава, вида и режимов производства полимера, материал может быть обеспечен различным уровнем механических и трибологических свойств. Что, должным образом, удовлетворяет противоречивым требованиям, предъявляемым к характеристикам разного вида изделий. Так, определяется более чёткое регламентирование требований к структуре и свойствам полимеров с

определенным соотношением фазовых составляющих и, следовательно, приводит к минимизированию потерь, связанных с браком.

Несмотря на то, что исследуемые материалы применяются в производстве давно, существуют ограничения на пути повышения качества [1], связанные с нестабильными свойствами в процессе технологической переработки и возможностями проектирования. Запросы дизайнеров часто являются геометрически-сложными, что требует точности в подборе поверхностей класса «А» и радиусов, которые являются критически важными.

В исходной шихте используется некоторое количество отходов, которые повышают максимально допустимое процентное содержание примесей, как тальк, стеклочастицы и другие [1]. Это приводит к браку при литье под давлением, так как образуются высокие напряжения по критическим сечениям заготовки [1].

Основным способом повышения износостойкости и долговечности конструкции является проектирование рёбер жёсткости и упрощение геометрии детали [1]. Поиск оптимальных вариантов конструкции деталей, обеспечивающих повышение механических свойств деталей в зависимости от различной нагрузки, является одним из перспективных направлений для повышения их работоспособности.

Правильное и систематическое проектирование деталей панели приборов влияет на мнение потребителя, что приводит к окупаемости продукта-процесса. В связи с этим, к процессу проектирования предъявляют требования, которые обеспечивают качество и низкую себестоимость изделия. Данная тема является актуальной по причине необходимости в современном производстве снижения вероятности появления дефектов на стадии отливки детали, что возможно достичь путём совершенствования методов проектирования деталей в САПР.

Объект исследования: методы проектирования деталей легкового автомобиля, выполненные из полимерных материалов.

Предмет исследования: детали панели приборов легкового автомобиля.

Цель работы: разработка методики анализа и проектирования полимерных изделий легкового автомобиля на основе идеализации геометрии, оценки конечно-элементной модели и анализа прочности в CAD/CAE-системе.

Задачи исследования:

- Провести сравнительный анализ методов проектирования изделий из пластмасс в автомобилестроении.
- Выполнить разработку электронных моделей пластмассовых деталей легкового автомобиля в САПР.
- Провести инженерный анализ прочности деталей панели приборов в CAE-системе.

Методы проведения исследования:

- Метод конечных элементов.
- Теория обеспечения прочности изделий.

Научная новизна: разработанная методика анализа и проектирования полимерных изделий панели приборов легкового автомобиля позволит выявить возможные дефекты полимерных деталей на ранней стадии проектирования на основе идеализации геометрии, оценки конечно-элементной модели и анализа конструкции в CAD/CAE-системе.

Теоретическая значимость: предлагаемый метод идеализации и разработки конечно-элементной (КЭ) модели позволит выполнять разработку качественной конечно-элементной модели повышенного уровня сложности, предназначенной для проведения CAE-расчета и получения достоверных результатов.

Практическая значимость: методика проектирования полимерных изделий позволит выявлять на ранних стадиях разработки конструкции возможность возникновения дефектов.

Данная работа может быть применима для промышленного производства, а также в дальнейших научно-исследовательских работах.

Личный вклад автора заключается в разработке качественной модели КЭ для проведения расчётов прочности изделия.

Апробация результатов результаты диссертационной работы были предоставлены и рассматривались на заседаниях кафедры «Сварка, обработка материалов давлением и родственные процессы» Тольяттинского государственного университета.

Результаты докладывались на научно-практической конференции «Студенческие дни науки в ТГУ».

На защиту выносятся:

- Разработка методики проектирования деталей из полимера методом конечных элементов.
- Результаты расчётов сборочного узла деталей панели приборов в САЕ-системе.

Структура и объем магистерской диссертации: магистерская диссертация состоит из введения, трёх разделов и заключения. Общий объем – 91 страница. В данной работе содержится: 71 иллюстрация, 1 таблица, 33 использованных источника.

## **1 Анализ методов проектирования изделий из пластмассовых материалов в автомобилестроении**

С развитием отечественной автоиндустрии, стремительно возросла потребность в новых, экономичных, экологичных и надёжных материалах, способных заменить металл. Так как, металл труднее подвергается деформации и декорированию, были разработаны и применены полимерные марки материалов, которые соответствовали требованиям долговременного использования в деталях машин, где предъявляются высокие требования по техническим характеристикам [1].

### **1.1 Анализ тенденций использования пластмассовых деталей в конструкции легкового автомобиля**

Применение полимеров для деталей легкового автомобиля приобрело высокую известность за достаточно небольшое время. Это можно объяснить тем, что по ряду показателей, как плотность, коррозионная стойкость, антифрикционные и технологические свойства — полимеры значительно превосходят металлические материалы, используемые при изготовлении автомобиля.

До автомобилестроения, пластмассы применяли для деталей только электротехнического, антифрикционного и декоративного назначения. В автомобилях новых моделей применяется более 600 различных пластмассовых деталей [1]. В том числе таких, как кожухи руля, центральная консоль, панели приборов, визоры, внутренние ручки дверей, вещевые ящики, диффузоры, сопла, воздуховоды и т.д.

Основными факторами, такого изменения, являются:



- снижение материалоемкости конструкции, что достигается применением пластмасс для изготовления крупногабаритных деталей типа капотов, внутренних панелей дверей, бамперов и т. д.;
- повышение безопасности эксплуатации автомобиля, что обеспечивается изготовлением из пластмасс бамперов, подлокотников, подголовников, мягких панелей приборов, рулевых колес и интерьера автомобиля из новых полимеров;
- повышение долговечности и эксплуатационных характеристик автомобиля, что обусловлено антикоррозионными и другими свойствами пластмасс (дополнительные ниши колес, брызговики и др.);
- совершенствование технологии производства автомобильных деталей и узлов, что достигается возможностью объединить многочисленные детали в единый узел, который имеет меньшую массу, и сократить время сборки на конвейере [1].

Пластическими массами (пластмассами, пластиками) принято называть материалы, представляющие собой композицию полимера или олигомера с различными дополнениями, находящуюся при формовании изделий в вязкотекучем или высокоэластическом состоянии, а при эксплуатации – в стеклообразном (аморфном) или кристаллическом состоянии. В качестве дополнительных материалов могут входить наполнители – тальк, каолин, слюда, древесная мука, стеклянные, органические, углеродные и другие волокна; пластификаторы, отвердители, стабилизаторы, красители и т.д [1].

В зависимости от характера процессов, сопутствующих формованию изделий, пластмассы делятся на термопласты и реактопласты [1]. К числу реактопластов, или термореактивных пластмасс, относятся материалы, переработка которых в изделия сопровождается химическими реакциями образования трехмерного полимера — отверждением. При этом полимеры утрачивают способность переходить при нагревании в вязкотекучее

состояние и стойки к растворителям. По назначению и отличительным признакам пластмассы бывают общего назначения, высокопрочные, прозрачные, морозо- и теплостойкие, электроизоляционные. Пластмассы общего назначения – материалы, к показателям физико-механических и химических свойств которых не предъявляют особых требований. К этим материалам относятся отделочные, декоративные, упаковочные, и другие изделия из пластмасс (поливинилхлорида, полипропилена, фенопластов и др.).

Высокопрочные пластмассы – полиформальдегид, полиэфирные пластики, поликарбонаты – характеризуются высоким пределом прочности при сжатии и изгибе, большой износостойкостью и высоким коэффициентом трения (фрикционные свойства). Эти материалы способны заменить бронзу и баббит, например, в подшипниках, втулках; их используют для изготовления труб, зубчатых колес, гребных винтов [1].

Прозрачные пластмассы – полиметилметакрилат, полистирол – пропускают лучи света в широком диапазоне волн, и, в частности, ультрафиолетовую часть спектра, благодаря чему они не уступают по своим оптическим свойствам лучшим сортам стекла и хрусталя и значительно превосходят в этом силикатное стекло. Из таких пластмасс изготавливают оптические системы осветительной арматуры [1].

Морозостойкие пластмассы – полиизобутилен, этилцеллюлозная, поликарбонат – сохраняют эластичные свойства и гибкость при низких (минусовых) температурах. Изделия и конструкции, изготовленные из таких пластмасс, можно эксплуатировать в атмосферных условиях.

Теплостойкие пластмассы – полиорганосилоксаны, политрихлорэтилен, фенопласты – обладают способностью не размягчаться при повышении температуры. Такие пластмассы широко применяют в промышленности и быту, в отдельных случаях они заменяют металл и керамику [1].

Электроизоляционные пластмассы – полиэтилен, поливинилхлорид, полистирол – характеризуются низкой диэлектрической постоянной, высокой

электрической прочностью, высоким объемными поверхностным сопротивлением. Их применяют для изоляции проводов и электрооборудования в электротехнике, для замены эбонита [1].

Теплоизоляционные пластмассы – поливинилхлорид, полистирол, полиуретан, фенопласты – отличаются низкой теплопроводностью. К таким пластмассам относятся пористые газонаполненные материалы – пенопласты и поропласты, применяемые для теплоизоляции холодильных приборов и установок, жилых помещений, многослойных стеновых панелей и т. п [1].

## **1.2 Виды материалов из пластмассы для легкового автомобиля**

Полимеры могут быть сгруппированы по категориям, которые имеют схожее поведение: термопластичные и терморезистивные [2].

Принимая во внимание множество параметров, влияющих на изготовление отливок, составлен ряд характеристик, которые помогут в выборе процесса литья полимерных деталей.

Наиболее распространенными материалами в панели приборов являются такие материалы, как ПК (поликарбонат) – облицовка фар, АБС (Акрилонитрил-бутадиен-стирол) – значки, ПК+АБС (Композиция Акрилонитрил-бутадиен-стирол + поликарбонат) – каркас панели приборов, ПА (полиамид) – ручки дверей, ПП (полипропилен) – облицовка панели приборов (таблица 1).

Поликарбонат имеет ударопрочную структуру и устойчивость к бензину, что позволяет использовать его в экстерьерных деталях автомобиля.

Полипропилен является частично кристаллическим полимером, что позволяет ему быть устойчивым на излом, это позволяет использовать материал в интерьере автомобиля.

ПК+АБС при аморфной структуре является устойчивым материалом к ударным нагрузкам, но при этом выявляется высокий блеск. Для устранения

высокого блеска применяются окрашивающие средства, которые хорошо взаимодействуют с этим материалом.

АБС материал имеет высокую стойкость к изменению температур, которые часто происходят в салоне автомобиля. Данный материал хорошо взаимодействует с гальваническим покрытием для декоративных деталей.

При выборе материала учитывается его текучесть, температура плавления, что влияет на проливаемость материала в оснастке.

Важным параметром является эксплуатация изделия, в зависимости от того, где и как часто будет применяться деталь, выбирается материал.

Для того, чтобы правильно подобрать материал, его подвергают тестированию в специальных сертифицированных лабораториях мира.

Например, при анализе на прочность большое влияние оказывает скорость деформирования, на ударную вязкость образца с надрезом – геометрия надреза и т.д.

Алгоритм выбора полимерного материала для проектируемого изделия должен включать изучение прототипов этого изделия, методов его испытания, технических требований к изделию и материалу, составление перечня необходимых свойств, проведение технико-экономического анализа, позволяющего правильно выбрать полимерный материал.

Для изменения нескольких параметров в уже выбранном материале, используют модификаторы, добавки, армирующие или простые наполнители, в также сами материалы в разных пропорциях.

В ходе проведения исследования были подобраны детали панели приборов из полимерных марок: полипропилен (ПП), АБС. Данные марки сплавов были разработаны для ответственных деталей, работающих в условиях трения-износа [2]. Эти марки были выбраны в ходе исследования, для определения влияния прочности на свойства деталей интерьера автомобиля.

Так, сплав ПП – является сополимером, который устойчив к высоким температурам, выдерживает нагрев до 138 °С, в то время АБС пластик теряет свои свойства при 118°С; АБС – является более твёрдым материалом, по Роквеллу – R116, когда ПП имеет R82.

Существуют различные отечественные и иностранные производители полимеров. Каждая компания, которая является производителем материала, имеет индивидуальный технологический процесс, а также разных поставщиков гранул, что влияет на различия в химическом составе, микроструктуре, прочности и составе фаз данных образцов. Поэтому важно оценить фактические параметры сплава в состоянии поставки.

В настоящее время, важной особенностью является развитие отечественных производителей полимерных материалов, что способствует большому количеству предлагаемых сплавов для использования в интерьере автомобиля. Материалы проходят тщательную проверку на износостойкость, прочность и долговечность материала.

На основании этих данных, после выбора материала, инженер-конструктор учитывает его характеристики в процессе проектирования и испытаний на прочность в CAD/CAE – системах.

Таблица 1 – Характеристики полимерных материалов

Материал	Структура	Плотность	Физические св-ва	Химические св-ва	Темп. расплава	Темп. формы	Усадка
Композиция акрилонитрил-бутадиен-стирол/поликарбонат (ПК+АБС)	Аморфная	1.15 г/см <sup>3</sup>	Устойчивость к ударным нагрузкам, с высоким блеском, светостойкость, годен для гальванизации, теплостойкий, высокая прочность на разрыв	Устойчивость к гидролизу только ограничено, не устойчив к кетонам, эфирам	260-270 °С	70-90 °С	Близка к изотропной (во всех направлениях одинакова) усадка 0.5-0.7 %, при упрочнении стекловолокно м: 0.2-0.4%
Акрилонитрил-бутадиен-стирол (АБС)	Аморфная	1.06-1.19 г/см <sup>3</sup>	Твёрдый, вязкий до -40 °С, высокая стойкость к изменению температуры, в зависимости от марки хладо- или теплоустойчив (100°С), не токсичен, годен для металлизации гальваникой, есть марка прозрачная, как стекло	Устойчив к кислотам, щелочам, углеводородом, маслам Не устойчив к ацетону, эфиру, этилбензолу	220-250 °С	40-80 °С	0.4-0.7%

Таблица 1 (продолжение) – Характеристики полимерных материалов [3]

Материал	Структура	Плотность	Физические св-ва	Химические св-ва	Темп. расплава	Темп. формы	Усадка
Поликарбонат (ПК)	Аморфная	1.2 г/см <sup>3</sup>	Твёрдый, жёсткий, ударопрочный до -100°С, высокая теплостойкость, прозрачный, хорошо окрашивается	Устойчив к маслам, бензину, спирту Не устойчив к сольным кислотам, щелочам и бензолу	280-310 °С	80-110 °С	0.6-0.8% при упрочнении стекловолокном 0.2-0.4%
Полипропилен (ПП)	Частично кристаллическая	0.91-0.93 г/см <sup>3</sup>	Твёрдый, устойчив на излом, не токсичен, диэлектричен, пропускает запахи, подходит для шарниров	Устойчив к кислотам, растворам, щелочам, солям Не устойчив к хлорированным углеводородам	220-280°С	20-70°С	1.2-1.5%, окончательная усадка достигается после 24 часов (большая дополнительная усадка)
Полиамид (ПА6)	Частично кристаллическая	1.14 г/см <sup>3</sup>	При равновесной влажности (2-3%) очень вязкий, твёрдый, жесткий, износостойкий, окрашивается	Устойчив к растительным маслам, бензину, щелочам Не устойчив к озону, соляной кислоте, серной кислоте	240-250°С	60-100°С	0.7-2%, с 30% содержанием стекловолокна для упрочнения материала: 0.3-0.8%.

### 1.3 Обзор методов проектирования изделий из пластмассы в автомобилестроении

Применение полимерных изделий в отечественном машиностроении, в качестве интерьерных и экстерьерных деталей, приобретает всё большее распространение. Правильно спроектированный объект важен для любого производства, но для пластмассовых деталей это необходимость [2]. Опыт применения полимеров в массовом производстве намного меньше, чем опыт применения металлов. Это связано с разнообразием и сложностью, структурной составляющей пластмасс, которая зависит от влияния времени, температуры и окружающей среды. Важным фактором является правильно подобранный материал, где учтены ограничения производственного процесса и характеристики материала.

Существует порядка сотен универсальных типов полимеров, с помощью передовых технологий с использованием катализаторов и компаундирования создаются новые сплавы, смеси и молекулярные формы [2]. Все свойства этих материалов могут быть изменены путём регулирования молекулярной массы и процентного содержания добавок, таких как тальк и стекло. Ниже изложены основы оптимального дизайна полимерных деталей, которые применяются к термопластам и литью под давлением.

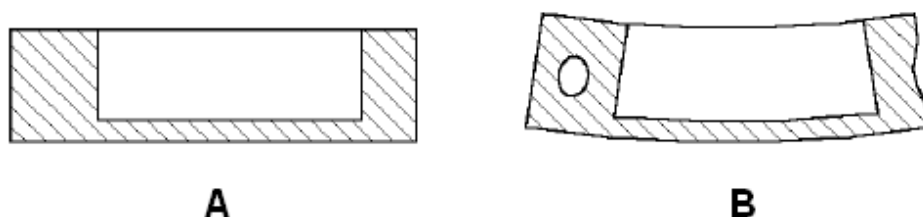
Выбор толщины стенки изделия является важным шагом на стадии проектирования. Детали, которые выполняются в виде цельного тела из традиционных материалов, в процессе использования полимеров будут сформированы совершенно по-другому. Пластмассы не поддаются твёрдому формованию, по причине того, что полимеры обрабатываются под высокими температурами, но являются плохими проводниками тепла.

Это означает то, что толстые секции требуют очень много времени для охлаждения и поэтому являются дорогостоящими в производстве. При охлаждении пластмассы уменьшаются в объеме. В толстых секциях это

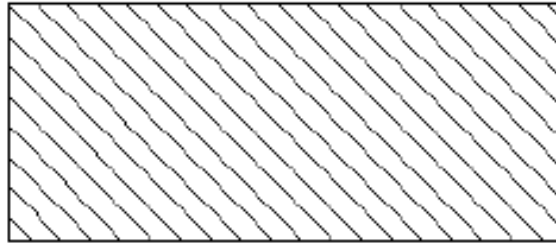


приводит либо к тому, что поверхность детали опускается внутрь, образуя заметный след от раковины, либо к образованию внутренней пустоты (рисунки 1-3). Кроме того, пластмассовые материалы дороги; только высокоскоростные методы производства и формование сетчатой формы делают литьевые формы пригодными для использования.

В связи с этим, толстые секции были преобразованы в «оболочку» из пластмассы. Это выполняется путём формования в оснастке под деталь тонких стенок, соединенных кривыми, углами, рёбрами и смещениями. По возможности, все эти стенки должны быть одинаковой толщины. Главным аспектом является правильное определение толщины стенок при проектировании: толстой для обеспечения прочности и жёсткости, и достаточно тонкой для быстрого и равномерного охлаждения.



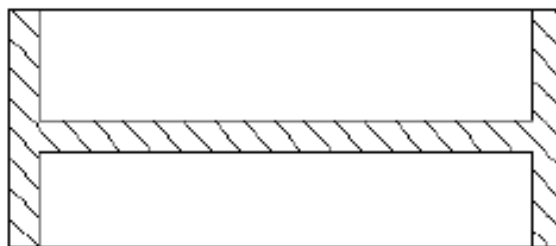
- Рисунок 1 – Дефекты полимерных деталей при производстве [2]:
- а) дизайн-проект, с толстыми секциями и разной толщиной стенок;
  - в) физическая деталь, со следами раковин, пустотами и деформациями



**А**



**Б**



**В**

Рисунок 2 – Требования к проектированию толщины полимерных деталей

[1]:

а) неверный вариант проектирования,

б) и в) верный вариант проектирования, равнотолщинная стенка

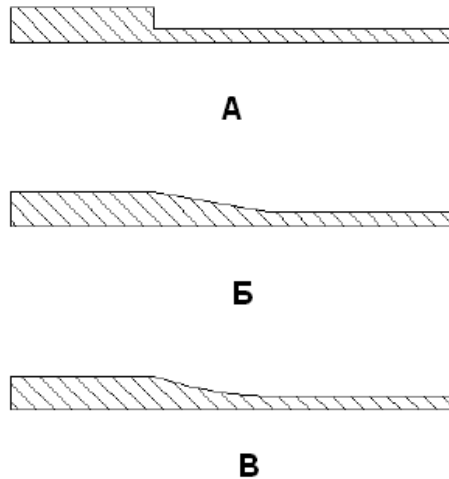


Рисунок 3 – Методы исключения острых кромок [2]:

- а) неверный вариант проектирования, острый угол,
- б) и в) верный вариант проектирования, постепенный переход толщин с помощью радиуса или планки

В качестве общего руководства для выбора толщины стенок были составлены данные: от 0,75 мм до 3 мм для композитных материалов, от 0,5 мм до 5 мм для ненаполненных материалов. В идеале весь компонент должен иметь одинаковую толщину - номинальную толщину стенки. На практике это часто невозможно; необходимо варьировать толщину в зависимости от функций или эстетики [2]. Пластмассовая деталь с разной толщиной будет испытывать разную скорость охлаждения и усадки. В результате, получим деталь, которая деформируется и имеет места коробления. Во избежание дефектов предусмотрены постепенные переходы между разными толщинами детали в виде кривой или радиуса.

Значения радиуса при выборе и проектировании углов.

Когда идеи правильной и равномерной толщины стенок реализуются на практике, в результате получается пластмассовая деталь, состоящая из относительно тонких поверхностей. Способ соединения этих поверхностей также очень важен для качества отформованной детали. Стенки обычно пересекаются под прямым углом, например, на углах коробки. Там, где стенки

коробки пересекаются с основанием, угол обычно составляет чуть больше 90 градусов, так как стенки имеют уклон. Самый распространенный способ для соединения стенок — это острые углы внутри и снаружи. Но это приводит к возникновению двух ситуаций:

Первая ситуация заключается в том, что увеличение толщины под углом нарушает правило равномерной толщины стенок. Максимальная толщина под острым углом примерно в 1,4 раза больше номинальной толщины стенки. В результате увеличивается время охлаждения, что сопровождается риском образования раковин и коробления из-за дифференциальной усадки.

Другая ситуация еще более серьезная. Острые углы концентрируют напряжение и значительно повышают риск разрушения детали в процессе эксплуатации. Это справедливо для всех материалов, но особенно для пластмасс. Считается, что пластмассы чувствительны к надрезам, поскольку они склонны к разрушению под острыми углами. Это происходит потому, что концентрация напряжения в углу достаточна для возникновения микроскопической трещины, которая распространяется через стенку и приводит к полному разрушению детали. Острые внутренние углы и вырезы являются единственной наиболее распространенной причиной механического разрушения формованных деталей. Для того, чтобы избежать возникновения разрушения формованных деталей в острых углах используют радиуса.

Из расчётов, концентрация напряжений резко возрастает, когда отношение радиуса к толщине стенки падает ниже 0,4. Поэтому внутренний радиус ( $r$ ) должен быть не менее половины толщины стенки ( $t$ ) и предпочтительно находиться в диапазоне от 0,6 до 0,75 толщины стенки, как на рисунке 4 [2].

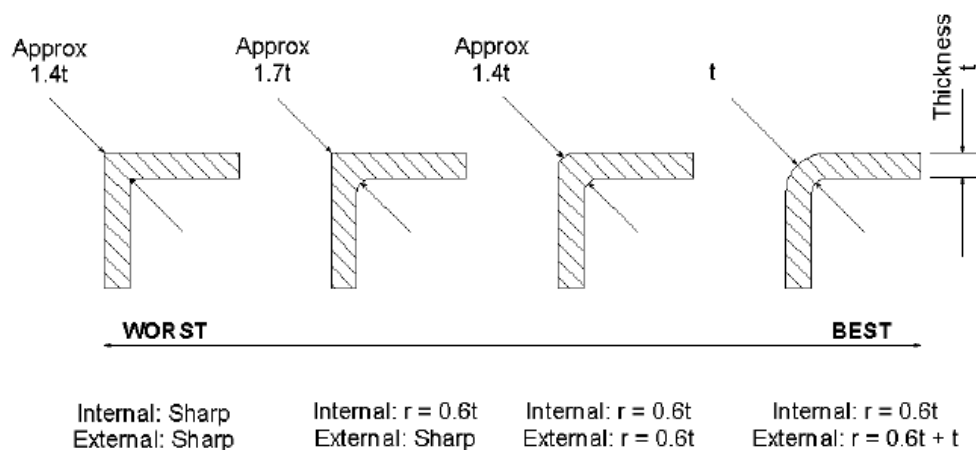


Рисунок 4 – Варианты проектирования угла

Если внутренний угол закруглить, а внешний оставить острым, то на углу все равно останется толстая точка. Для внутреннего радиуса  $0,6t$  максимальная толщина увеличивается примерно до  $1,7$  толщины стенки. Это может быть исправлено с помощью добавления радиуса к внешнему углу. Внешний радиус должен быть равен внутреннему радиусу плюс толщина стенки вокруг угла. Правильно спроектированные углы будут иметь большое влияние на качество, прочность и точность размеров формовки. Но есть и другое преимущество. Гладкие изогнутые углы помогают течению пластика в форме, за счет уменьшения перепадов давления в полости и минимизации разрушения фронта потока.

Важным параметром для прочности детали являются ребра жёсткости (рисунок 5), которые помогают оставаться нужной форме деталям больших размеров. Но если неправильно рассчитать толщину и размер ребра, возникнет дефект, усадка или коробление. Поэтому существует ряд зависимостей, которые должны быть соблюдены в процессе построения: толщина ребер должна составлять 50-75% от толщины стенки; радиус закругления должен составлять 40-60% от толщины ребер; толщина корня ребра не должна более чем на 25% превышать толщину стенки; глубина ребер не должна превышать толщину ребра более чем в 5 раз.

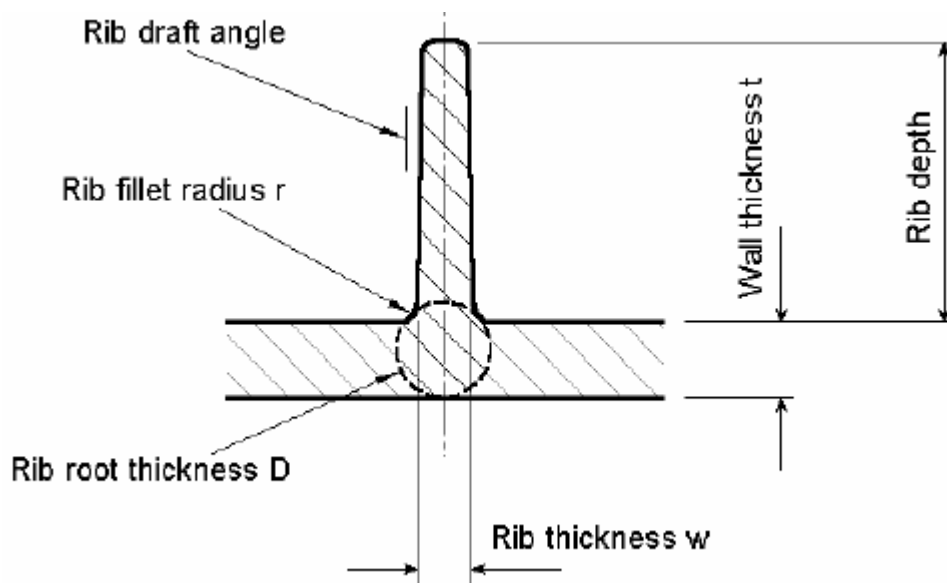


Рисунок 5 – Утолщение у корня ребра

Способ проектирования бобышек из полимерного материала.

Бобышка является одной из основных форм в конструкции пластмассовой детали. Бобышка проектируется в виде цилиндрической формы, так как цилиндр является простой формой для обработки в оснастке и прочной для реализации в формованной детали. Используется в виде точки крепления, точки расположения, усиления вокруг отверстия или распорки. Бобышка может иметь вставку, винт или гладкий вал, в виде ползуна или запрессовки.

В зависимости от использования, бобышка подвергается ряду сил: растяжение, сжатие, кручение, изгиб, сдвиг или разрыв, поэтому она должна быть сконструирована правильно.

В тоже время, бобышку можно рассматривать как ребро жёсткости, которое обёрнуто в виде трубки. Если рассматривать идеальное представление бобышки, то она выступает в соответствии с правилами ребристости, не оставляя следов погружения или прилипания к форме, но тогда трубчатая форма бобышки имела бы недостаточную прочность. Так, на

практике многие бобышки, при необходимости, нарушают правила проектирования рёбер жёсткости (рисунок 6). Это приводит нас к тому, что проектирование бобышки выступает, как компромисс между стадией возникновения усадки и функциональностью.

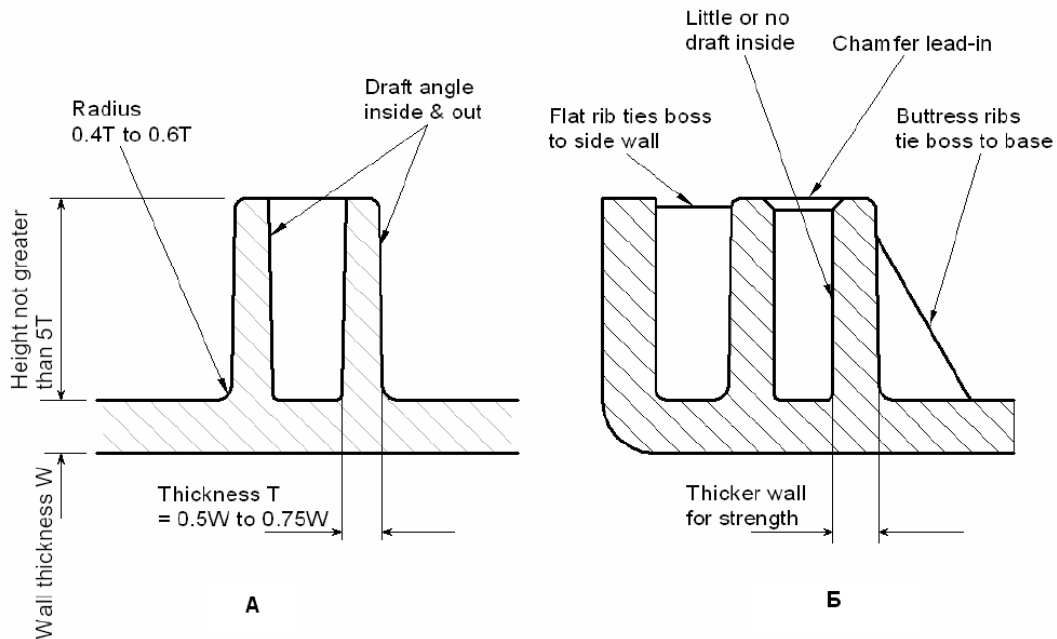


Рисунок 6 – Метод проектирования бобышек:

- а) рекомендуемый вариант проектирования бобышки, б) практический вариант проектирования и реализации бобышки

Жесткость - самый простой аспект конструкции бобышек. Она может быть достигнута путем поддержания бобышки с помощью опорных ребер и часто путем соединения бобышки с боковой стенкой. Опорные ребра могут быть спроектированы по обычным правилам, чтобы избежать появления раковин и точек напряжения. Когда бобышка соединяется с боковой стенкой, либо на краю, либо на углу детали, есть два возможных результата, показанных на рисунке 7.

Отрицательный способ заключается в том, чтобы просто увеличить наружный диаметр бобышки до упора в стенку. При этом неизбежно

образуется толстый участок, что приведет к образованию раковин, пустот и длительным циклам охлаждения. Положительный способ – связать или привязать бобышку к боковой стенке плоским ребром, желательно утопленным немного ниже высоты бобышки или кромки, чтобы оно не мешало при сборке. Другие ребра, связывающие бобышку с основной стенкой, остаются в качестве опорных ребер.

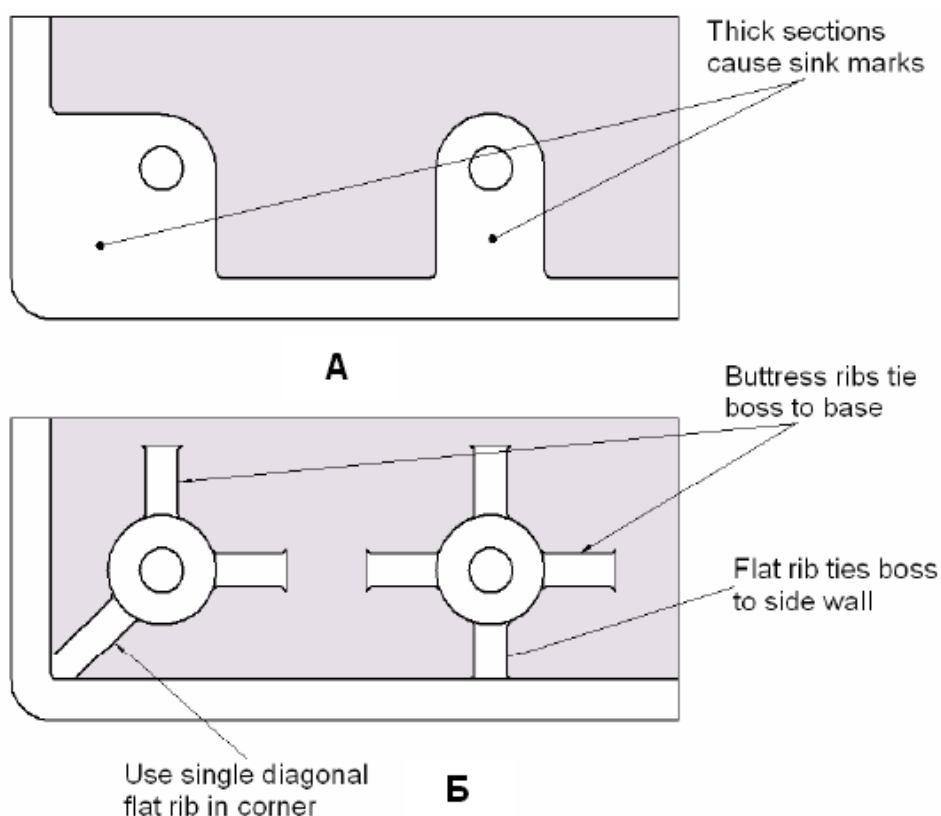


Рисунок 7 – Метод проектирования бобышек:

- а) отрицательный вариант проектирования, б) правильный вариант проектирования

Для экономичной обработки формы ребра должны быть выровнены по осям X – Y детали, за исключением плоского углового ребра, которое располагается под углом 45 градусов. Одно диагональное ребро лучше, чем два ребра XY, так как позволяет избежать образования небольшого ядра формы между ребрами. Такие маленькие ядра склонны к повреждениям и



трудно охлаждаются; это может привести к замедлению циклов формовки и увеличению времени простоя. Итак, мы определили, как соединить бобышку с остальной частью детали. Более сложная часть проектирования бобышек касается отверстия и толщины бобышки.

Распространённое применение бобышки является установка винтового крепежа. Широко распространены два типа винтов. Винты с нарезанной резьбой работают путем срезания части внутренней стенки бобышки при вкручивании. При этом образуется внутренняя резьба и некоторое количество стружки. Винты для формовки резьбы получают внутреннюю резьбу методом холодной проточки; при этом пластик локально деформируется, а не режется, и стружка не образуется. Как правило, винты для формовки предпочтительны для термопластов, в то время как резьбонарезные винты лучше использовать для твердых неэластичных материалов, например, терморезистивных.

Из-за разнообразия представленных на рынке винтов трудно дать общее правило проектирования, но один из подходов состоит в том, чтобы использовать модуль упругости материала как руководство к выбору типа. Размеры отверстий под винты должны быть рассчитаны на то, чтобы выдерживать как усилия при вводе винта, так и нагрузку, действующую на винт в процессе эксплуатации.

Размер отверстия относительно винта имеет решающее значение для сопротивления срыву резьбы и вытягиванию винта, в то время как диаметр бобышки должен быть достаточно большим, чтобы выдерживать напряжения, возникающие в процессе формирования резьбы. Винтовые бобышки имеют одну важную дополнительную особенность: отверстие под винт имеет цековку. Это снижает напряжение на открытом конце бобышки и помогает предотвратить ее раскалывание. Кроме того, цековка позволяет определить местоположение винта перед ввинчиванием. Размеры бобышки и отверстия зависят от двух факторов: диаметра резьбы винта и типа материала

пластмассы. На рисунке 8 приведены коэффициенты бобышек, отверстий и глубины для различных пластмасс.

Flexural Modulus of plastic (Mpa)	Preferred screw type
Less than 1,400	Thread-forming
1,400 to 2,800	Thread-forming or Thread-cutting
2,800 to 6,900	Thread-cutting
Greater than 6,900	Thread-cutting, fine pitch

Screw selection depends on material

Source: DuPont

Material	Hole Factor	Boss Factor	Depth Factor
ABS	0.80	2.00	2.0
ABS/PC	0.80	2.00	2.0
ASA	0.78	2.00	2.0
PA 46	0.73	1.85	1.8
PA 46 GF 30%	0.78	1.85	1.8
PA 6	0.75	1.85	1.7
PA 6 GF 30%	0.80	2.00	1.9
PA 66	0.75	1.85	1.7
PA 66 GF 30%	0.82	2.00	1.8
PBT	0.75	1.85	1.7
PBT GF 30%	0.80	1.80	1.7
PC	0.85	2.50	2.2
PC GF 30%	0.85	2.20	2.0
PE-HD	0.75	1.80	1.8
PE-LD	0.75	1.80	1.8
PET	0.75	1.85	1.7
PET GF 30%	0.80	1.80	1.7
PMMA	0.85	2.00	2.0
POM	0.75	1.95	2.0
PP	0.70	2.00	2.0
PP TF 20%	0.72	2.00	2.0
PPO	0.85	2.50	2.2
PS	0.80	2.00	2.0
PVC-U	0.80	2.00	2.0
SAN	0.77	2.00	1.9

Рисунок 8 – Таблица диаметров для разных материалов

Чтобы спроектировать бобышку винта, найдите материал и умножьте диаметр резьбы винта на соответствующие коэффициенты для определения размеров отверстия, бобышки и минимальной глубины зацепления резьбы. Разнообразие доступных типов винтов и марок пластмасс означает, что общие рекомендации следует использовать с осторожностью.

Производительность винтов и бобышек также, может зависеть от негативного влияния внешних факторов. Если бобышка была отформована с линией сварки, прочность на разрыв может быть снижена. Многое зависит и от условий эксплуатации: если бобышка подвергается воздействию высокой рабочей температуры или воздействию окружающей среды, вызывающие растрескивание, его эксплуатационные характеристики будут снижаться. Поэтому при проектировании бобышек для винтов пользуются рекомендациями производителя для конкретного типа винта.

Подводя итог, было установлено, что правильно спроектированная деталь обеспечивает функциональность, качество геометрии и технологию изготовления объектов, которые отвечают потребностям потребителей без каких-либо дефектов. К важным факторам проектирования деталей, относится также выбор программного обеспечения.

#### **1.4 Обзор программного обеспечения для проектирования изделий из пластмассы**

На сегодняшний день, существует несколько программ для проектирования, настройки, симуляций и обзора изделий из любого материала.

В данной работе были проанализированы такие программы, как NX и CATIA.

В промышленных масштабах для проектирования деталей интерьера используется программа CATIA. Она имеет ряд преимуществ для проектирования сложных изделий и машин. CATIA может интегрироваться с другими программами, такими как PDM и ERP системы, что делает процесс проектирования более эффективным и уменьшает время, затрачиваемое на управление данными. В данной программе присутствует широкий диапазон

функций для создания и редактирования 3D-моделей, включая функции создания кривых, поверхностей и объемных тел.

В данной работе требуется создать сложную геометрию детали и запустить инженерный анализ с широким диапазоном данных, что требует применения программного функционала в единой информационной среде такой, как в программном продукте NX Siemens PLM Software. В данном программном продукте не только удобно проектировать, но и легко работать со сборками обширных компонентов в автомобиле. Интерфейс пользователя является интуитивно понятным, что облегчает процесс работы и повышает эффективность создания новых деталей. Широкое применение в промышленности, включая автомобильную, авиационную и оборонную промышленность, делает программный продукт NX особенно востребованным.

В настоящей работе была выбрана программа NX для проектирования деталей панели приборов и проведения инженерного анализа на основании широкого набора функций и процессов для реализации расчётов в единой информационной среде CAD/CAE, что позволяет быстрее и качественнее получить результаты исследований.

## **1.5 Обзор основных процессов получения пластиковых деталей**

В настоящее время существуют разные процессы получения пластиковых деталей. Каждый процесс имеет свои преимущества в геометрии, области применения и качестве получаемых изделий.

Рассмотрим основные из них.

Одним из распространенных процессов обработки пластмасс является литье пластмасс под давлением - Injection Molding Overview. Процесс литья под давлением, который осуществляется с помощью специальной машины - термопластавтомата, показанного на рисунке 9. Литьё пластмасс под

давлением – процесс переработки пластмасс путем впрыска их расплава под давлением в пресс-форму с последующим охлаждением.

Преимущества метода: высокая точность изготавливаемых изделий; низкая температура формования пластмасс; низкая себестоимость деталей; разнообразие физико-механических свойств; разнообразие способов переработки.

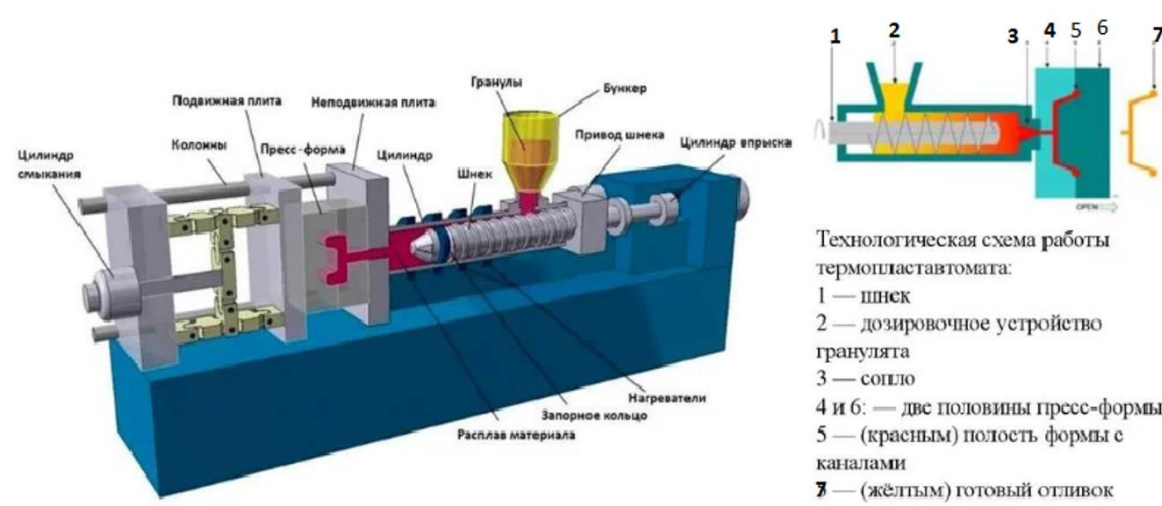


Рисунок 9 – Технологическая схема работы термопластавтомата

Время разработки суммарно состоит из таких временных промежутков, как: время разработки в закрытой пресс-форме и действиях технического специалиста.

Суть процесса литья пластмасс под давлением состоит в следующем.

Полимер расплавлен и накоплен в литьевой машине, то есть цилиндре пластификации. При этом молекулы материала находятся в неупорядоченном состоянии, не обладая точной ориентацией в пространстве. Расплав под давлением перемещается в форму и заполняет ее. При этом молекулы материала получают определенную пространственную направленность. Расплав в форме застывает с образованием твердого изделия. Пресс-форма размыкается и изделие удаляется. Далее цикл литья повторяется для производства следующей детали (рисунок 10).

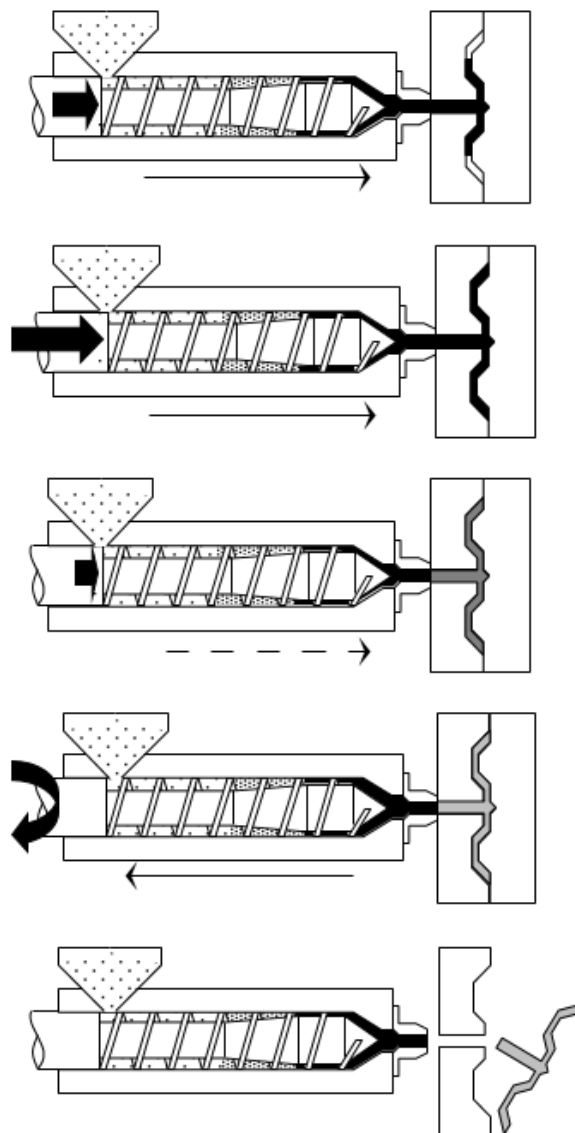


Рисунок 10 – Процесс производства детали методом литья под давлением

Для более подробного ознакомления с оборудованием для получения нужной формы изделий используют оснастки (пресс-формы), образец показан на рисунке 11.

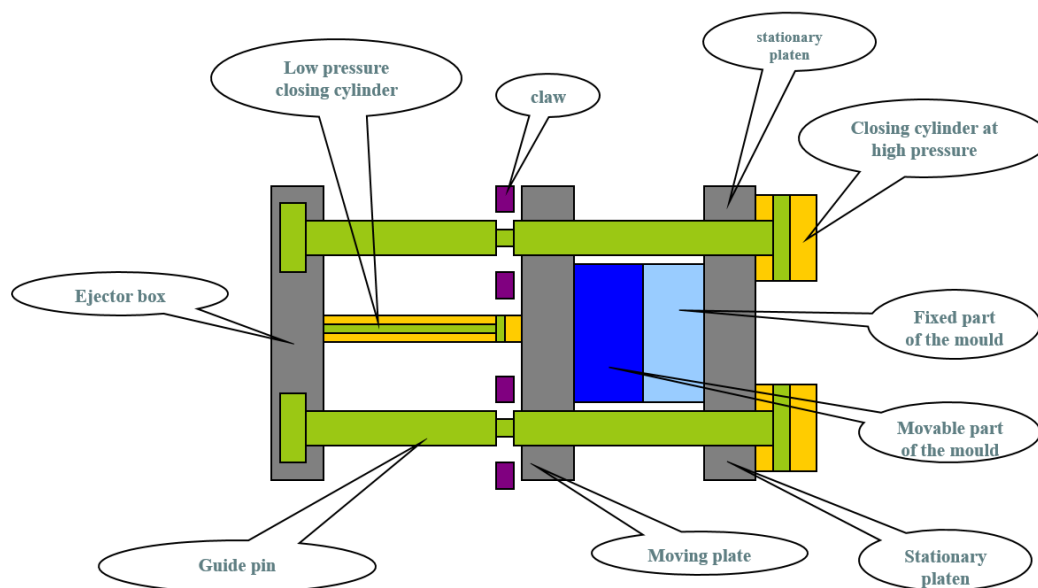


Рисунок 11 – Схема структуры оснастки

Второй процесс обработки пластмасс — это процесс формования выдуванием (Blow molding).

Выдувное формование – это производственный процесс, который используется для создания полых пластиковых деталей путем надувания нагретой пластиковой трубки до тех пор, пока она не заполнит форму и не сформирует желаемую геометрию.

Сырьем в этом процессе является термопласт в форме небольших гранул, который сначала расплавляется и формируется в полую трубку, называемую заготовкой. После того, как деталь остыла, половинки формы отделяются и деталь выталкивается. Детали, изготовленные методом выдувного формования, являются полыми и тонкостенными, такими как бутылки и контейнеры, воздуховоды, полки багажника (рисунок 12).

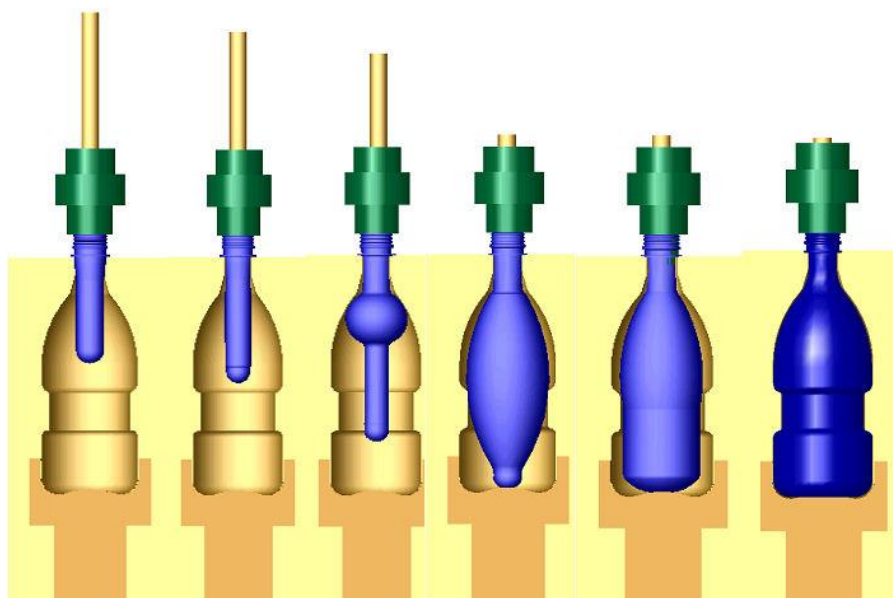


Рисунок 12 – Процесс формования выдуванием

Третий метод обработки пластмасс – формование с помощью впрыска газа (Gas Injection).

Эта технология позволяет создавать впрыскиваемые полые детали. Например, для изготовления рукоятки. На рисунках 13 – 15 показан процесс заполнения пресс-формы полимером с помощью впрыска газа.



Рисунок 13 – Процесс получения детали выдувным формованием. Начало впрыска газа



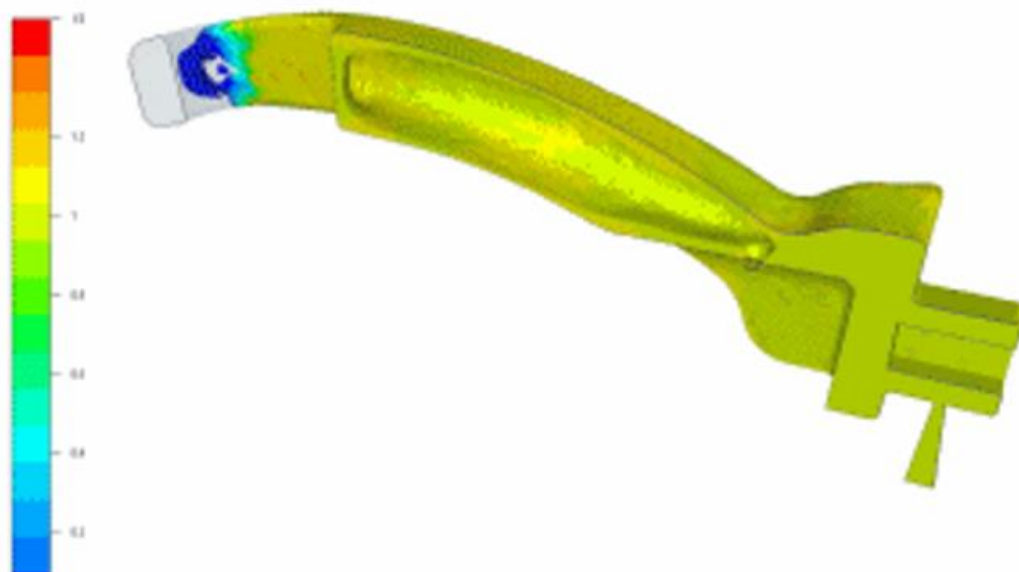


Рисунок 14 – Процесс получения детали выдувным формованием. Конец впрыска полимера с помощью газа



Рисунок 15 – Процесс получения детали выдувным формованием. Готовое изделие ручки, изготовленной с помощью впрыска газа

Все вышеперечисленные методы формования изделия из полимера являются традиционными в применении массового производства. Но также,

есть такие методы, как Ротационное формование пластмасс (рисунок 16) и Slush-molding (рисунок 17), которые являются более новыми процессами для формования деталей интерьера автомобиля с новыми возможностями декорирования.

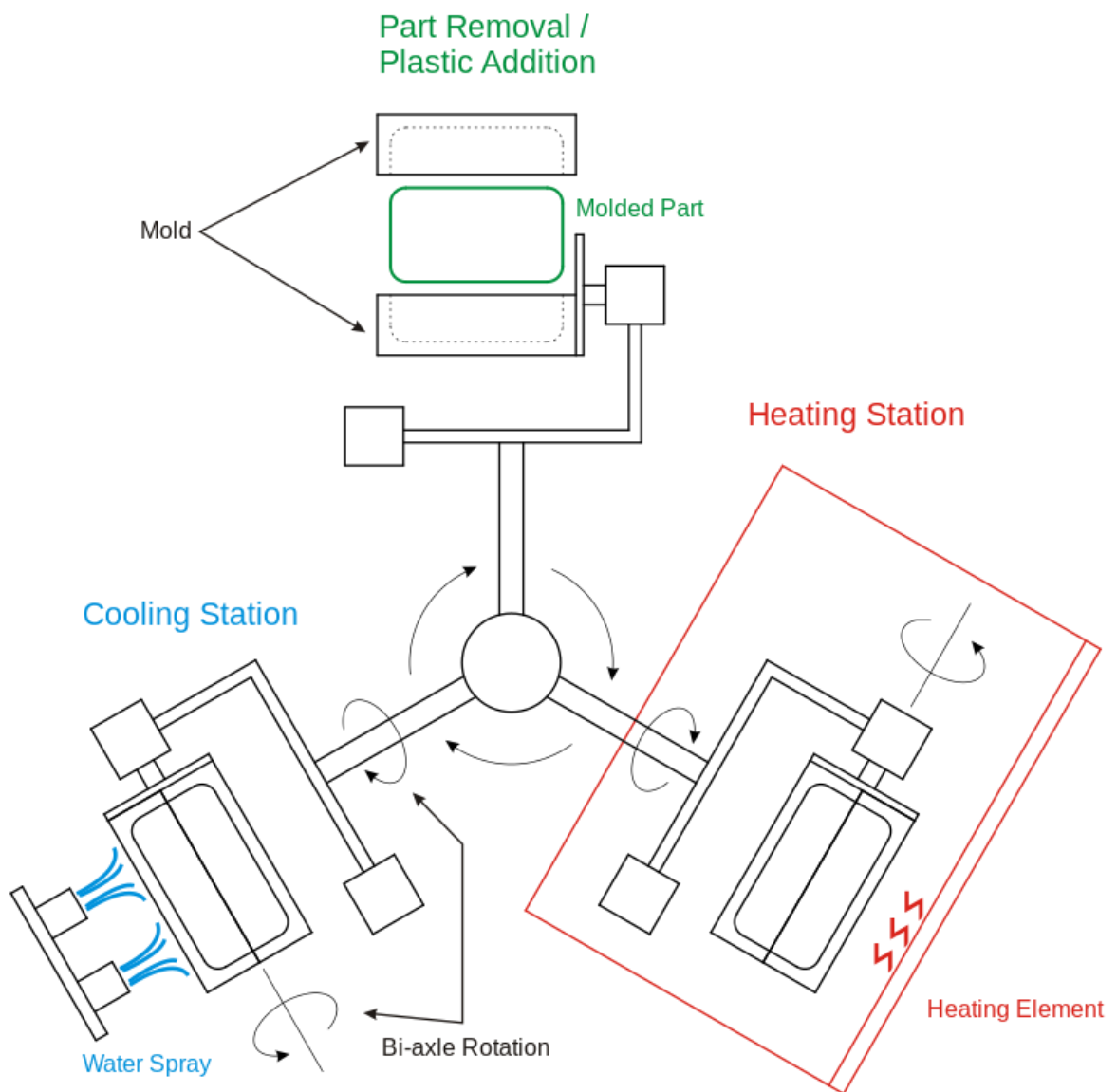


Рисунок 16 – Ротационное формование пластмасс [23]

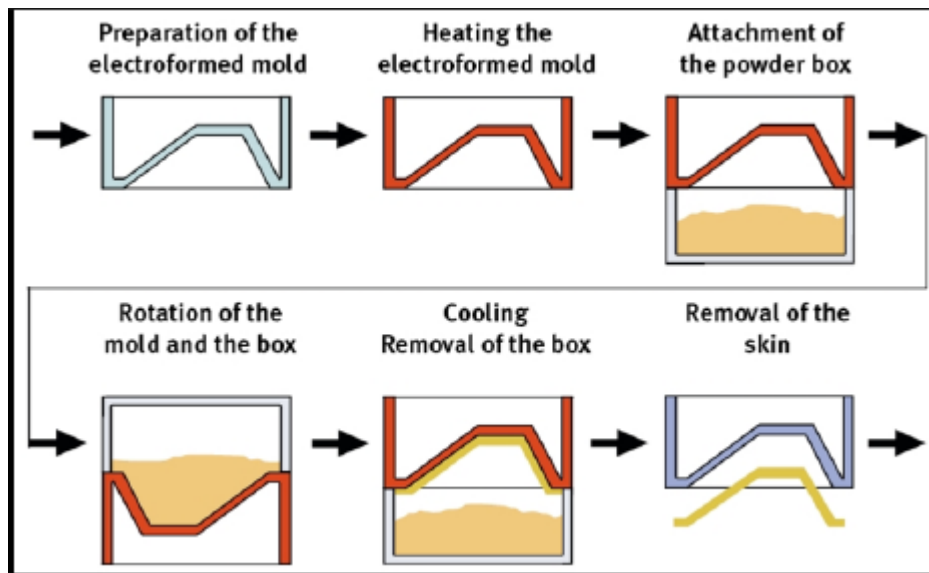


Рисунок 17 – Процесс Slush-molding [23]

Данные методы используются для более сложных деталей геометрии. Эти процессы являются дорогостоящими, что указывает на узкий круг применения изготавливаемых изделий.

Полученные данные указывают на то, что метод литья под давлением больше всего подходит для применения в серийной жизни, для получения таких деталей, как панель приборов и щиток панели приборов с высокими конструкционными свойствами.

## 1.6 Дефекты, возникающие при эксплуатации полимерных деталей

В промышленности выделяют ряд дефектов, которые могут возникнуть при эксплуатации полимерных деталей. Эта тема является актуальной проблемой для автомобильной промышленности.

Дефектами, которые встречаются в процессе долгой эксплуатации, являются вредный шум и скрипы.

Водитель и пассажир замечают многие внешние шумы или раздражители, в виде скрипа, во время нахождения в салоне автомобиля. Поэтому в промышленности существуют определенные тесты, проверки и

мнения, которые учитывают результаты шума салона новых проектов и далее, выносятся темы для доработки в процессе изготовления деталей.

На стадии проектирования деталей, учитываются интерфейсы окружения и требования к зазорам между деталями. Также, важным фактором является материал деталей, который не будет производить вредных шумов в эксплуатации автомобиля в паре с окружением.

Между деталями в паре «движущаяся», следует сохранять зазор в 15 мм, если детали в паре «движущаяся и неподвижная» – соблюдают в 10 мм, а детали в статичной паре имеют 5 мм зазора.

Если не учитывать данные требования, то будут возникать вредные шумы, что приведёт к жалобам потребителя. Поэтому тест на выявление шумов будет рассмотрен в данной работе.

Дефект коробления, является актуальной проблемой для полимерных деталей новых проектов. Так как дизайнерские идеи опережают возможности производственной площадки. В таком случае возникают ситуации, когда инженер должен правильно учитывать места крепления деталей и расположения рёбер жёсткости, чтобы специалист смог беспрепятственно установить деталь так, чтобы она крепко закрепилась и не коробилась бы во время установки.

Как было описано в подразделе 1.3, есть особые требования к расчёту ширины, высоты и количества рёбер. В настоящей работе, будет проведён анализ для получения результатов максимальных напряжений, которые сможет выдержать деталь при ее установке без выявлений дефектов.

Выводы по первому разделу:

В ходе проведенного анализа методов проектирования изделий из пластмассовых материалов, применяемых в автомобилестроении, были сделаны следующие промежуточные выводы:

- 1) К процессу разработки интерьера автомобиля, предъявляют особые требования, такие как: безопасность водителя и пассажира, воспринимаемое качество потребителем, долговечность конструкции, трудоемкость процесса. Эти требования влияют на себестоимость изделия и его качество, которое в последующем оказывает воздействие на дальнейшее развитие процесса разработки и анализа конструкции.
- 2) Особо важен подход к выбору материала, оказывающий влияние на процесс проектирования изделия и получения готового продукта. В настоящей работе будут рассматриваться материалы АБС и ПП.
- 3) Следует учитывать правила построения сложных геометрических деталей для уменьшения вероятности появления дефектов во время отливок изделий.
- 4) Процесс литья под давлением является самым распространенным методом получения сложных деталей из пластмассы. Данный метод применяется к процессу изготовления щитка и панели приборов.
- 5) Проблема производства пластиковых деталей выявляется на стадии эксплуатации автомобиля. В процессе продолжительного использования появляются такие дефекты, как скрип, шум или коробление. В данной работе будут рассмотрены инженерные способы анализа, которые позволят оценить геометрию ММ детали для получения качественного изделия.

## **2 Разработка в САПР электронных моделей пластмассовых деталей легкового автомобиля**

Разработка электронных моделей полимерных деталей в автомобильной промышленности в последнее время достигла огромного прогресса. Использование технологии 3D-моделирования сделало возможным производство экономичных, одиночных, сложных и индивидуальных автомобильных компонентов.

Для анализа возможности проектирования деталей легкового автомобиля в САПР, выбора оптимального материала и снижения вероятности получения дефектов, обратимся к литературе [2, 3-10].

### **2.1 Описание конструкции узлов из полимерных материалов легкового транспорта**

Процесс исследования представляется в виде проекта, разбитого на 6 этапов работы:

- Описание конструкции узлов из деталей панели приборов.
- Построение в САПР электронных моделей выбранных деталей для анализа (щиток и панель приборов).
- Разработка в САПР сборочного узла на основании ранее созданных электронных моделей деталей.
- Постановка задачи для оценки устойчивости, прочности конструкции и ее собственных колебаний в виртуальной среде.
- Идеализация моделей деталей и построение сетки КЭ.
- Инженерный анализ расчёта.
- Оценка поведения конструкции.

На первом этапе выполним описание конструкции узлов. В перечень панели приборов входит большое количество деталей (рисунок 18).

Основными группами сборочных узлов и отдельных компонентов, входящих в область ПП являются:

- вещевого ящик в сборе;
- кожухи вала руля;
- декоративные молдинги центральные;
- сопла и воздуховоды;
- центральная консоль (ЦК);
- чехол рычага контроллера переключения передач (КПП);
- дефростеры; облицовки климат-контроля;
- мелкие ящики;
- щиток панели приборов;
- каркас панели приборов и верхняя накладка.

Каждый компонент имеет сложную геометрическую форму, которая включает в себя: рёбра жёсткости, скругления, места крепления и декоративные вставки. Такая реализация изделия влияет на конструкционные функции компонентов, а также на положительное мнение потребителя при покупке автомобиля.

На рисунке 19 представлен вариант реализации деталей ПП в серийной жизни легкового автомобиля.

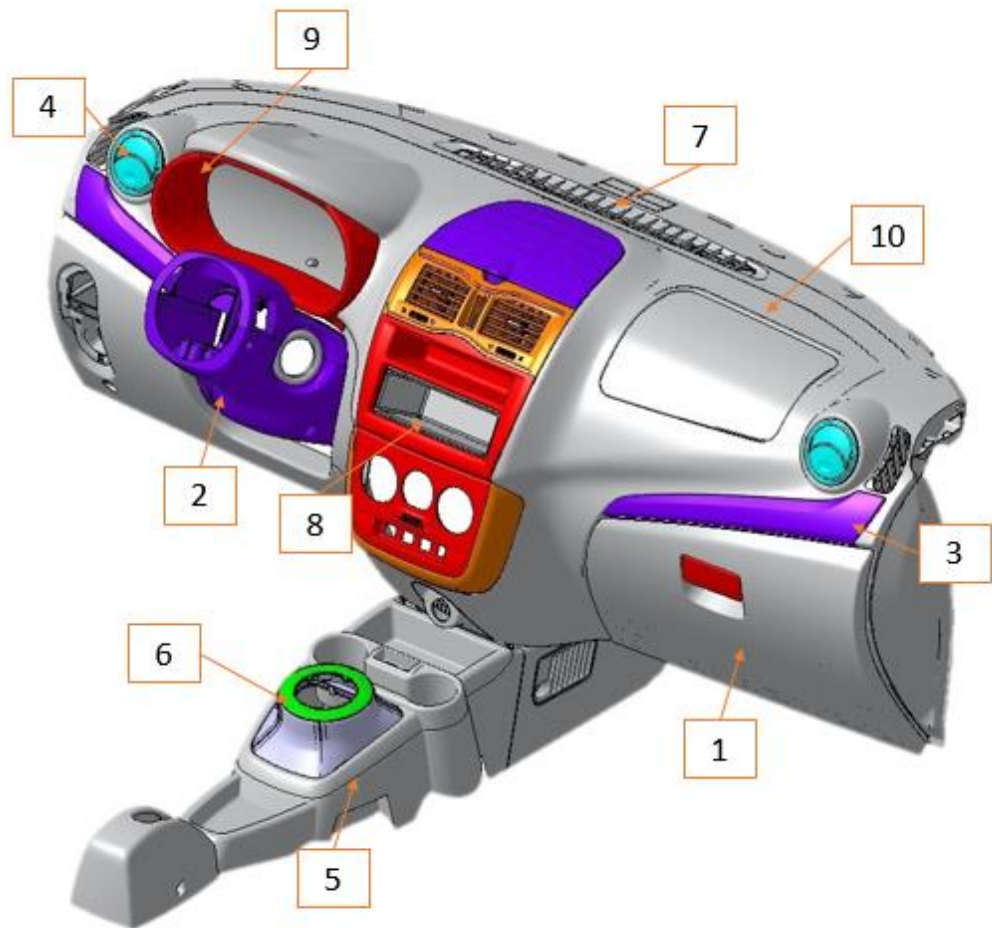


Рисунок 18 – Электронная модель панели приборов легкового автомобиля



Рисунок 19 – Физическая панель приборов в автомобиле



Основными компонентами, которые входят в сборку ПП являются верхняя и нижняя часть каркаса ПП (10), которые обеспечивают в свою очередь основополагающую функцию для всех остальных деталей в сборочном узле.

Декоративными деталями и облицовочными являются следующие детали: молдинги (облицовки панели приборов, выделенные 3), щиток (9), кожухи вала руля (2), облицовки отопительной системы (7), маленькие ящики (8), шторки открывания и закрывания воздуховодов (4) и т. д.

На основе выявленных дефектов ПП автомобиля отдельное внимание в работе будет уделено рассмотрению таких деталей, как щиток и каркас панели приборов.

Проектирование выбранных деталей будет осуществляться в следующем порядке: создаются трёхмерные модели каждого компонента изделия в программном продукте, выбранном в качестве инструмента исследования. Далее детали объединяются в электронные сборки. Проводится расчёт деталей методом конечных элементов (КЭ), уточняются размеры деталей, даются рекомендации по различным параметрам будущего изделия.

Запускается анализ, для которого используется модуль, предназначенный для проверочных расчетов деталей и сборок с оценкой устойчивости конструкции и инструментами модального анализа. В качестве пре- и постпроцессора используется NX Advanced Simulation. Решателем выступает NX Nastran.

## **2.2 Построение в САПР электронных моделей полимерных деталей панели управления легкового автомобиля**

В процессе конструирования интерьера автомобиля, применяются разнообразные методы построения электронных моделей. Используются

твердотельные и поверхностные операции, с помощью которых из реальной детали, получается модель, которая в дальнейшем подвергается различным видам анализа.

Для проектирования конструкции интерьера автомобиля, необходимо проанализировать габариты панели приборов, кузова и для каждой отдельной детали в целом, с учётом физических и механических свойств материала. Описать их количественные и качественные характеристики, такие как: вес, габариты, объём, материал, точки изостатизма, и т.д. Описать технологические ограничения, характеристики деталей, какому воздействию подвергаются детали в процессе эксплуатации.

В процессе работы над новым проектом команда инженерии получает FI (интерфейсы) окружения и крепления деталей, а также размерные цепи от отдела архитектуры. Параллельно команда дизайнеров работает над стилевыми моделями деталей. После получения всех вышесказанных позиций, проводят анализ методов проектирования прошлых проектов (бэнчмарк) для сравнения конструкций.

Процедура построения начинается с вытягивания толщины заданных поверхностей. Распределяются крепежные элементы и направляющие по детали. Проектируются рёбра жёсткости. Задаются радиуса, фаски, скругления и диаметры отверстий (рисунок 20).

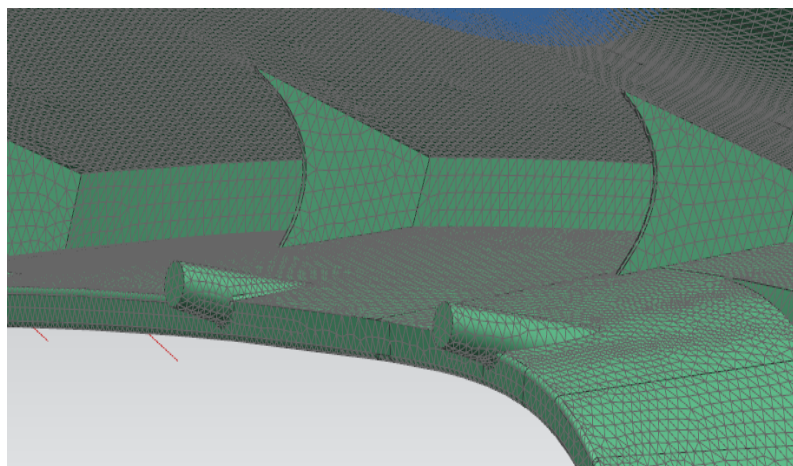


Рисунок 20 – Рёбра жёсткости

Модель козырька панели приборов автомобиля и габариты ПП деталей представлены на рисунках 21-24.

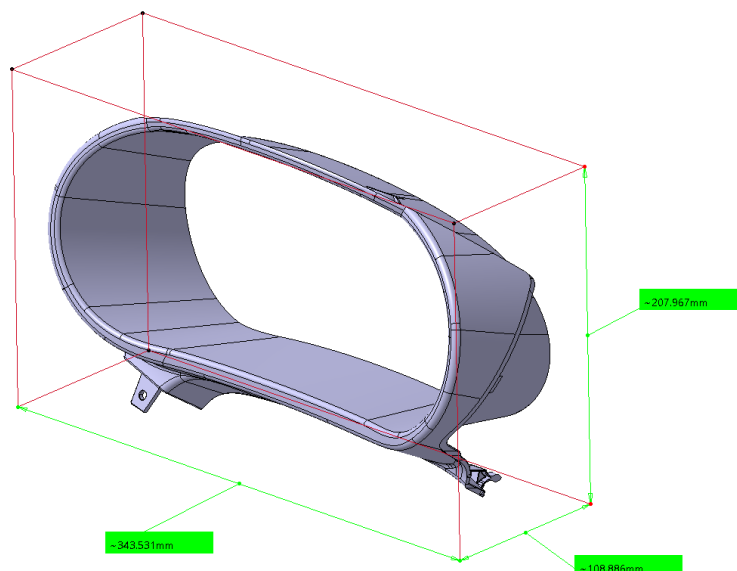


Рисунок 21 – Геометрические параметры визора

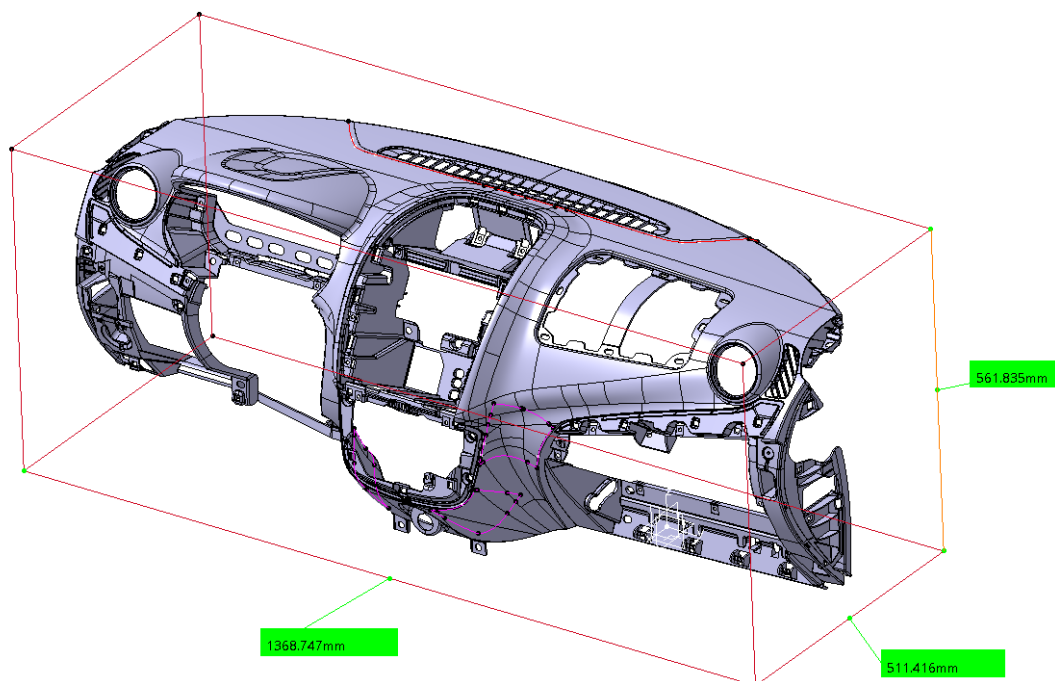


Рисунок 22 – Геометрические параметры панели приборов

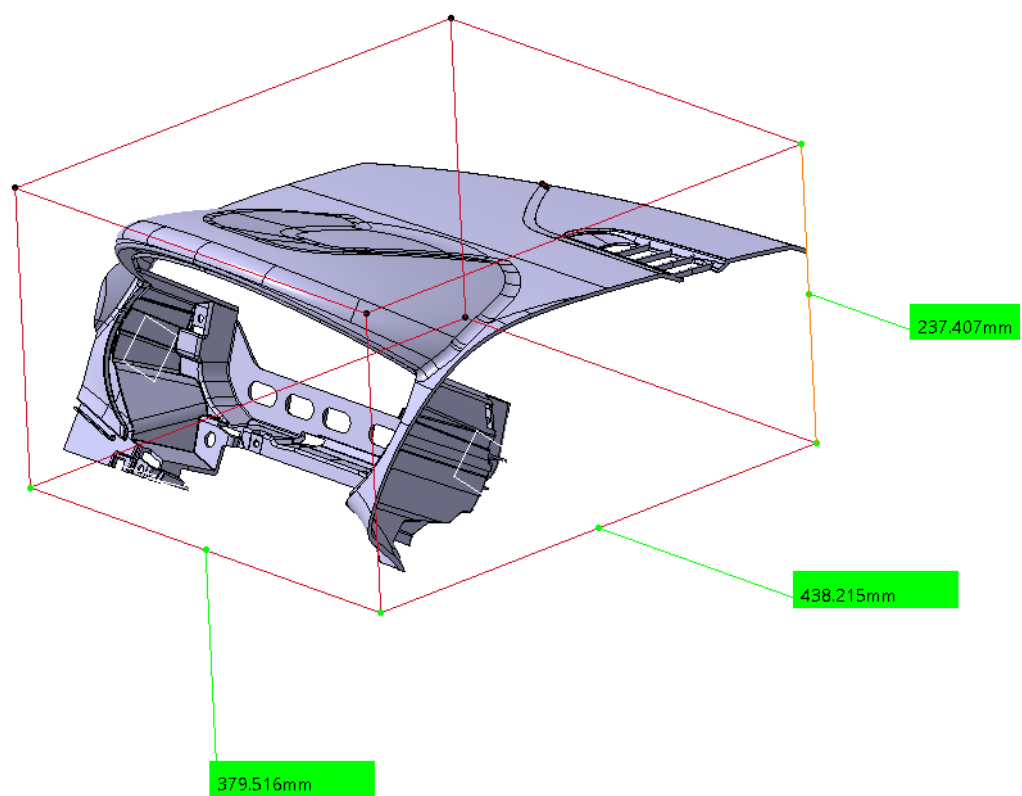


Рисунок 23 – Геометрические параметры облегчённой версии ПП (в)



Рисунок 24 – Козырёк ПП

### Проектирование щитка ПП.

Особенность щитка ПП заключается в необычной сферической форме. Толщина детали – 3 мм. Щиток - тонкостенная деталь, которая обеспечивает визуальное достоинство автомобиля (рисунок 25).

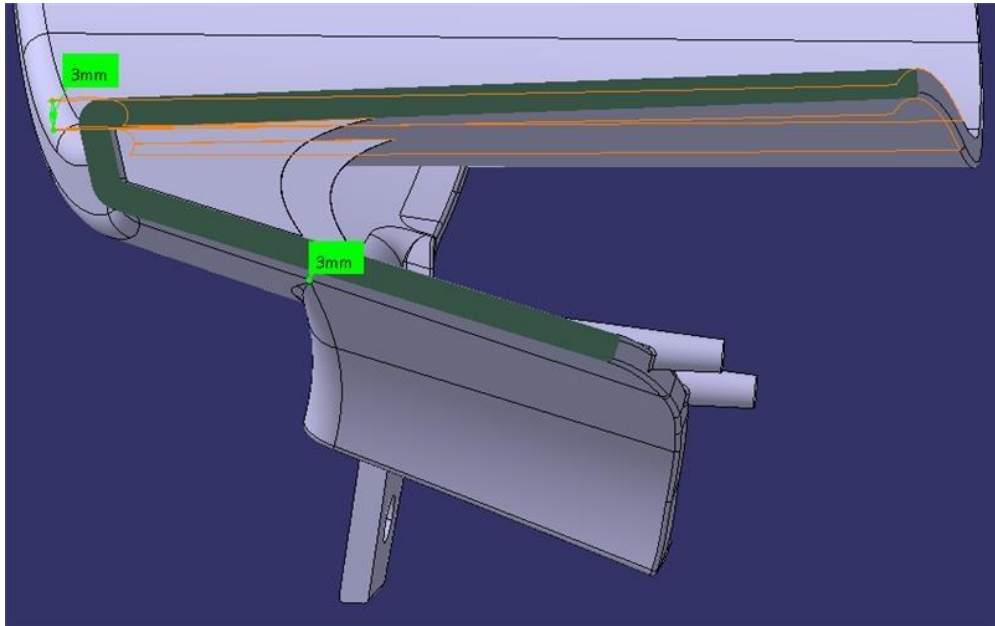


Рисунок 25 – Толщина щитка панели приборов

Радиуса соответствуют требованиям безопасности, их значение начинается от 2 мм и не превышают 5 мм. Такой разброс радиусов объясняется не только практическим значением, но и эстетическим (рисунок 26).

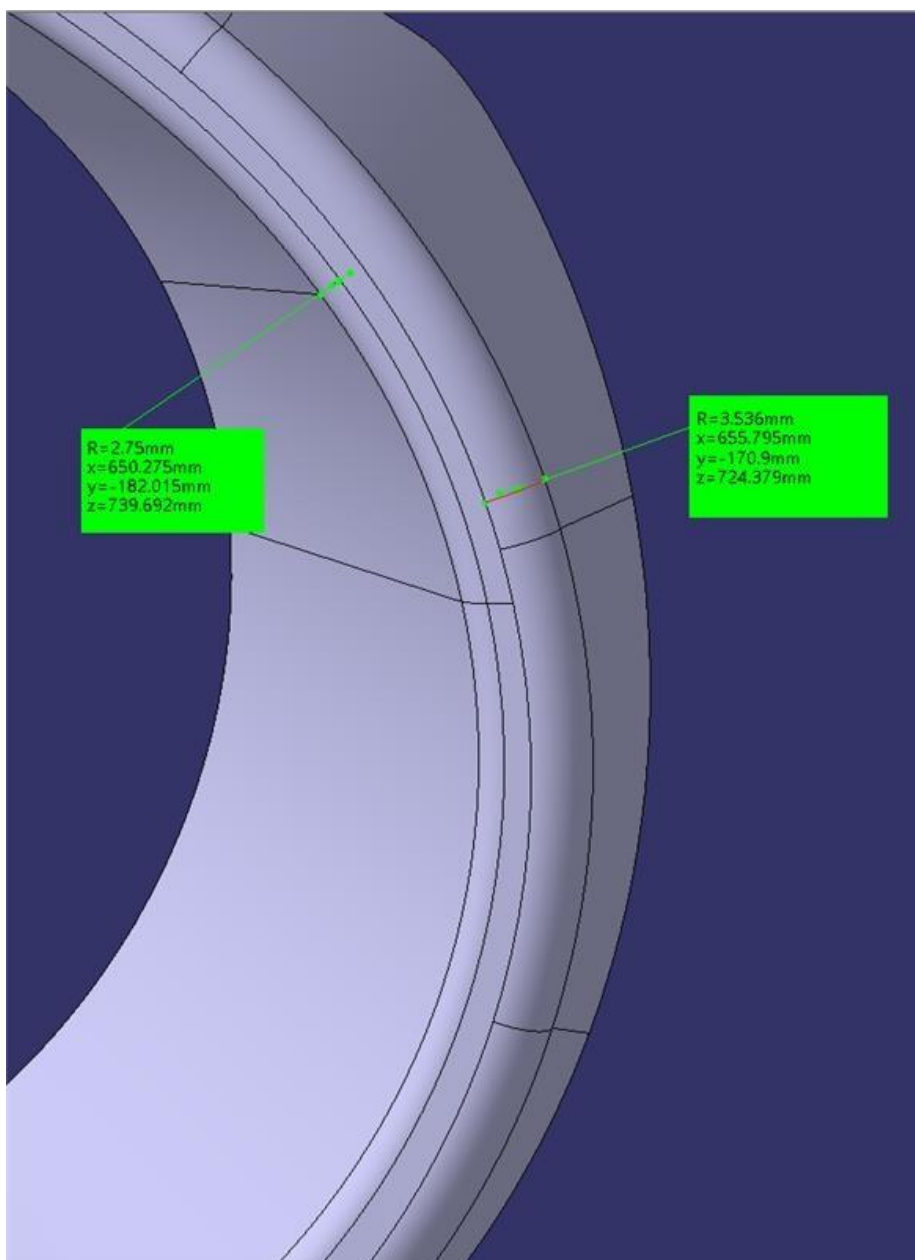


Рисунок 26 – Диапазон радиусов на щитке ПП

Выбор таких значений радиусов защищает от острых порезов во время удара пассажира о панель приборов, неравномерных переходов материала из видовой части в не видовую, и помогает расположить рёбра жёсткости (рисунок 27).

На данной модели, в не видовой зоне расположены три ребра жёсткости, щитка (рисунок 28), которые предотвращают коробление детали в зоне большой площади, увеличивают жёсткость детали при её установке на

конвейере и предотвращают появление скрипов и вибраций. Толщина рёбер равна 0,4 мм, что составляет 15% от толщины стенок.

Проведённый анализ в первой главе показал, что рёбра жёсткости должны быть спроектированы с учетом требований к толщине, где размер ребра составляет 50-75% от толщины стенки детали. В электронной модели щитка это требование не может быть выполнено по причине возможного возникновения видовых дефектов, как коробление или усадка, при повышенных значениях толщины рёбер.

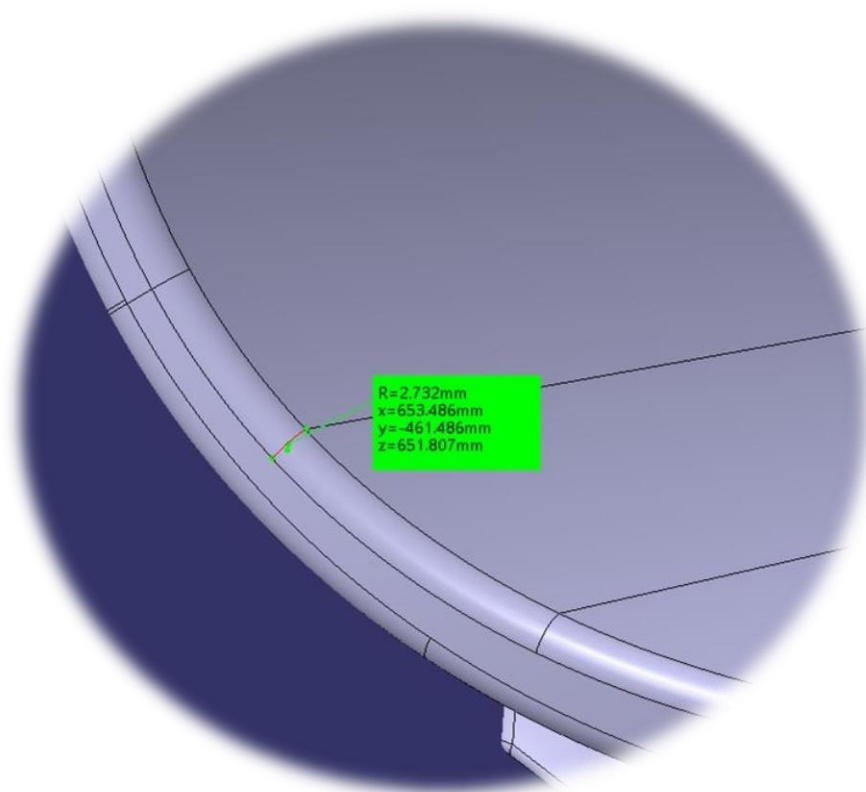


Рисунок 27 – Внутренние радиуса щитка ПП

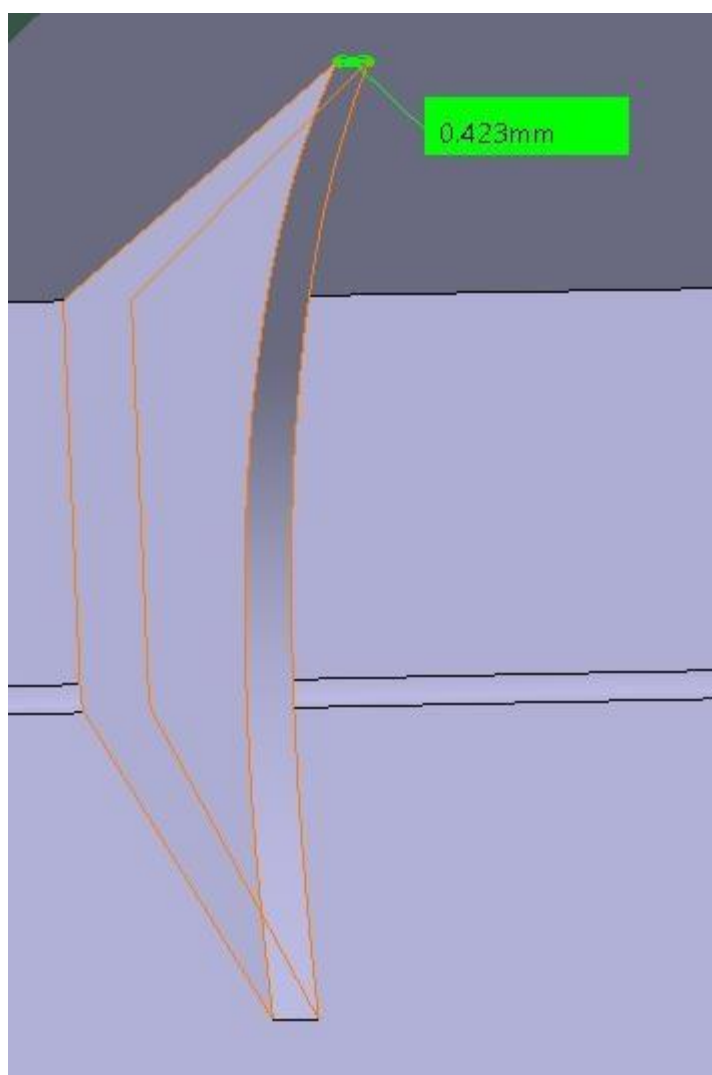


Рисунок 28 – Ребро жёсткости

Электронная модель щитка имеет три отверстия под зоны крепления радиусом 2,5 мм (рисунок 29). Кроме отверстий под жёсткую заделку винтами, есть направляющий пин (рисунок 30), который не только помогает правильно установить деталь, но и выдержать заданные зазоры на стадии определения концепции стиля.

В данной работе места крепления будут иметь особое значение в проведении инженерного анализа. При неправильном определении места крепления детали, будут заметны не только визуальные дефекты, но и более серьезные, такие как шум, вибрация, истирание.



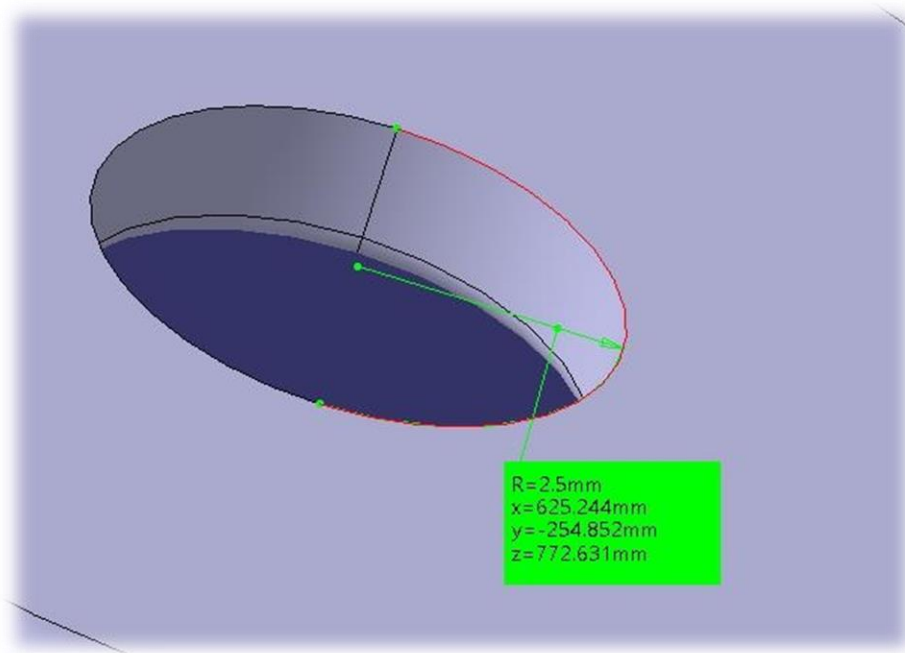


Рисунок 29 – Отверстие под жёсткую заделку на щетке

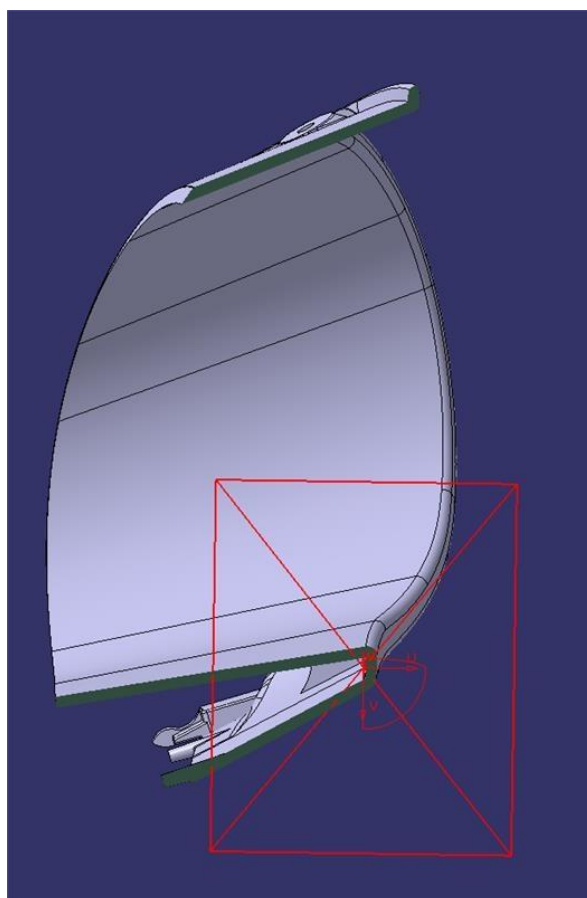


Рисунок 30– Вид в разрезе щитка ПП

### Проектирование ПП.

Аналогично, происходит построение электронной модели для каркаса панели приборов. Итоговый результат представлен на рисунке 31. Определяются габариты и стилевые поверхности от отдела архитектуры и дизайна. Добавляются радиусы, рёбра жёсткости и отверстия под крепления.

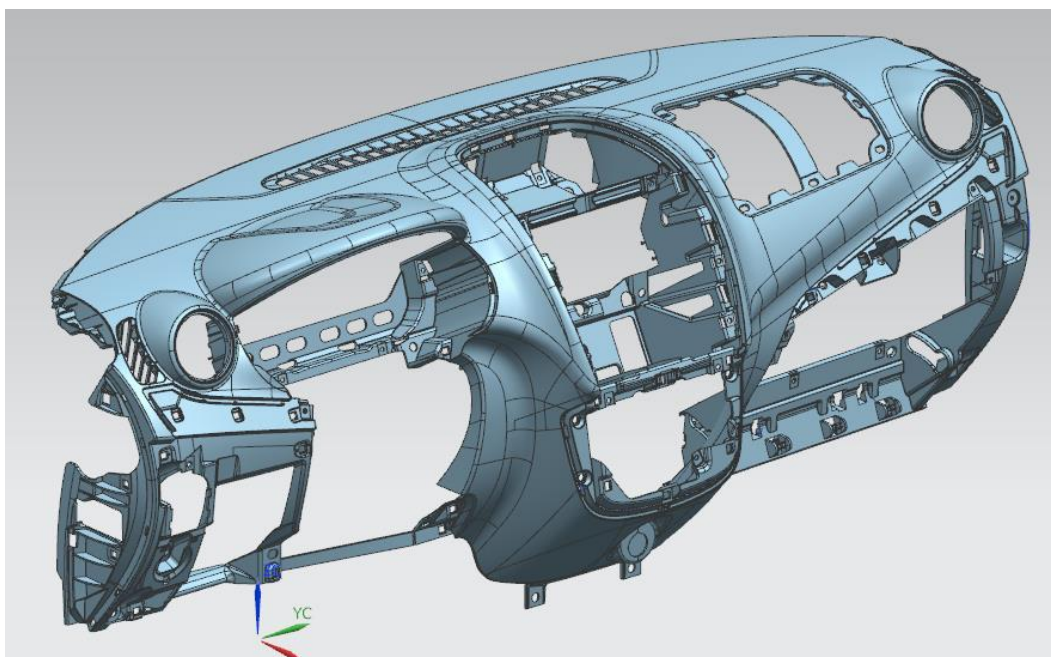


Рисунок 31 – Каркас панели приборов

Толщина детали равномерная – 3 мм. Радиуса имеют диапазон от 2 мм до 5 мм, что связано с безопасностью пассажира и водителя.

Ввиду сложной и габаритной геометрии каркаса ПП было принято решение о дальнейшей работе с частью ее модели. Габариты части модели были определены на основании требований к электронным моделям в САЕ-расчетах с целью выявления возможного появления дефектов (рисунок 32).

Обрезка модели позволит снизить потребляемую мощность процессора, затрачиваемую на вычисление задачи. Идеализация геометрии за счет удаления мелких скруглений и радиусов, не влияющих на конструкционные характеристики детали, позволяет провести большую серию расчетов.

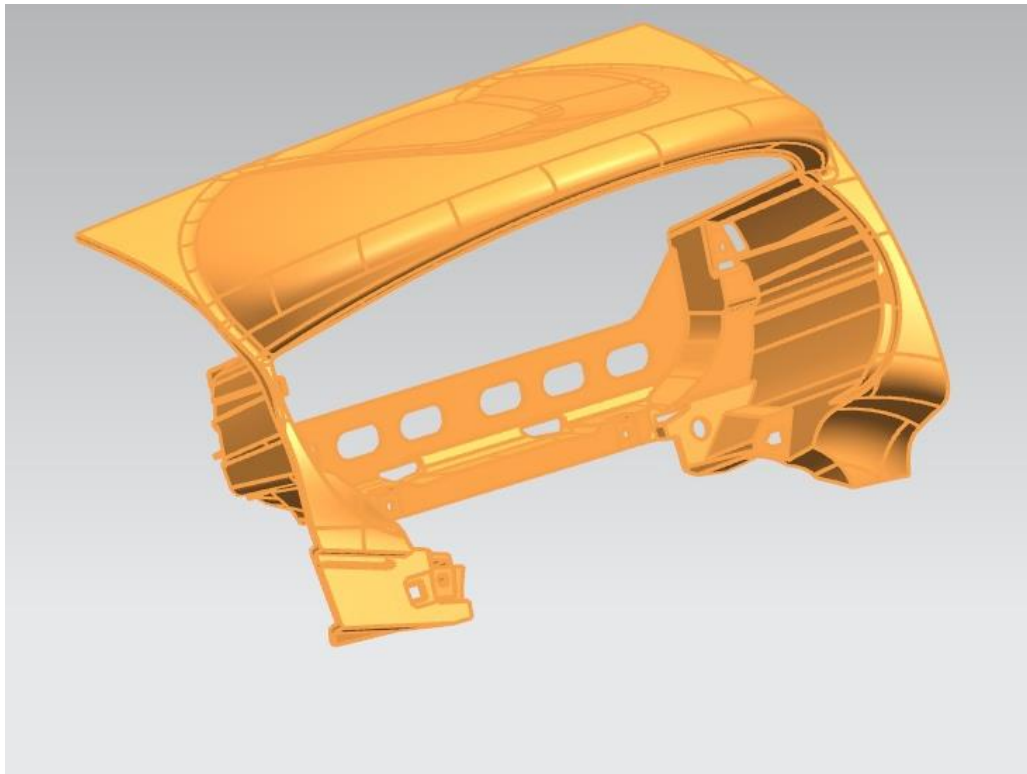


Рисунок 32 – Упрощенная модель ПП

Дальнейшая работа заключается в разработке сборочного узла на основании созданных электронных моделей деталей.

### **2.3 Построение в САПР электронной модели сборки системы панели управления автомобиля**

Сборка – совокупность деталей и подборок, из которых состоит цифровая модель изделия. Объединив компоненты в сборку, появляется возможность провести её анализ для установления пересечений деталей, определения зазоров и работоспособности всего механизма в целом до его изготовления на ранних этапах проектирования.

Процесс формирования сборки зависит от многих факторов, включая сложность деталей и требования к точности сборки. В целом процесс построения сборки в программном продукте NX включает следующие шаги:

- Создание нового сборочного файла в NX.

- Импортирование трехмерных моделей деталей в сборочный файл.
- Установка точек привязки и выравнивание моделей деталей в соответствии с чертежом.
- Установка соединительных элементов, таких как болты, гайки, винты или клеевые точки, для фиксации деталей в сборке.
- Проведение финальной проверки сборки на соответствие чертежу и наличие ошибок.
- Создание документации на сборку, включая спецификации деталей, инструкции по установке и схемы соединительных элементов.

Каждый из этих шагов может иметь множество подробностей, тонкостей и рекомендаций, которые могут варьироваться в зависимости от требований конкретной сборки.

На предварительном этапе создания сборки проводится позиционирование по координатам кузова электронной модели панели приборов, где ось  $Y$  расположена вдоль оси передних колёс, ось  $X$  направлена параллельно кузову автомобиля, ось  $Z$  - вертикально вверх (рисунок 33).

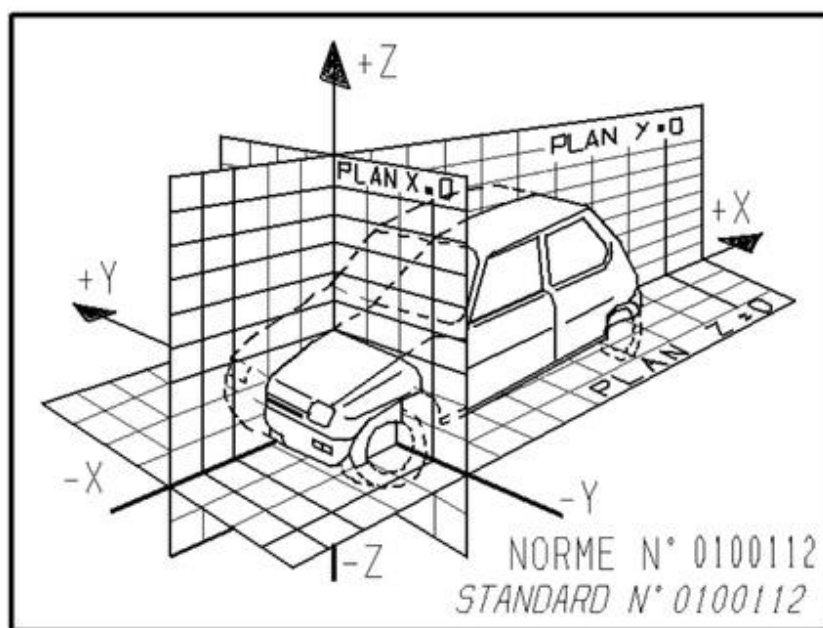


Рисунок 33 – Координатная ось легкового автомобиля

Важным фактором, является то, что во время сборки компонентов на предприятиях машиностроения, процесс сборки выполняется с учетом таких нормативных документов, как SFS или план зазоров и перепадов.

На стадии проектирования соблюдаются зазоры и перепады для деталей панели приборов, где зазоры у неподвижных деталей должны быть не менее 2 мм, а перепады должны быть не более 0,5 мм. Что было учтено в сборке между каркасом и щитком панели приборов и проверено командой «Определить интерференцию/зазор» в программе NX (рисунок 34 - 36).

Проведенный анализ показал, что пересечения и зазоры по требованиям машиностроения учтены путём задаваемых параметров в программе NX.

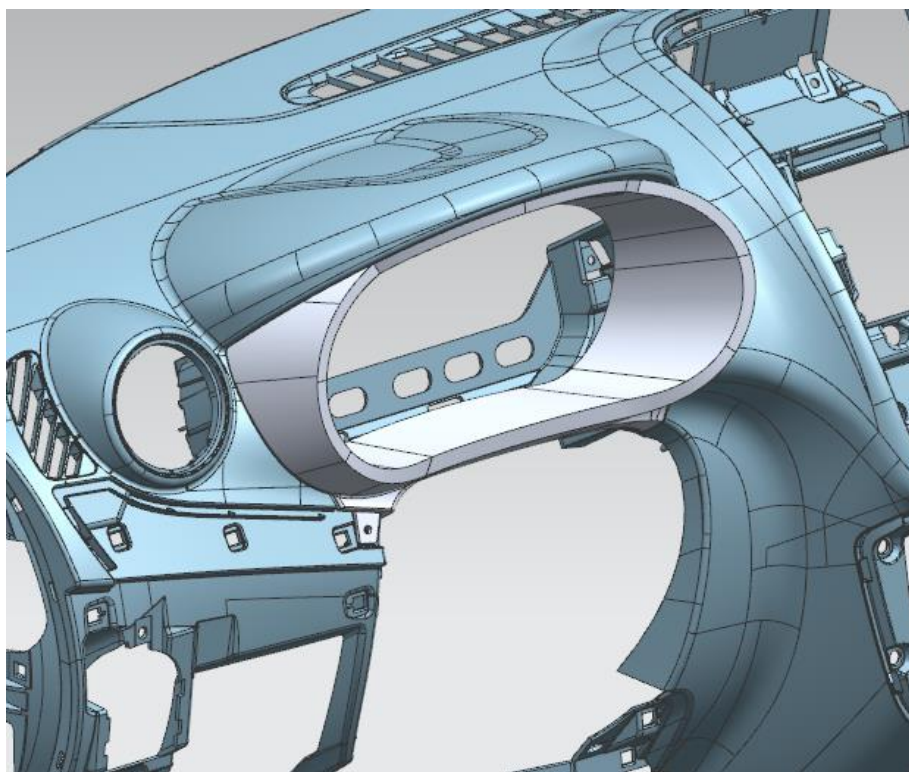


Рисунок 34 – Сборочный узел ПП и щитка

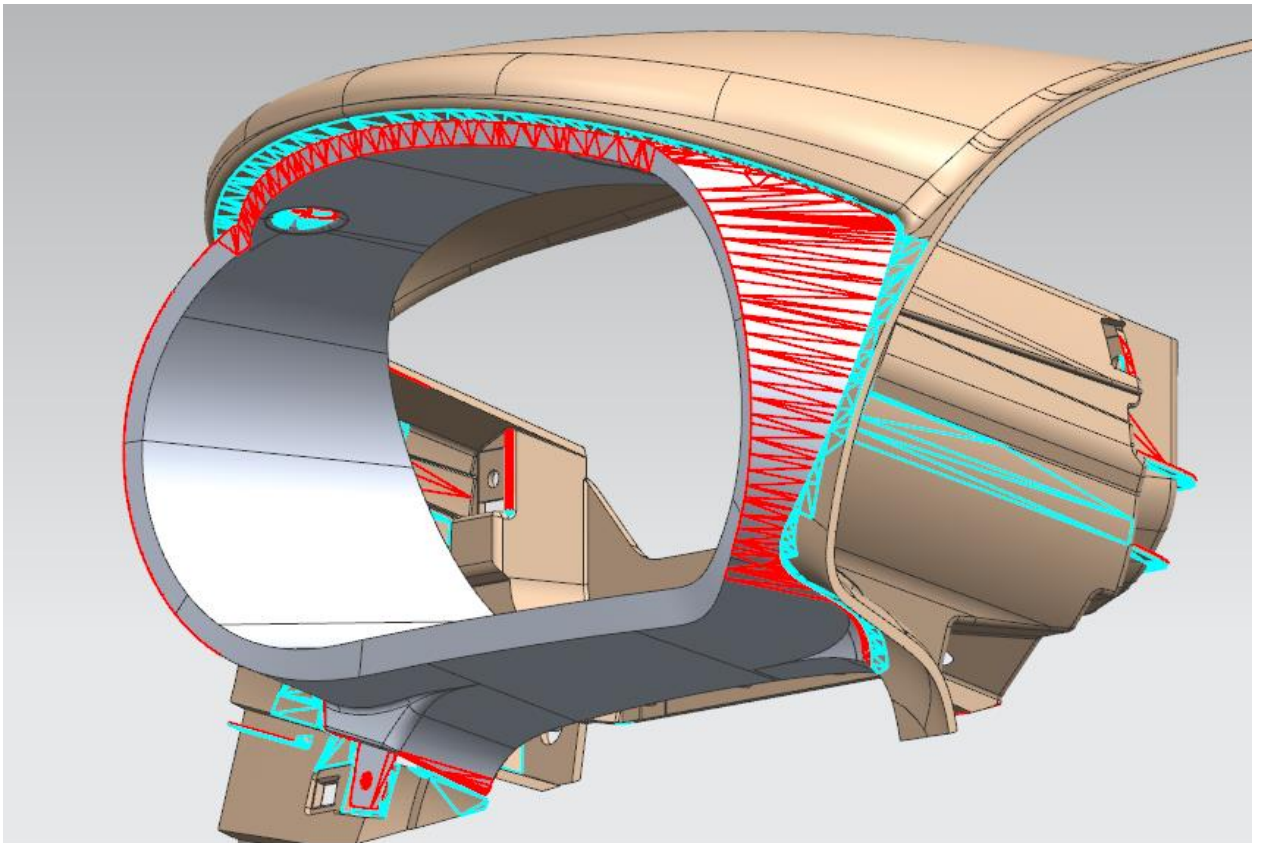


Рисунок 35 – Результаты анализа зазоров с 2 мм

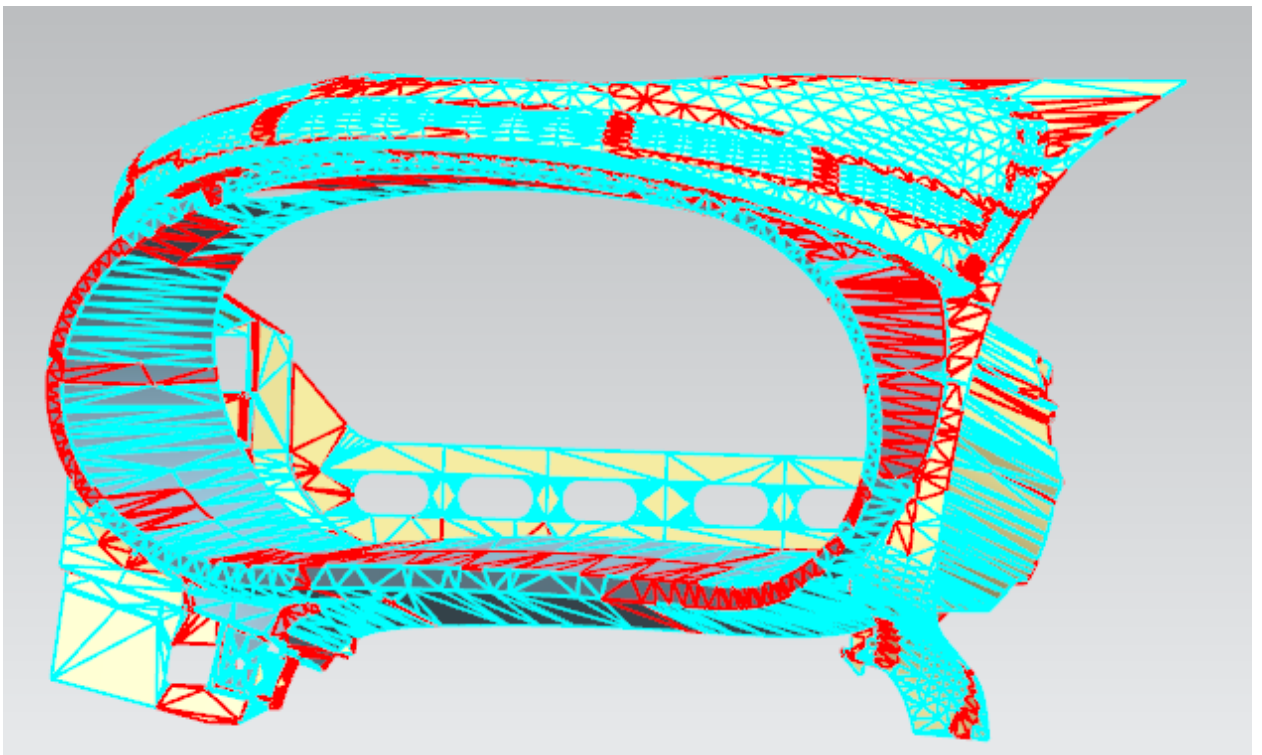


Рисунок 36 – Результаты анализа зазоров с 0,5 мм

Данные результаты анализа зазоров показывают голубым цветом соответствие заданным параметрам зазоров и интерференций. То есть, зазоры более 0,5 мм имеются в местах стыка двух деталей. Это соответствует требованиям SFS при создании нового проекта в машиностроении.

Следующим шагом является добавление деталей в сборочный узел (рисунок 37).

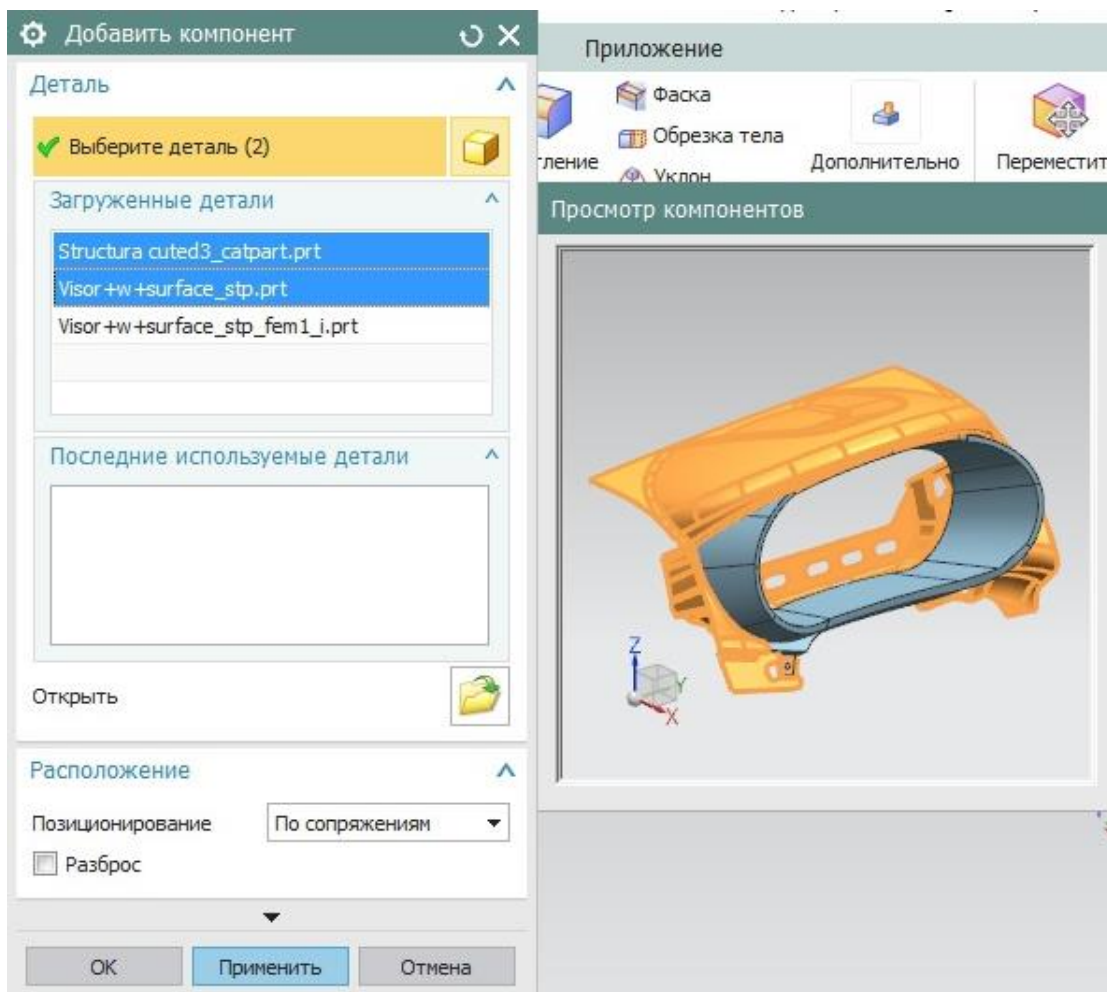


Рисунок 37 – Модуль сборки: щиток и ПП

На основании полученных данных, была поставлена задача для проведения модального анализа устойчивости и собственных колебаний деталей для выявления максимально возможных отклонений в поведении деталей до возникновения дефекта.

Выводы по второму разделу:

В результате проведённого исследования во втором разделе были получены следующие выводы:

- 1) На основе выявленных дефектов ПП автомобиля отдельное внимание в работе будет уделено рассмотрению таких деталей, как щиток и каркас панели приборов.
- 2) Выполнено построение электронной модели щитка и части панели приборов в программном продукте NX с помощью функционала модуля «Моделирование».
- 3) Разработана сборочная конструкция деталей щитка и каркаса ПП на основе сопряжения и взаимного расположения относительно осей кузова автомобиля.
- 4) Проведен анализ сборочной конструкции, в частности, выполнена оценка зазоров. Анализ показал допустимость зазоров и отсутствие пересечений в сборке.
- 5) Проведенный анализ показал, что пересечения и зазоры по требованиям машиностроения учтены путём задаваемых параметров в программе NX.



### **3 Инженерный анализ деталей панели приборов в САПР**

Для предотвращения возникновения дефектов, которые влияют на эксплуатационные характеристики детали, на стадии проектирования проводят инженерный анализ, который доказывает соответствие требованиям качества предъявляемых к изделию.

Четвёртым этапом работы выступает создание качественной конечно-элементной сетки (КЭ), которая оказывает влияние на получение точных результатов во время расчётов.

КЭ сетка помогает представить сложную конструкцию в виде простых узлов и элементов, для которых существуют аналитические оценки поиска напряженно-деформированного состояния.

Ниже будут рассмотрены основные шаги по выполнению построения качественной КЭ сетки и её проверке.

#### **3.1 Построение сетки КЭ для полимерных деталей панели приборов**

Метод конечных элементов (МКЭ) относится к вариационно-разностным методам и имеет в своей основе представление исходной области со сложной формой границ в виде совокупности простых подобластей (конечных элементов) [4].

Представление исследуемой области совокупностью подобластей имеет смысл дискретизации континуальной задачи, то есть замены бесконечно большого числа степеней свободы реального тела приближенно эквивалентным, но конечным числом степеней свободы. Основная концепция МКЭ состоит в построении дискретных КЭ моделей области и непрерывной функции.

Разработка качественной и адекватной конечно-элементной модели является трудозатратным процессом. Если качество КЭ сетки будет низкое (большие элементы, вырожденная форма элементов), то может не получиться сходимости или правильного решения. Также, учитывается время и мощности на вычислительный процесс при высокой точности сетки КЭ.

Во время работы с \*.fem файлом, помимо построения сетки, учитываются физические свойства модели (материал, параметры оболочечных и стержневых элементов, толщины и сечения).

Для КЭ модели по умолчанию создается файл «имя\_fem.fem», где «имя» – наименование исходной мастер-модели.

Геометрия в созданном файле \*.fem является полигональной. Таким образом, когда создается КЭ сетка, любое действие по настройке параметров сетки и геометрии производится на полигональной геометрии, а не на идеализированной модели. При этом полигональная геометрия файла \*.fem ассоциативно связана с идеализированной геометрией.

После получения разработанной КЭ модели, расчётная функция на детали будет производиться в файле \*.sim. Здесь задаётся тип решения, нагрузка и ограничения - важные параметры для каждого расчёта.

Решение задачи численными методами вносит свою погрешность в результаты расчёта. Для уменьшения погрешности результатов, инженер уделяет внимание двум этапам: идеализации и дискретизации.

Основные шаги при выполнении инженерного анализа с помощью метода конечных элементов заключаются в решении следующих задач:

- Создание идеализированной модели.
- Разработка КЭ модели.
- Назначение материала.
- Решение анализа по выбранному типу решателя.

Создание идеализированной модели.

В настоящей работе геометрия деталей относится к категории «сложная», поэтому будут исключены все геометрические элементы, которые приводят к усложнению расчётной модели. К таким элементам можно отнести: технологические отверстия, скругления, фаски. Геометрия данных элементов не влияет на конструкционные свойства изделия и, следовательно, их исключение из модели не изменит результаты выполняемого расчёта (рисунок 38).

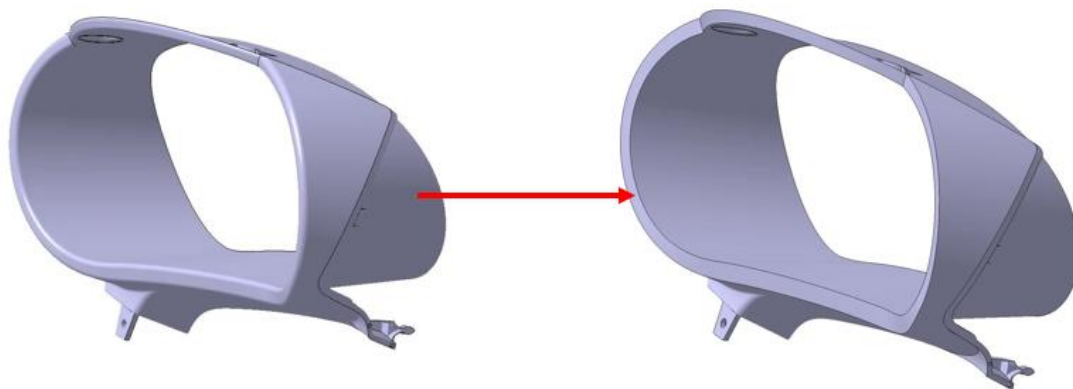


Рисунок 38 – Результат идеализации модели

Перед началом работы следует перейти в модуль «Расширенная симуляция». Далее выполняется создание ассоциативной копии геометрической модели с помощью опции «Перенос тела» (рисунок 39). Все дальнейшие действия будут выполняться на основе модели ассоциативной копии. Такой подход в работе обеспечивает защиту мастер-модели от случайного изменения.

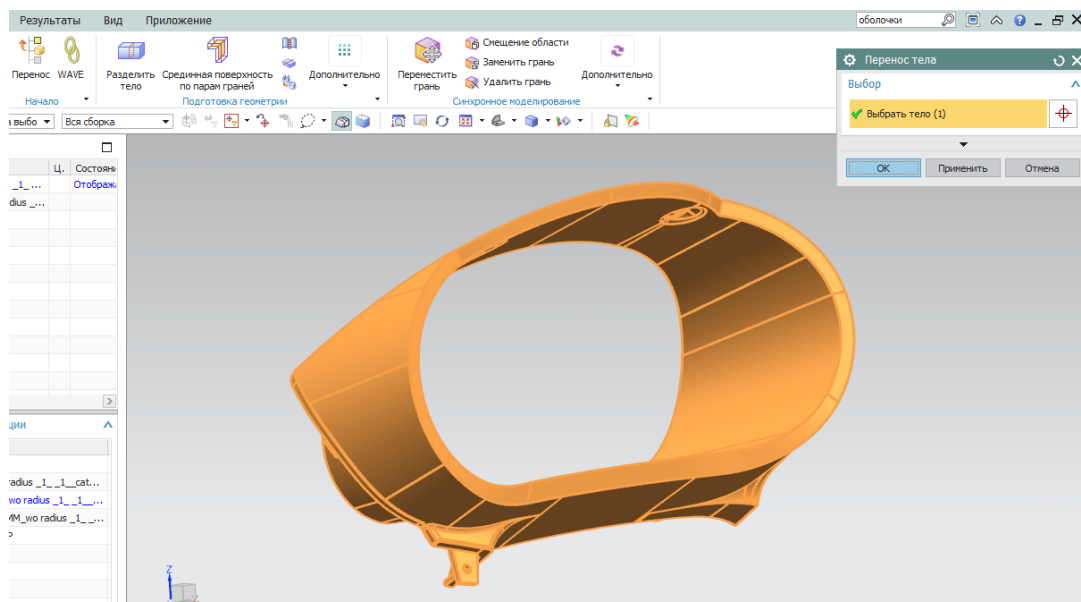


Рисунок 39 – Создание ассоциативной копии модели

Толщина щитка равна 3 мм, что намного меньше других параметров детали. Этот параметр оказывает определяющее влияние на выбор типа конечных элементов. В стандартном определении при использовании объемных конечных элементов для получения точного результата потребуется размещение от 6 до 8 КЭ по толщине модели. Разбиение модели по объему с учетом расположения КЭ по толщине приведет к значительному количеству КЭ, многократному увеличению времени расчета и повышению величины накапливаемой погрешности расчета.

В связи с тем, что детали группы панели приборов (ПП) являются тонкостенными конструкциями, для создания идеализированной модели будет использоваться способ построения срединной поверхности. Для формирования такой поверхности подходит команда «Срединная поверхность по парам граней» («Midsurface by Face Pairs»). Построение поверхности, сохранившей все конструктивные особенности геометрии, создаст возможность применения оболочечных конечных элементов на этапе САЕ-анализа.

В результате автоматического создания срединной поверхности получается геометрия, содержащая разрывы, зазоры и неоднородность стилевых поверхностей детали (рисунок 40).

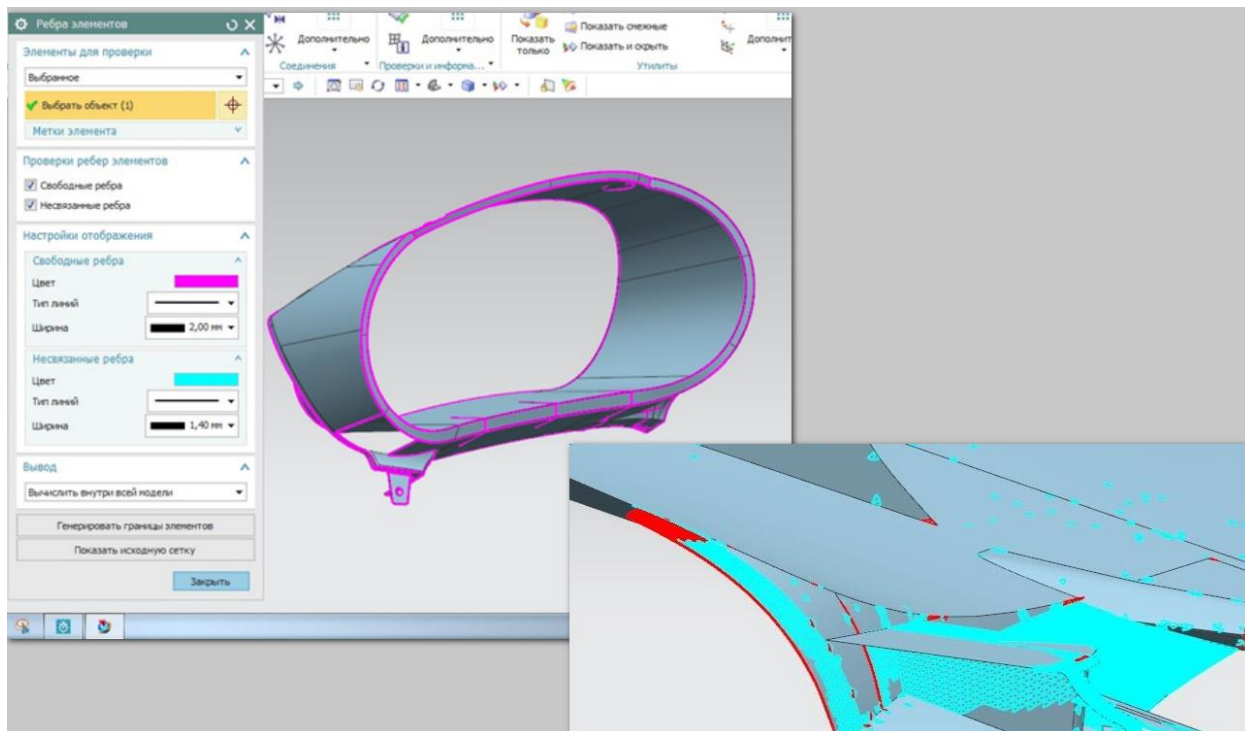


Рисунок 40 – Проверка срединной поверхности на разрывы

В модели наблюдаются зазоры от 0,2 до 2 мм, что приводит к ситуации с невозможностью формирования качественной КЭ сетки (рисунок 41). В процессе создания идеализированной геометрии, с помощью срединных поверхностей, пропадают ответственные компоненты поверхностей класса «А», что делает невозможным использование такой геометрии (рисунки 42 – 43),

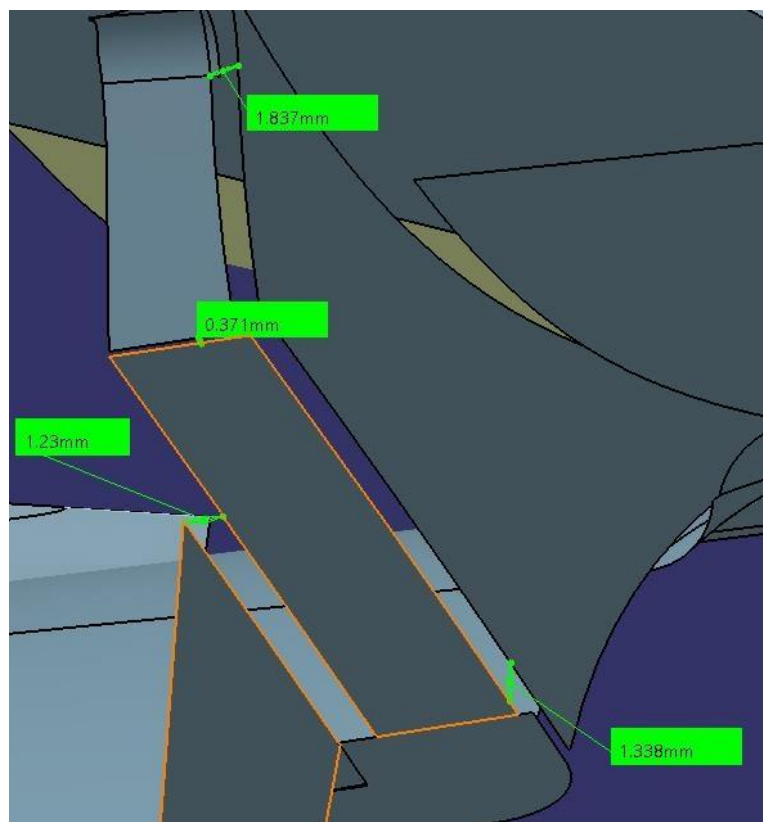


Рисунок 41 – Зазоры и неравномерность поверхностей класса А

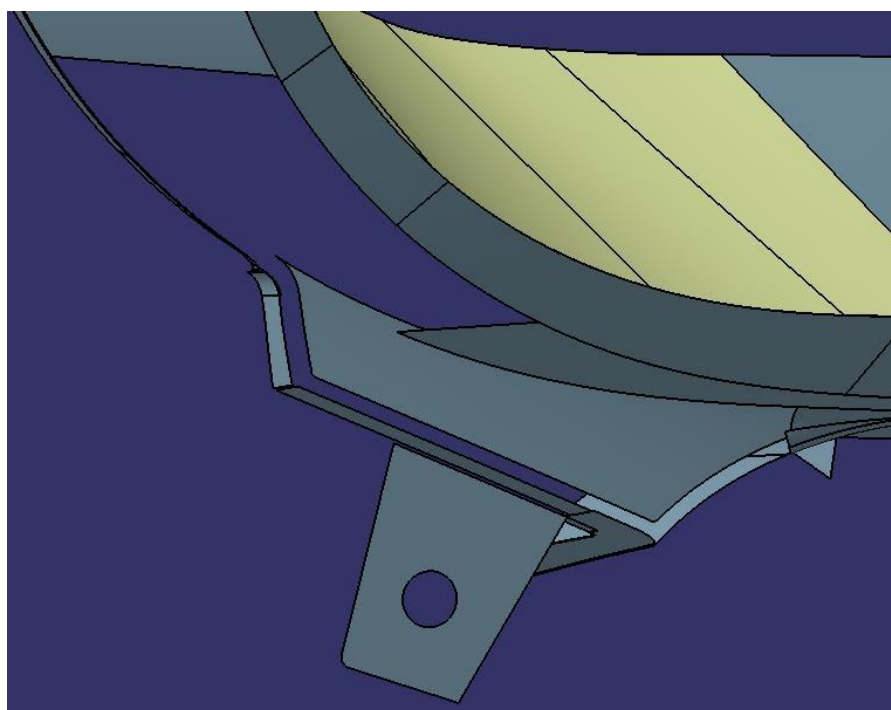


Рисунок 42 – Отсутствие части поверхности

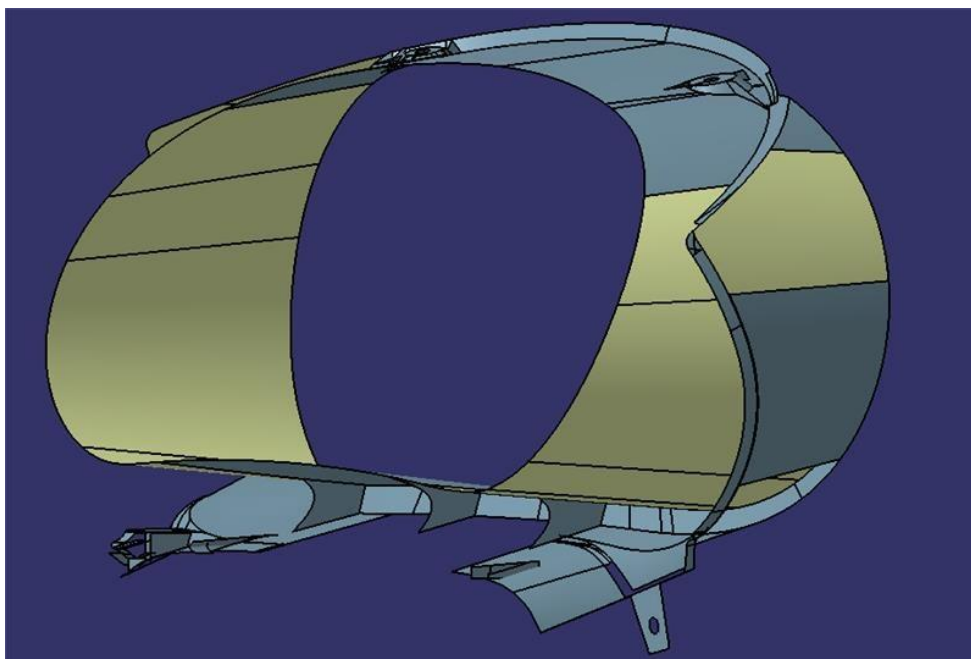


Рисунок 43 – Вид сзади: отсутствие важных конструктивных компонентов поверхностей

Выявленные дефекты срединной поверхности требуют доработки и исправления модели - устранения разрывов, зазоров и перепадов геометрии.

Для процесса правки геометрии привлекаются следующие команды: идеализировать геометрию (Idealize geometry), сшивка (Sew), разделение грани (Divide Face), заметание.

В процессе сшивания поверхностей возможно возникновение сложностей с корректным позиционированием удлиненных частей поверхности из-за больших разрывов и сложной геометрии закруглений поверхности класса «А». Для устранения таких дефектов в стыках поверхностей были удалены и построены заново отсутствующие части детали. Итоговый результат приведён на рисунках 44 -46.

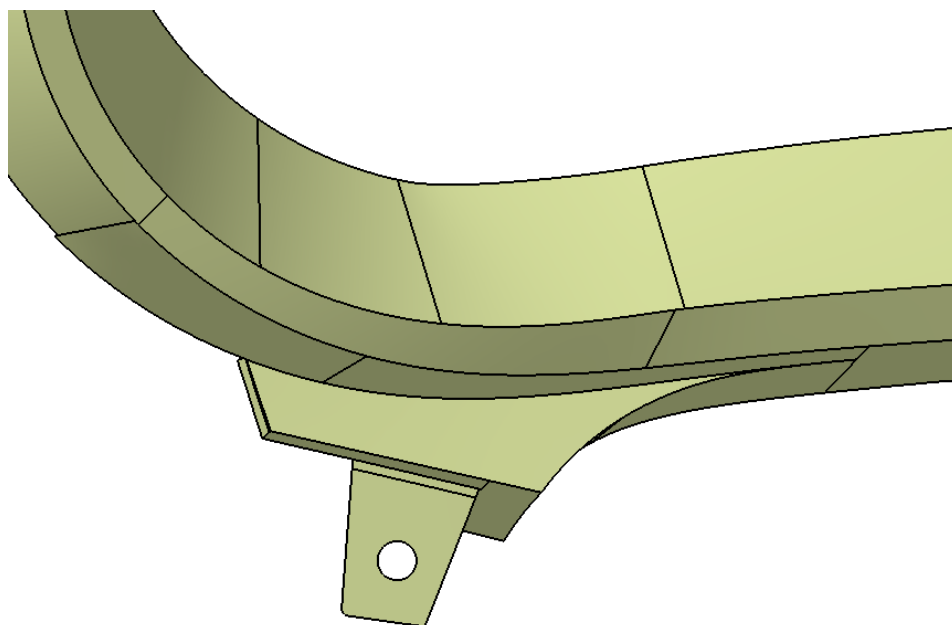


Рисунок 44 – Дополнительные построения в процессе идеализации детали

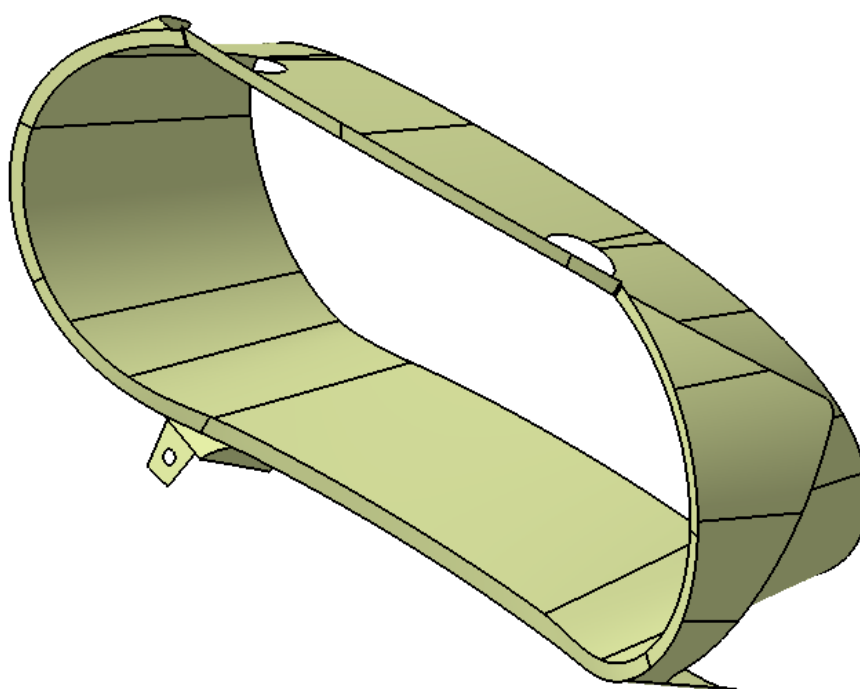


Рисунок 45 – Вид спереди: идеализированная модель



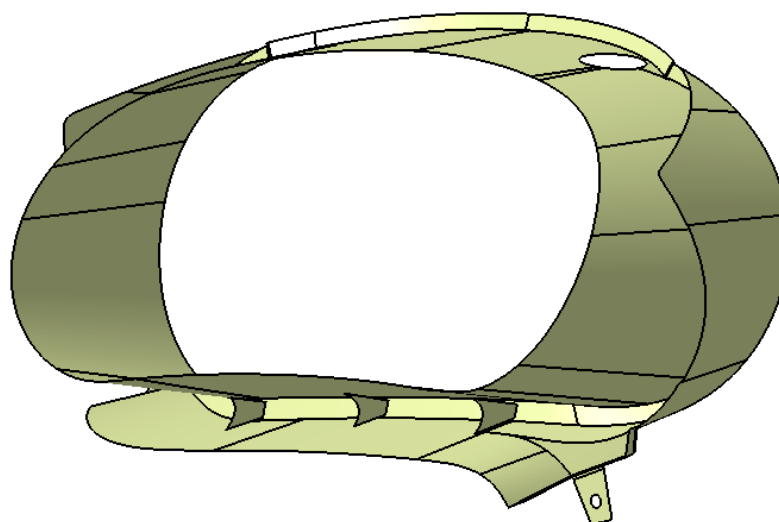


Рисунок 46 – Вид сзади: идеализированная модель

На следующем шаге проводится проверка модели на наличие свободных границ внутри поверхностей модели (рисунок 47 – 48). Результат проверки показал, что границы детали не имеют внутренних разрывов и пересечений. Все свободные кромки имеют равномерные границы для реализации дальнейших действий.

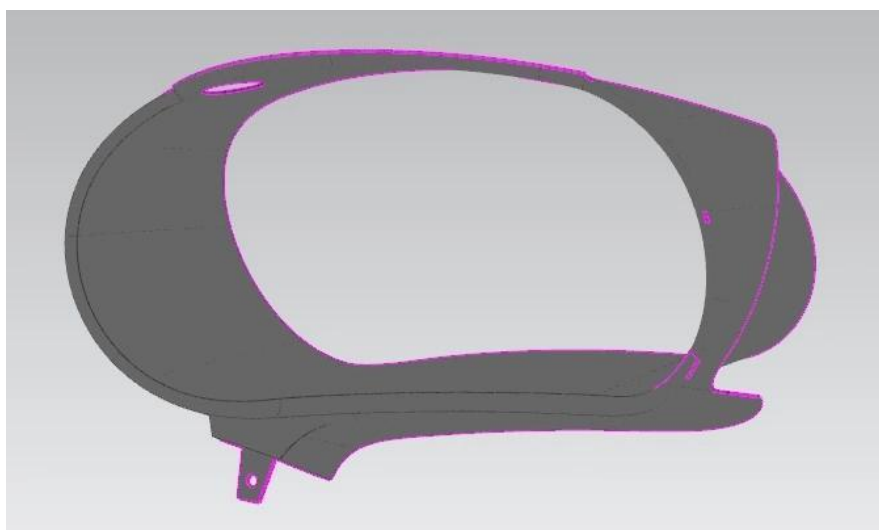


Рисунок 47 – Результаты проверки на разрывы и зазоры поверхности

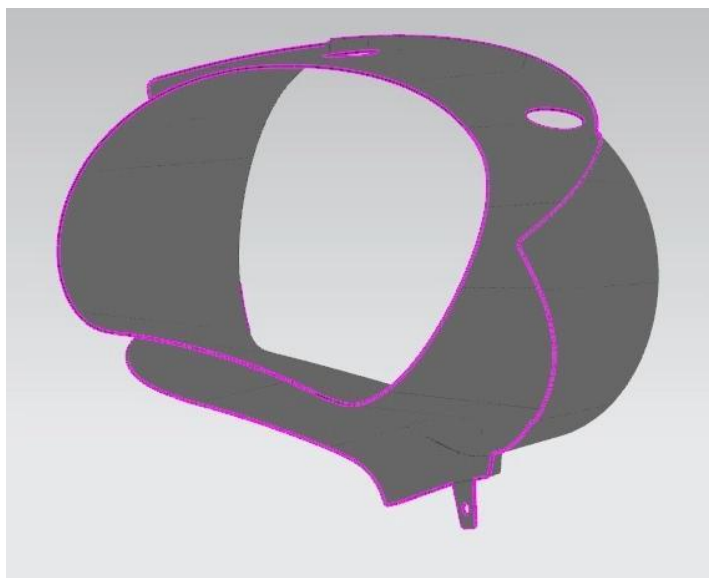


Рисунок 48 – Контур без разрывов и зазоров в поверхности визора

Разработка КЭ модели.

Выполняется создание дискретной модели \*.fem на основе идеализированной модели.

После получения идеализированной модели выполняется подбор величины конечного элемента.

Конечный элемент (КЭ) – это способ описания свойств поведения в ограниченном объёме для технических конструкций или объектов иной природы [19].

Размер вычисляется путём нахождения наименьшего геометрического размера на поверхности, от которого берется 5 часть. Место крепления с каркасом панели приборов на поверхности щитка равно 3,5 мм, результат деления равен 0,7 мм. То есть это размер элементов для дальнейшего начального генерирования сетки.

Функционал программного продукта NX позволяет провести оценку качества созданной сетки конечных элементов.

Требования к качеству геометрической формы КЭ включают в себя следующие условия:

- следует избегать присоединения двух или более треугольных элементов к одному узлу (рисунок 49);
- узел не должен быть тупиковым (рисунок 50), исключением выступают узлы на свободной границе;
- для элементов четырёхугольной формы не допускается нарушение чередования порядка узлов, когда две грани перекрещиваются в пространстве или плоскости (рисунок 51);
- для квадратных элементов не допускается вогнутость формы (рисунок 52), внутренний угол при каком-либо узле должен быть равен: для квадратной формы – максимум 120 градусов, минимум 60 градусов; для треугольной формы – максимум 120 градусов, минимум 30 градусов;
- соотношение геометрических размеров элементов определяется коэффициентом сжатия. То есть, для элемента треугольной формы, коэффициент сжатия формы определяется, как самое большое значение из трёх возможных соотношений длины грани и высоты треугольника, нормальной к этим граням, умноженное на численный множитель (рисунок 53). Коэффициент сжатия для квадрата определяется, как самое большое значение из отношений длин векторов, проведенных от центра элемента до середин смежных граней (рисунок 54);
- для элемента треугольной формы угол перекоса вычисляется, как разница между углом в 90 градусов и углом, образованным двумя векторами, один из которых проводится от вершины треугольника до середины противоположной грани, а другой – соединяет середины граней, смежных этой вершине. За угол перекоса принимается самое большое значение из трёх возможных (рисунок 55);
- необходимо контролировать расположение свободных кромок конечно-элементной сетки;

- ориентация нормалей для оболочечных элементов должна быть одинаковой;
- не должно быть дублированных элементов в конечно-элементной модели;
- панели и тонкостенные элементы конструкции моделируются по срединной поверхности.

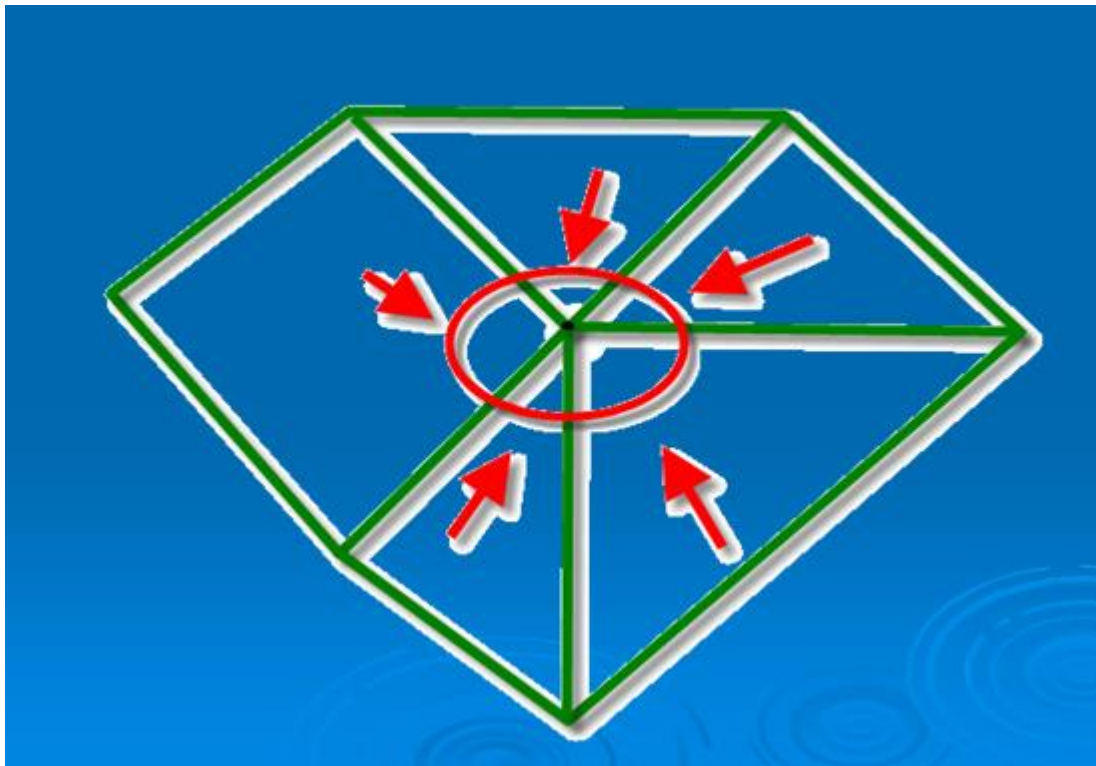


Рисунок 49 – Ошибочный вариант построения КЭ к одному узлу

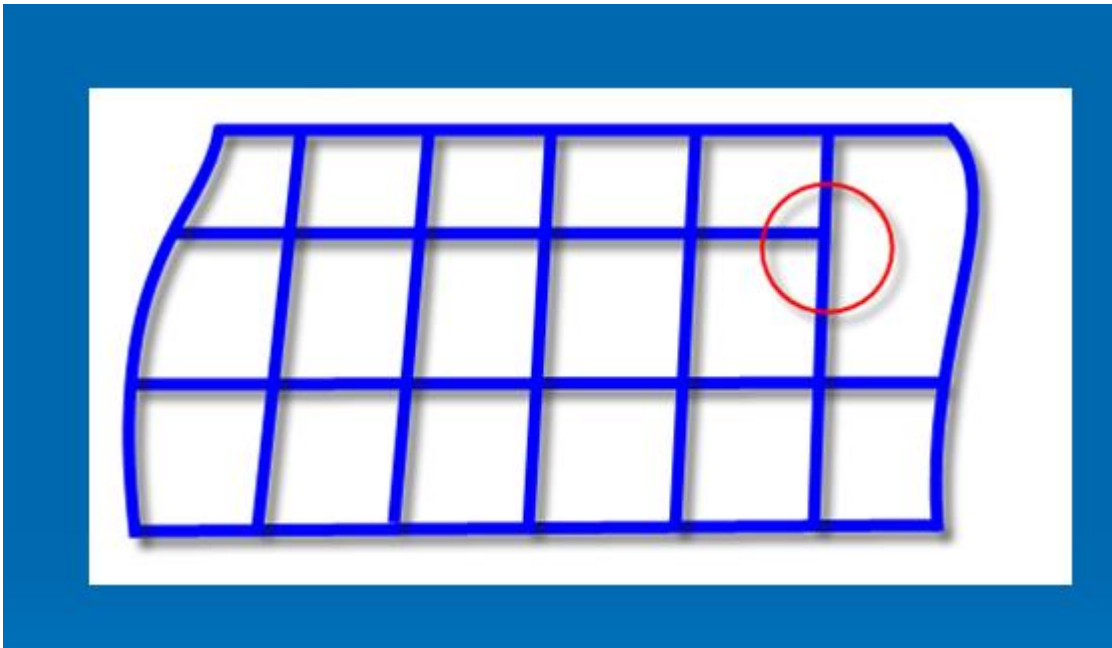


Рисунок 50 – Расположение узла не должно быть тупиковым

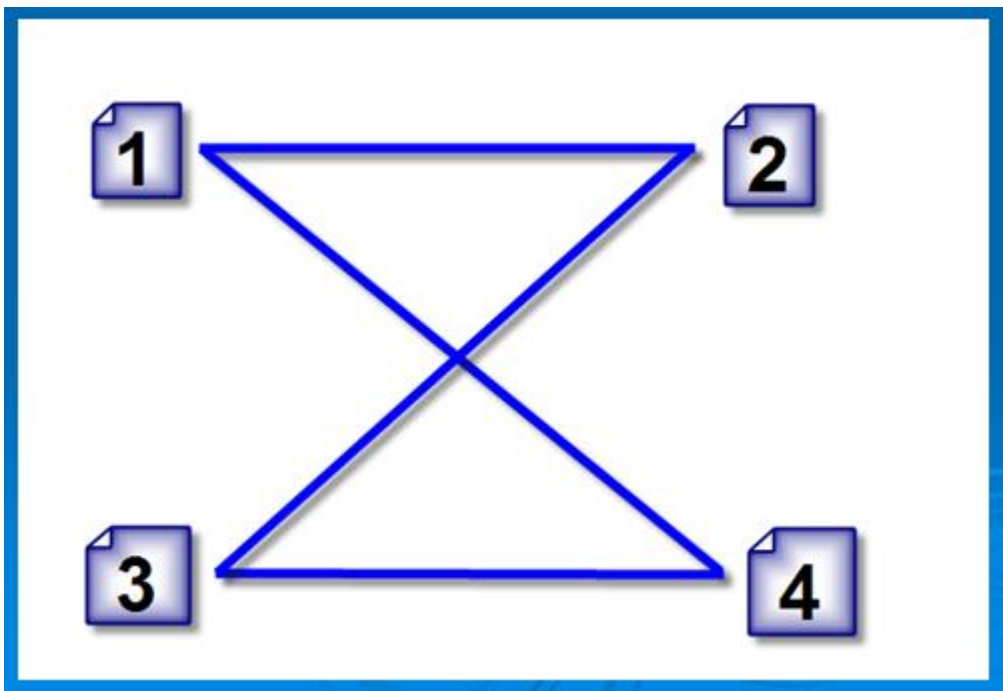


Рисунок 51 – Нарушение чередования узлов в четырёхугольном элементе

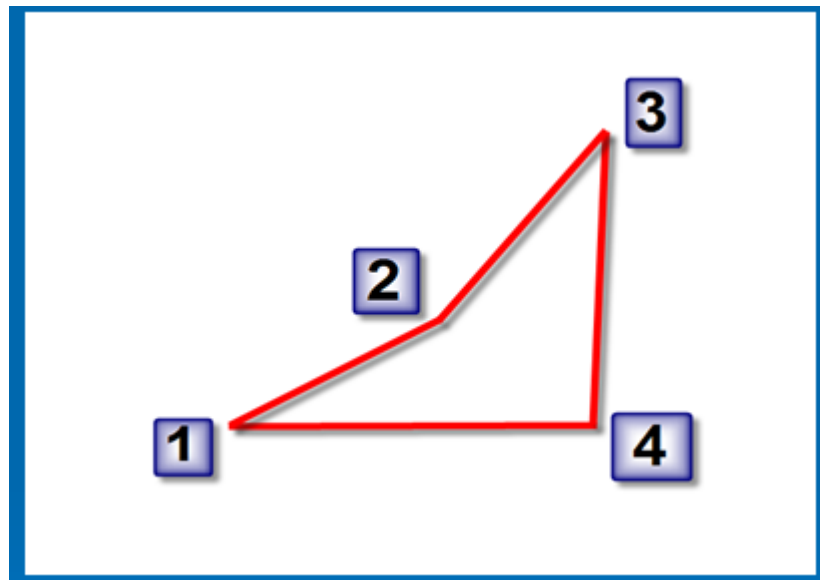


Рисунок 52 – Несоблюдение требований к величине внутренних углов КЭ

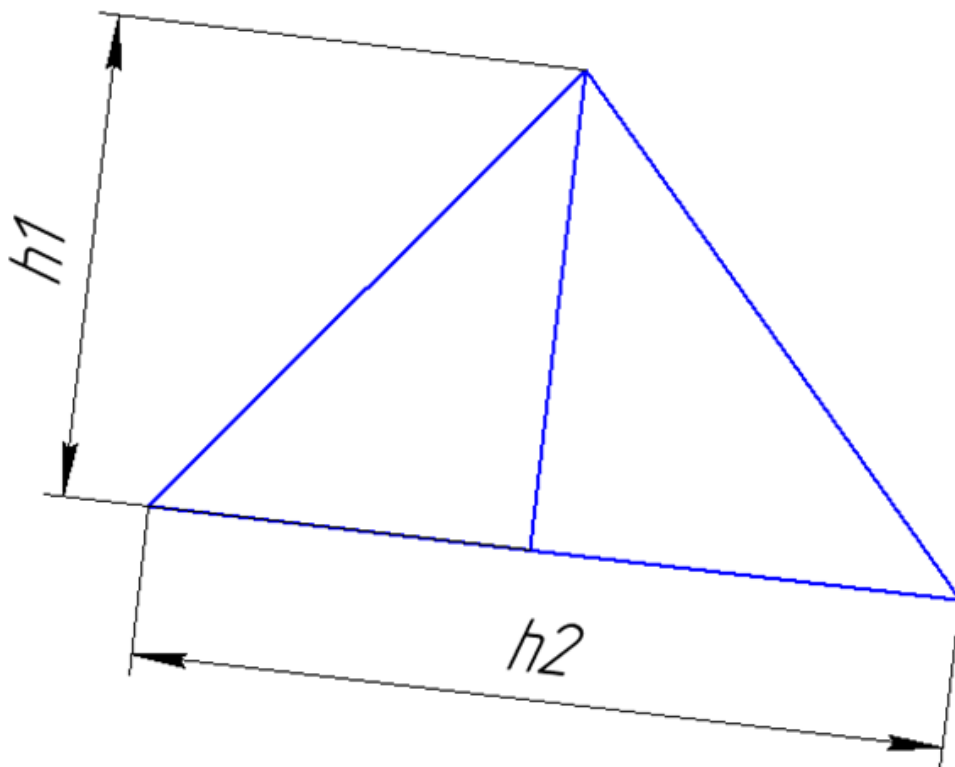


Рисунок 53 – Коэффициент сжатия для КЭ треугольной формы

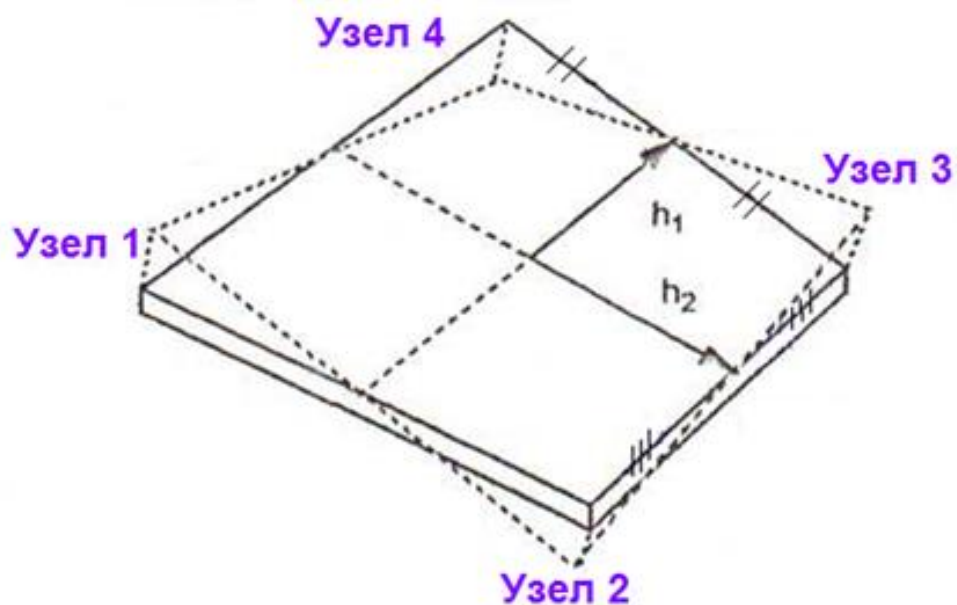


Рисунок 54 – Коэффициент сжатия для КЭ квадратной формы

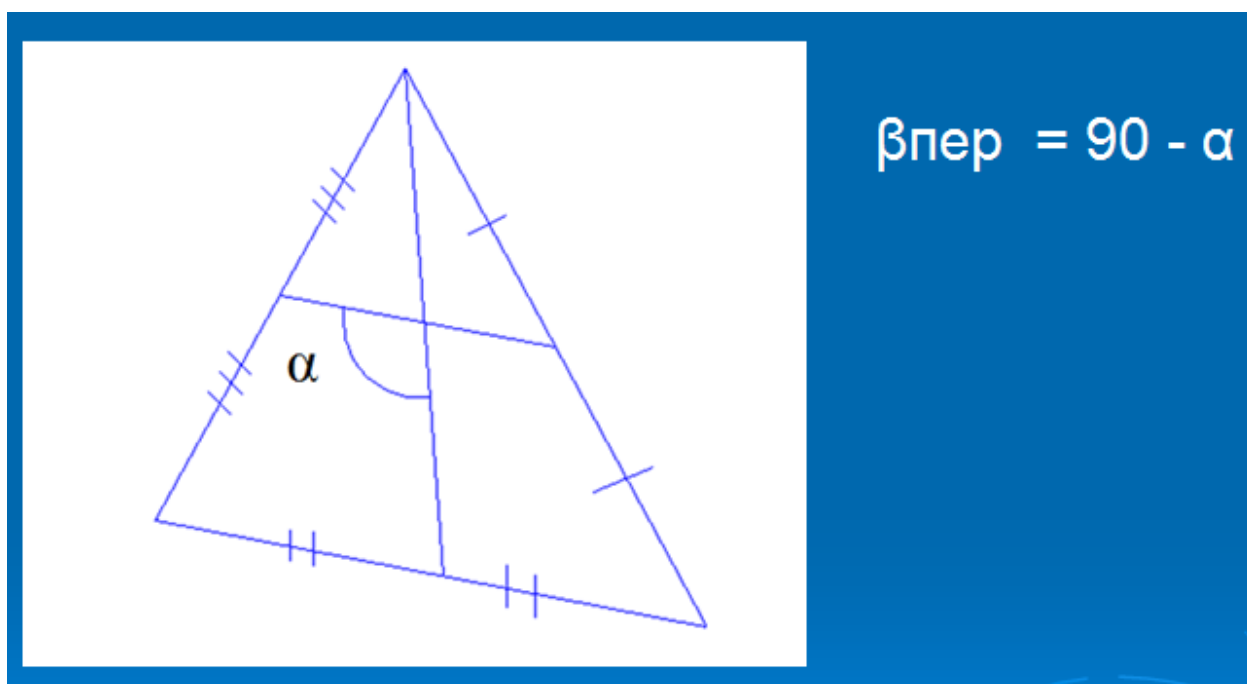


Рисунок 55 – Угол перекося для КЭ треугольной формы

Для сравнения возьмём для проверки несколько вариантов размеров конечных элементов:

- В программе NX есть возможность автоматического определения размера конечных элементов. Выбранный размер КЭ с помощью

программы равен 4,79 мм. Число конечных элементов 15,025. Тип сетки 2D: CTRIA6. Красные области указывают на неправильную форму конечного элемента, что может сказаться на точности расчета и результатах анализа. Оценка качества такой сетки приведена на рисунке 56.

- Используем рассчитанный размер КЭ равный 0,7 мм. Число конечных элементов 424,025. Тип сетки 2D: CTRIA3. Результат проверки показан на рисунке 57.

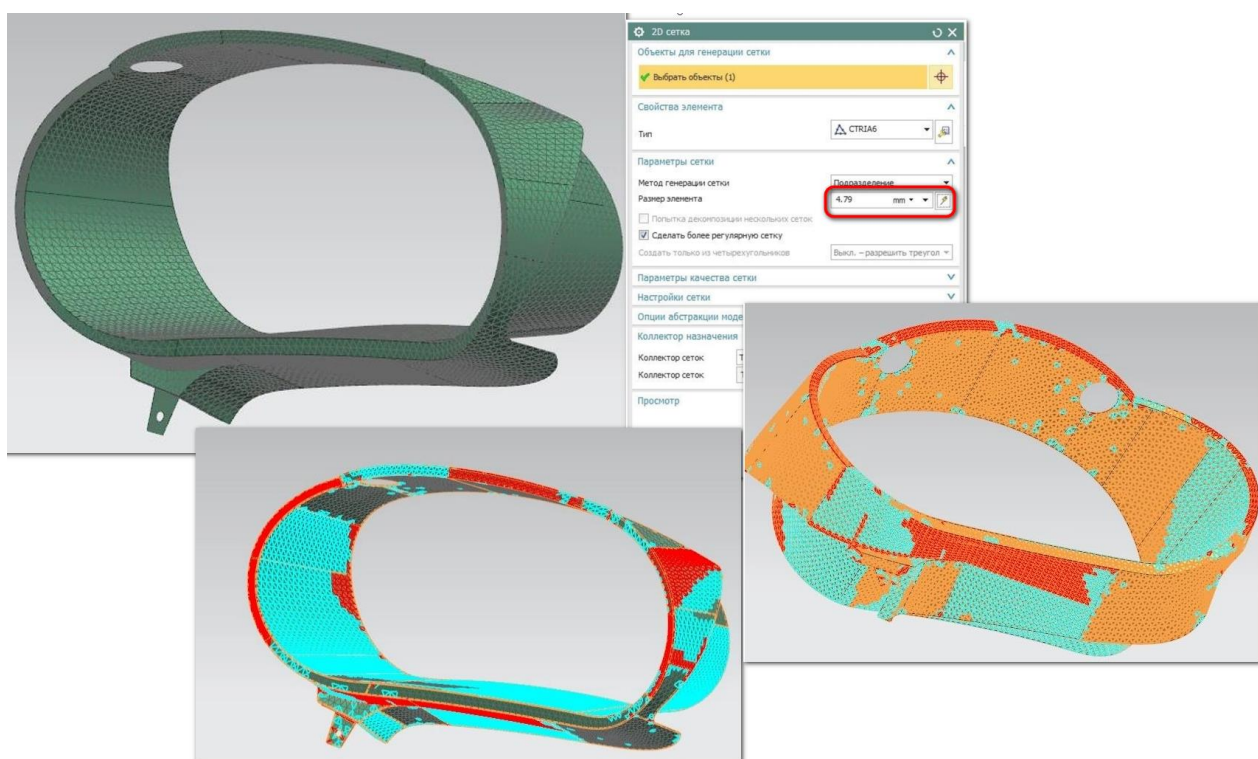


Рисунок 56 – Размер конечного элемента равный 4,79 мм



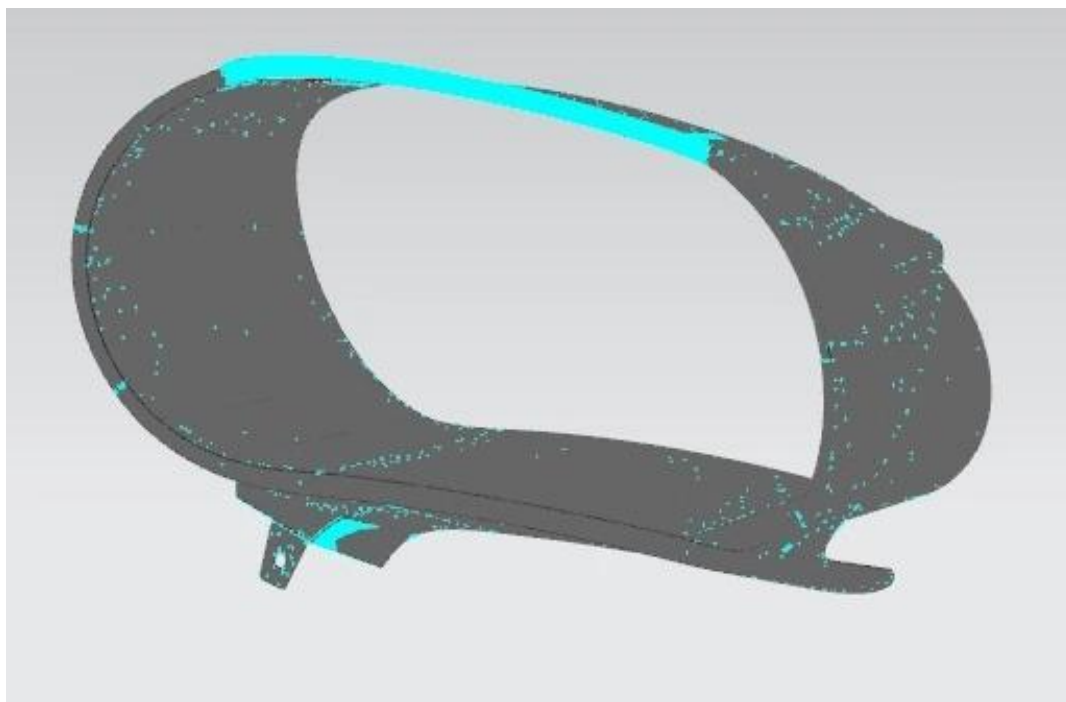


Рисунок 57 – Размер конечного элемента равный 0,7 мм

Сравнительный анализ КЭ сеток с различной величиной конечного элемента показал, что меньший размер сетки обеспечивает ее качество.

Далее проводится сравнительный анализ для различных типов 2D КЭ: треугольных или прямоугольных.

Из теории источников [5-19] следует, что треугольные элементы имеют наибольшую точность, чем прямоугольные. Но в свою очередь, треугольные элементы показывают завышенные результаты в жёсткости детали. Число элементов влияет на скорость решения, чем их больше, тем расчёт будет длиться дольше.

На рисунках 58 – 59 показаны результаты оценки качества элементов: сетки STRIA3 (треугольная) и CQUAD4 (прямоугольная). Проверка качества сетки осуществляется по параметрам, приведенным на рисунке 60.

Сетки STRIA3 – число элементов 219,774 (щиток) и 401,120 (панель приборов), размер сетки 0,7 мм. В результате имеются красные области, в

которых сетка имеет неправильные геометрические параметры в связи со сложностью геометрии детали (рисунок 61).

SQUAD4 – число элементов 95,200 (щиток) и 200,182 (ПП), размер сетки 0,7 мм. Сетка не имеет красных областей, в которых могли бы возникать предельные напряжения из-за ошибок нанесения элементов. Такой тип сетки является благоприятным для процесса решения САЕ-задачи и получения качественных и быстрых результатов.

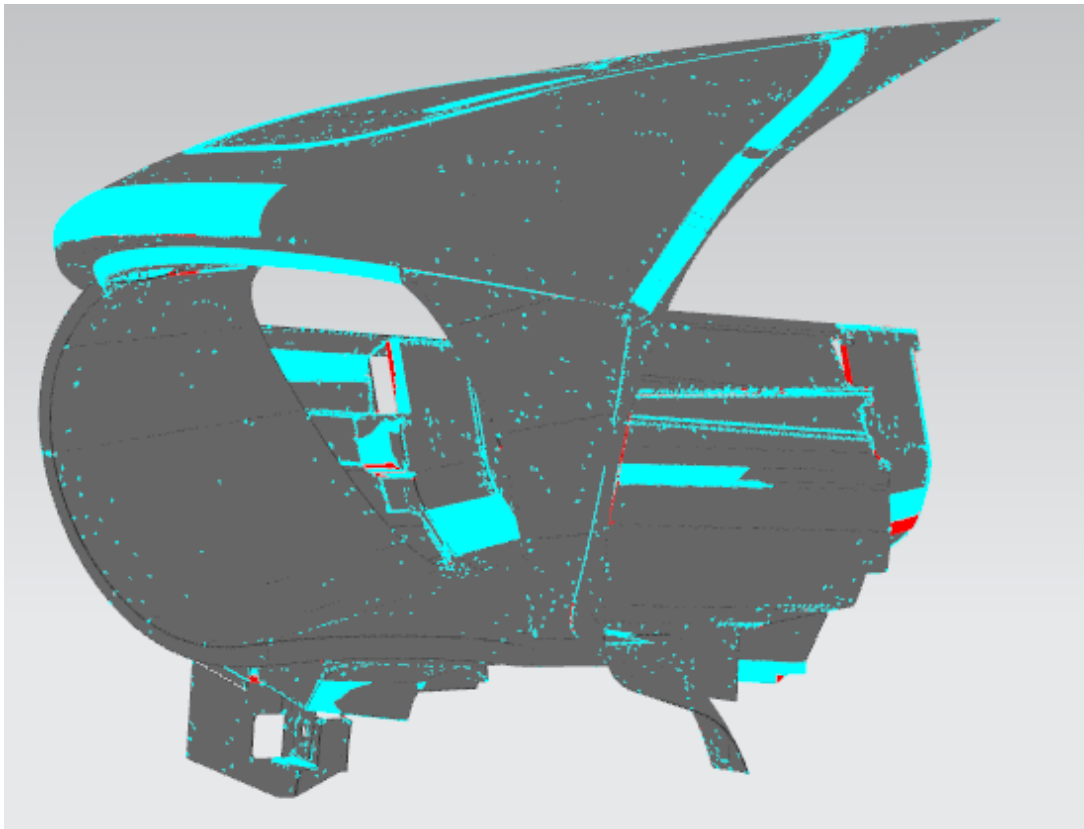


Рисунок 58 – Результат проверки элемента STRIA3

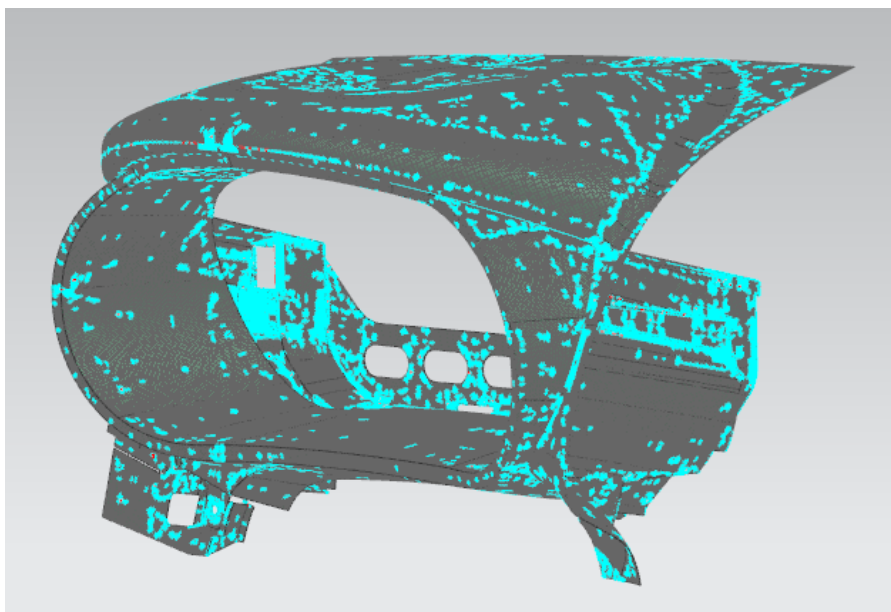


Рисунок 59 – Результат проверки элемента CQUAD4

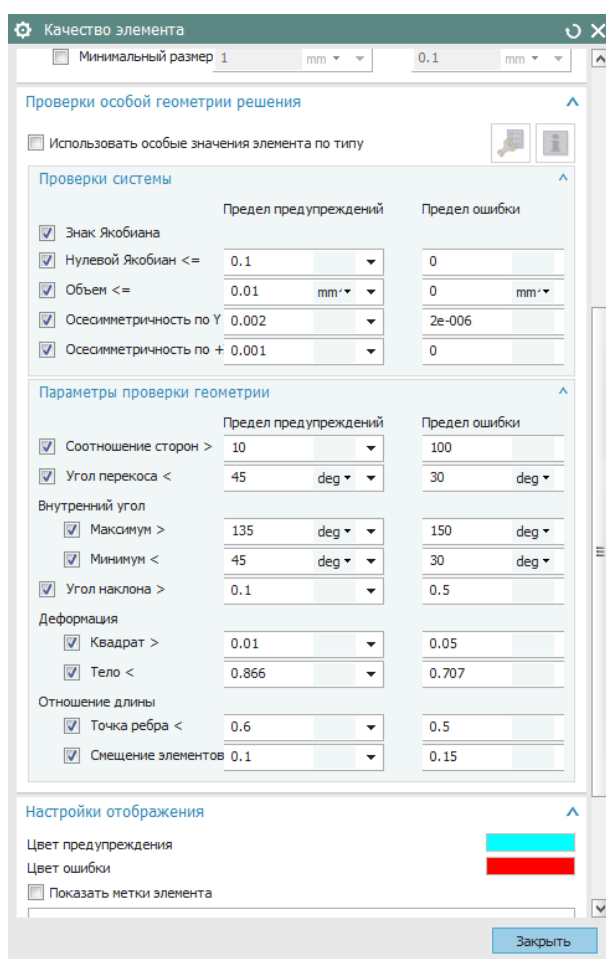


Рисунок 60 – Параметры проверки качества элементов сетки

КЭ прямоугольной формы будут использоваться на дальнейших этапах работы. Применение таких КЭ не требует времени на дополнительное исправление сетки (рисунок 62).

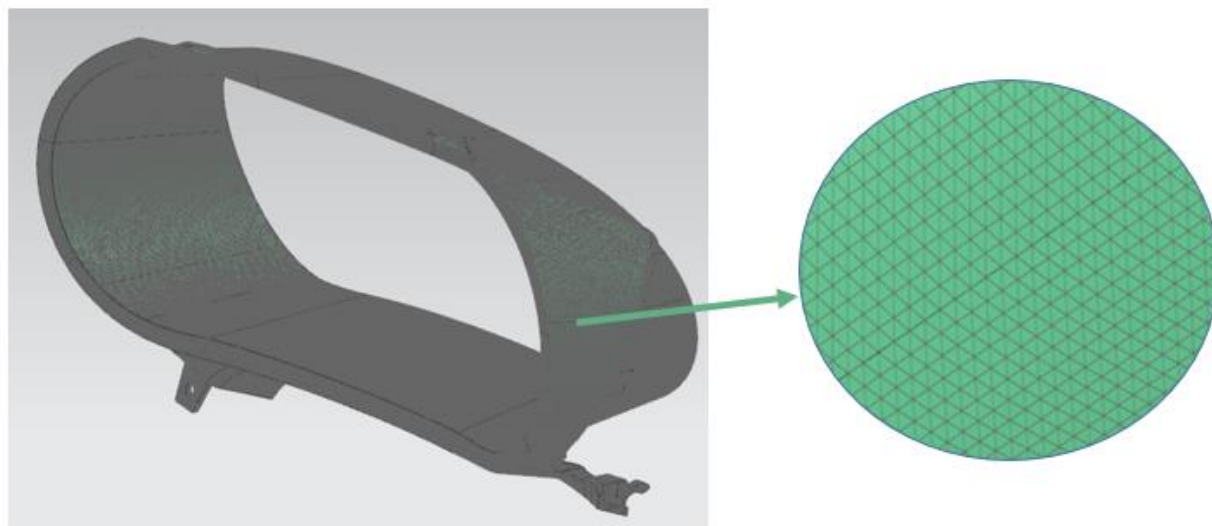


Рисунок 61 – Результаты построения треугольной КЭ сетки

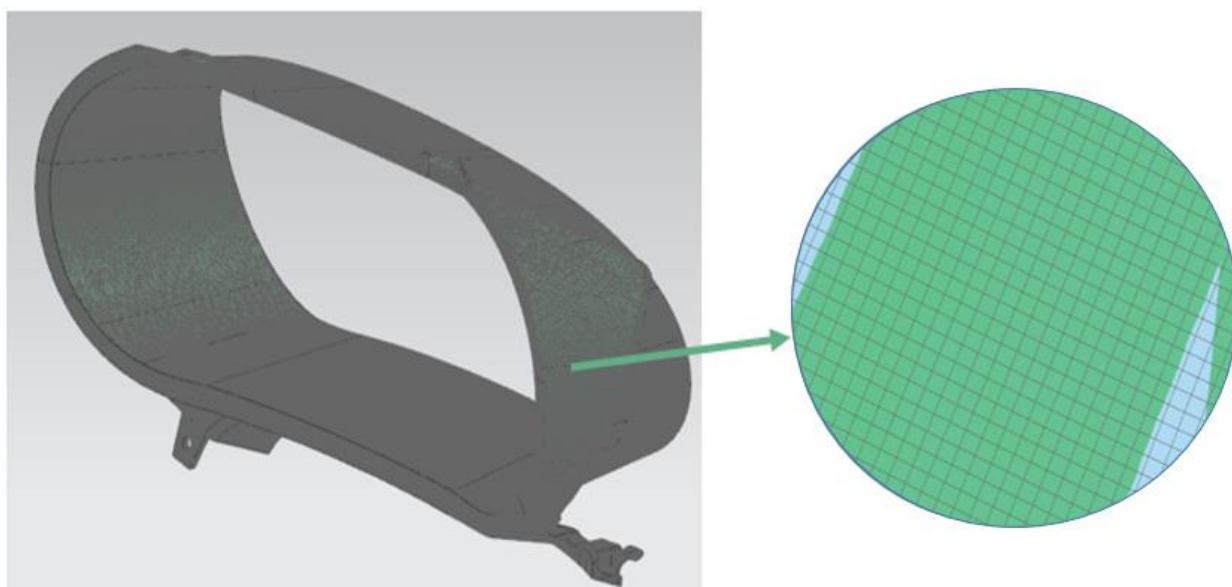


Рисунок 62 – Результаты построения прямоугольной КЭ сетки

Назначение материала.

Этап назначения материала детали является ответственным по причине существенного влияния свойств материала на результаты испытаний.

Воспользуемся вариантами известных марок материалов, применяемых в машиностроении. Так как САЕ-часть работы заключается в вычислении показателей прочности полимерных деталей, рассмотрим наиболее встречающийся вариант комбинации материалов сборочного узла в машиностроении - щиток панели приборов будет представлен материалом – АБС, панель приборов – ПП.

Команда «Назначить материал» позволит задать материал для каждой детали (рисунки 63 – 64).

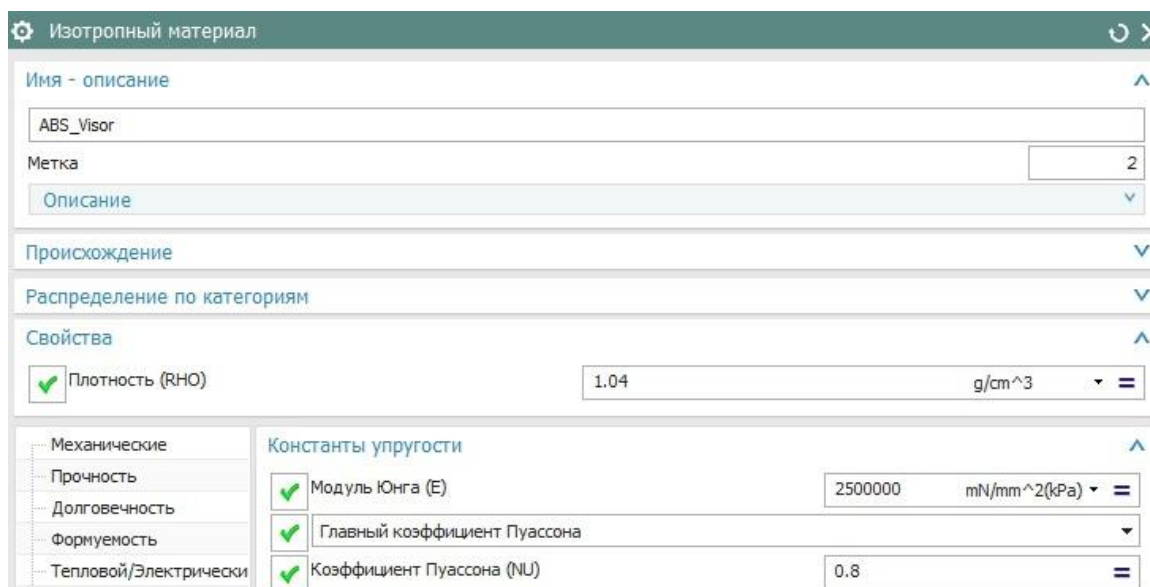


Рисунок 63 – Характеристики материала АБС для щитка

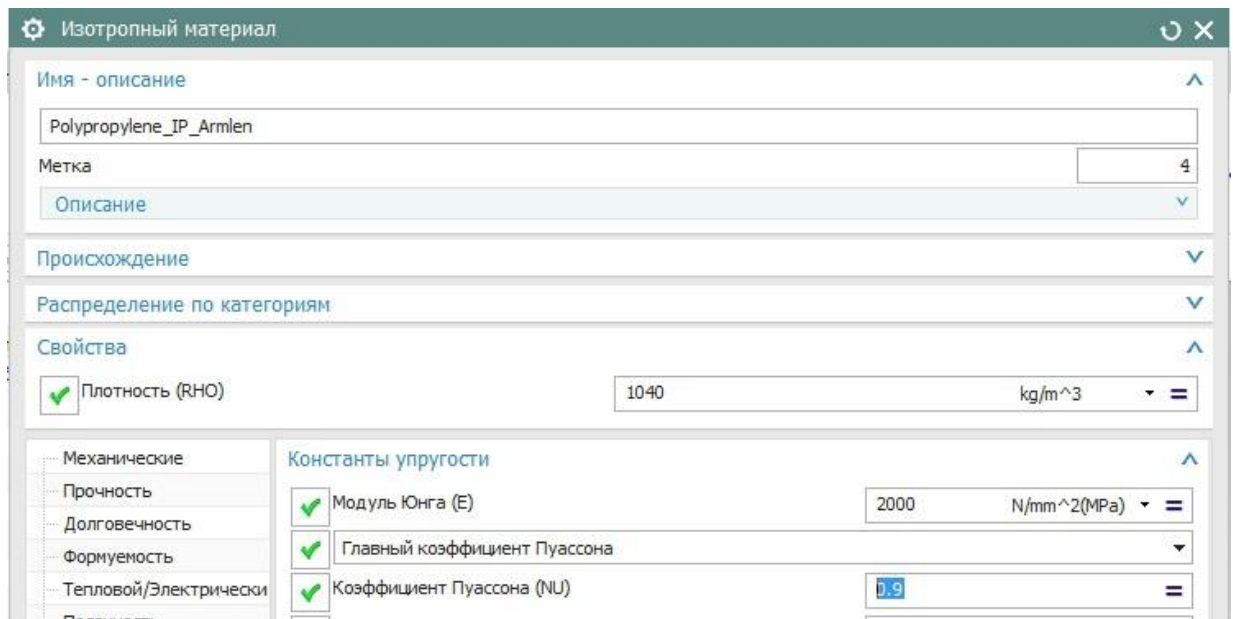


Рисунок 64 – Характеристики материала ПП для панели приборов

Различия в параметрах выбранных материалов заключаются в «Модуле Юнга» и «Коэффициенте Пуассона», которые влияют на температуру плавления, прочность и другие показатели.

На следующем шаге выполняется задание толщины детали – 3 мм в соответствии с физическим образцом.

Проверка построения КЭ модели позволила установить оптимальные параметры КЭ сетки – размер КЭ и тип КЭ. Разбиение модели на КЭ было проведено на основе идеализированной геометрии сборочной модели. Идеализация геометрии позволила снизить число необходимых КЭ без влияния на качество расчета. На этапе разработки САЕ-модели были введены в задачу материалы каждой детали, а также указана их толщина. Таким образом, разработана качественная КЭ-модель для проведения дальнейших виртуальных испытаний.

Решение анализа по выбранному типу решателя.

Далее происходит решение системы разрешающих уравнений, которые соответствуют выбранному типу анализа в \*.sim файле.

КЭ анализ – это баланс опыта инженера, требования к точности результата, мощности вычислительной техники, времени расчёта, времени разработки расчётной модели. Более детализированные и хорошо дискретизированные расчётные модели дают более точный результат, но требуют большего времени на расчёт и подготовку.

Рассмотрим реализацию поставленных в работе задач на основе выбранных моделей деталей.

### **3.2 Инженерный анализ расчёта деталей панели управления**

В настоящее время в машиностроении внедрены методы проверок в виде различных симуляций, которые предшествуют этапу изготовления физических отливок. Для панели приборов выделены такие тесты, как:

- Жесткость горизонтальных лопаток (Stiffness of Horizontal vanes). Целью испытания является определение величины смещения объекта в зависимости от нагрузки (усилия), которая прикладывается к горизонтальным лопаткам (воздуховодов). По результатам симуляции определяется материал конструкции, утоняются целевые значения смещения для физического теста. Входными данными выступает действующая электронная модель и материал, выходными данными являются значения смещения.

- Удар головой – определяется траектория шара, имитирующего голову человека при фронтальном ударе. Входными данными выступает модель панели приборов, её точки фиксации, модель сферы. Выходными данными выступает замедленное значение удара головой.

- Удар коленом – определяется зона соприкосновения и воздействия на колено при фронтальном ударе. Этот тест направлен на выявление возможных влияний на положение ног человека во время столкновения транспорта с окружающим объектом.

- Боковой удар – оценивает соответствие автомобиля правилу 95 ЕЭК ООН, которое гласит, что при боковом ударе не должно возникать острых кромок или поломок, которые могут повысить травмоопасность пассажира.

- Отражение (Reflection) – выявляет возможные отражения деталей в ветровом стекле автомобиля. Данный тест проводится при разных типовых ситуациях на дороге: в сумерках, тоннеле, в солнечный день и другое, для того, чтобы учесть зону видимости водителя.

Вышесказанные тесты оценивают безопасность водителя и пассажира в транспортном средстве. Существуют тесты, которые оценивают влияние на оценку потребителя во время эксплуатации автомобиля, такие как:

- Шум, вибрация и жёсткость (NVH – Noise, Vibration and Harshness) – которая определяет собственные частоты или динамическую жёсткость для сравнения с целевыми значениями из требований к эксплуатации. Входными данными выступают электронные модели, точки фиксации и значение вибрационных нагрузок, где  $A_{Nz} < B_{Nz}$ , где  $A_{Nz}$  – это результат для проекта, а  $B_{Nz}$  – это цель проекта.

- Статическая жёсткость – определяет усилие (N) необходимое для смещения детали. Входные данные – модель, точки фиксации, материал и поверхность. В результате получают данные по статической жёсткости детали [5].

Выполним разработку расчетной конечно-элементной модели сборки деталей визора и щитка.

Задаются условия сопряжения деталей в сборке. Сопряжения деталей выполняются только в местах крепления панели приборов и щитка с помощью специальной автоматической функции в NX («Склеивание поверхности с поверхностью»). В самих моделях отдельных компонентов сопряжений не существует, так как они являются сшитыми поверхностями (рисунок 65).



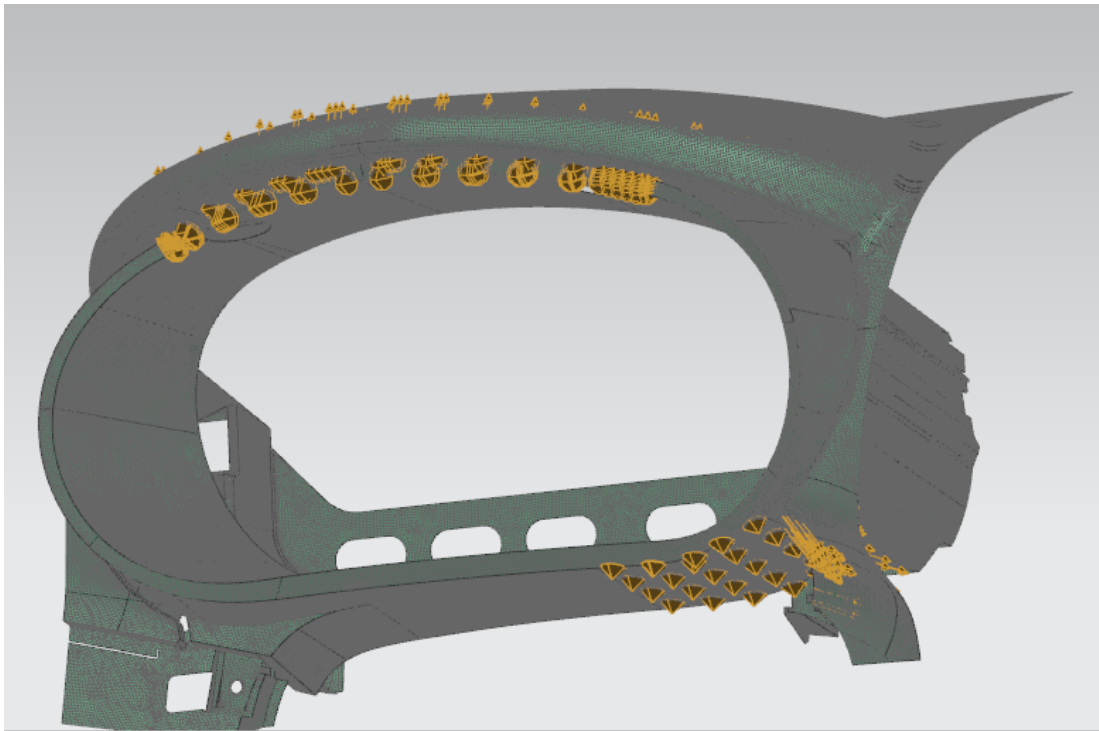


Рисунок 65 – Сопряжение деталей между собой

Тип нагрузки - сила, приложенная к детали в местах установки, равная величине в 5 Н. Данные требования по нагрузке предъявляются к пластиковым деталям интерьера.

Указываются места заделки - области крепления детали к панели приборов (рисунок 66).

В данной работе будут задействованы инструменты трех типов анализа:

- Частотный анализ (выявление пределов шума),
- Потеря устойчивости (коробление детали).
- Статическая прочность (оценка максимальных напряжений при деформации).

На первом этапе проводится линейный анализ, который позволит выявить места и условия появления дефектов - изменения формы при эксплуатации детали (рисунок 67).

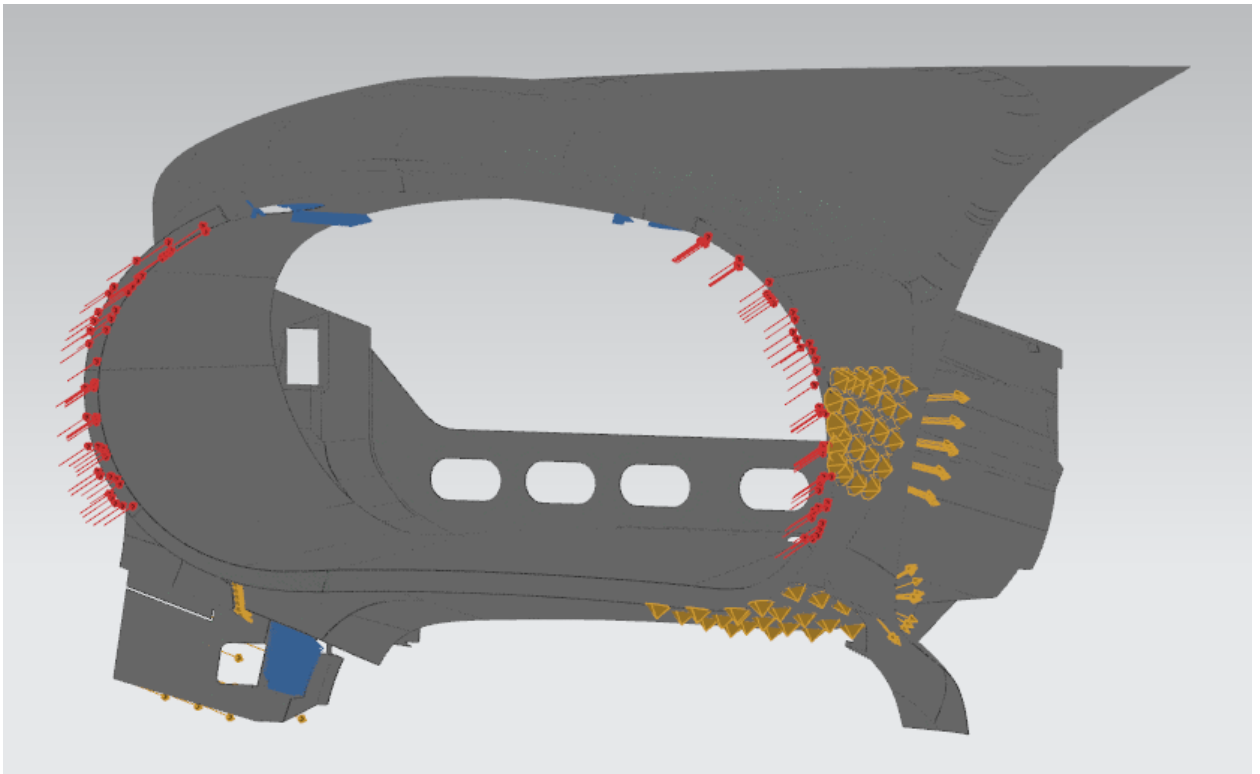


Рисунок 66 – Места заделки и приложения нагрузки в сборочной модели детали щитка

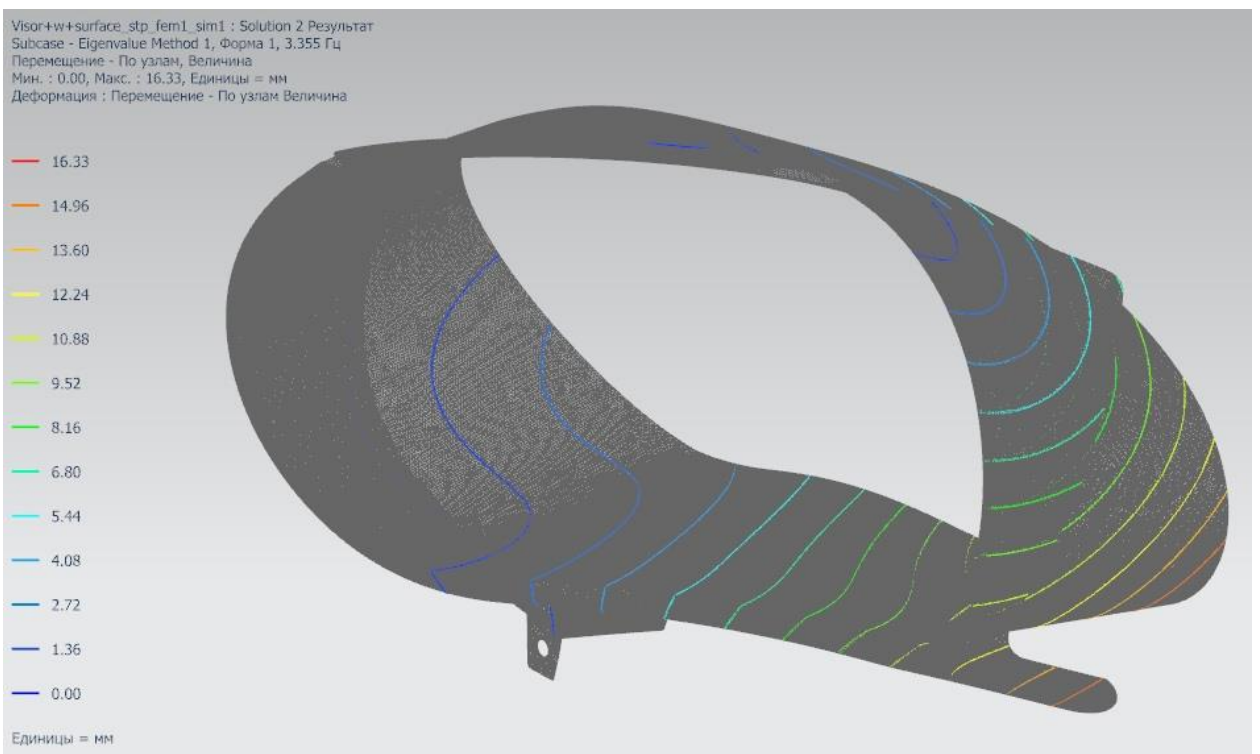


Рисунок 67 – Результаты оценки прочности: деформация формы при напряжении, составляющем 40% от предела прочности материала

Результатом данного анализа выступает, значение напряжения 21,7 МПа, что составляет 40% от предела прочности материала ПП и АБС. Предел прочности ПП – 40 МПа, АБС – 45 МПа.

На втором этапе проводится анализ с целью установления действительных собственных значений колебаний конструкции (частотный анализ). Результаты виртуального испытания будут сравниваться с требованиями по предельному значению частоты. Стандартная предельная величина собственных колебаний конструкции, принятая в отрасли автомобилестроения определена значением 32 Гц с допуском  $\pm 5$  (рисунок 68 – 69).

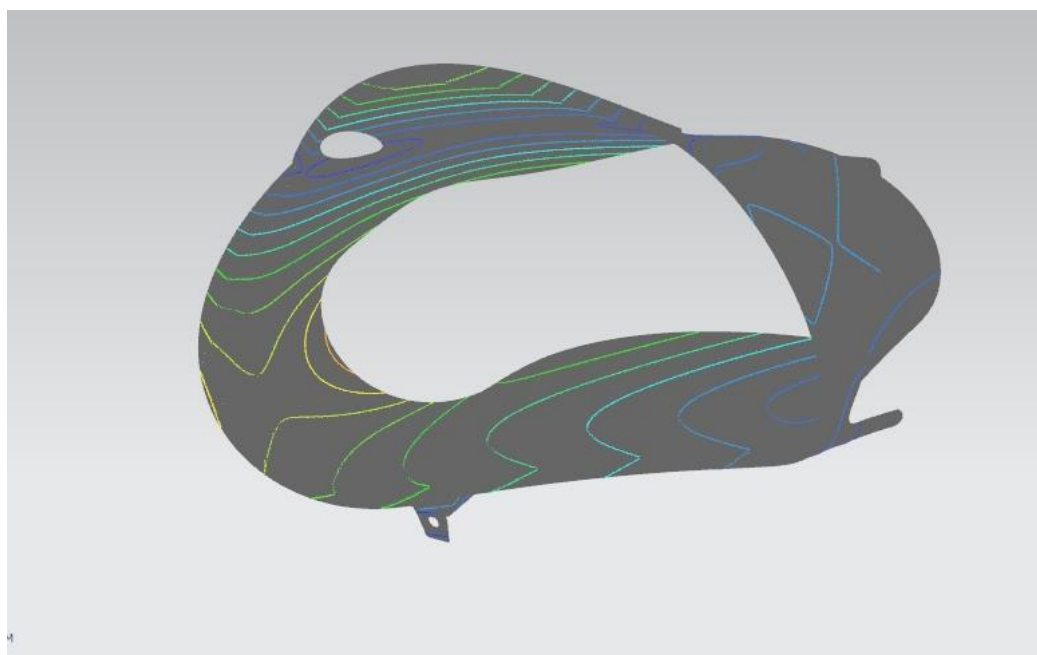


Рисунок 68 – Результаты частотного анализа: 45 Гц

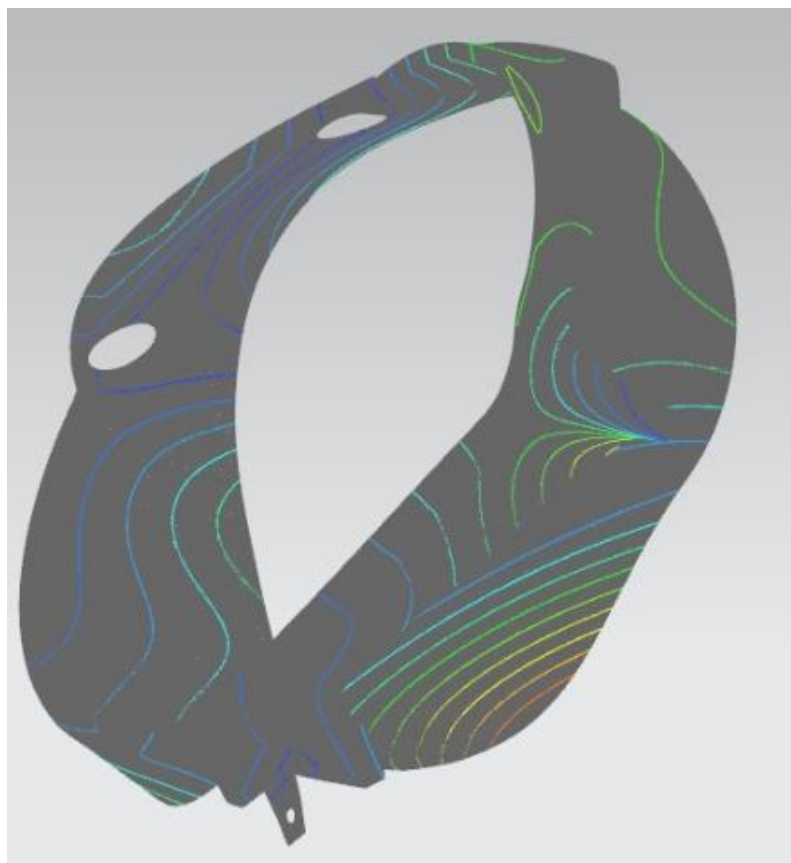


Рисунок 69 – Результаты частотного анализа: 45 Гц

Полученные результаты имеют значения (45 Гц) по воспринимаемой частоте детали и её окружения для автомобилестроения. Данная частота превышает возможные допустимые значения колебаний на 6 Гц, что может быть устранено внедрением рёбер жёсткости по методу, который описан в разделе 1.

На третьем этапе проводится анализ с целью установления возможности возникновения коробления конструкции, то есть оценка потери устойчивости детали. Виртуальные испытания осуществляются при температуре салона автомобиля 23 градуса по шкале Цельсия (рисунок 70).

Данный тест позволяет определить визуально не воспринимаемые человеком места, где деталь имеет наибольшую вероятность к появлению дефекта (рисунок 71)

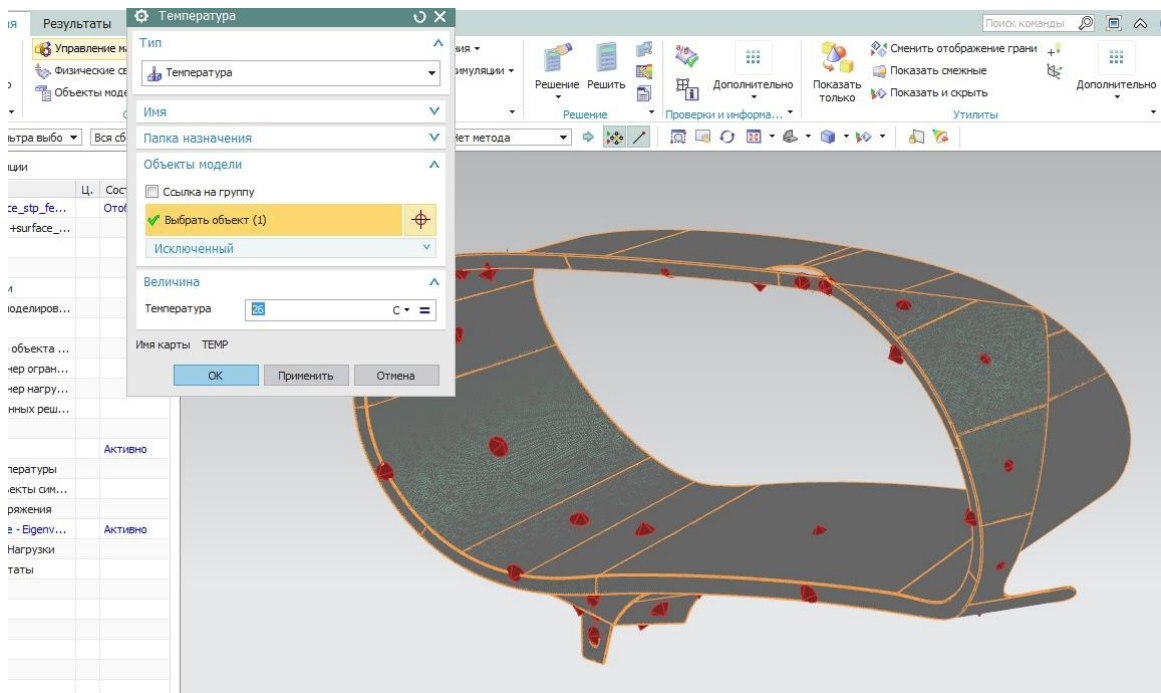


Рисунок 70 – Приложенная нагрузка: температура

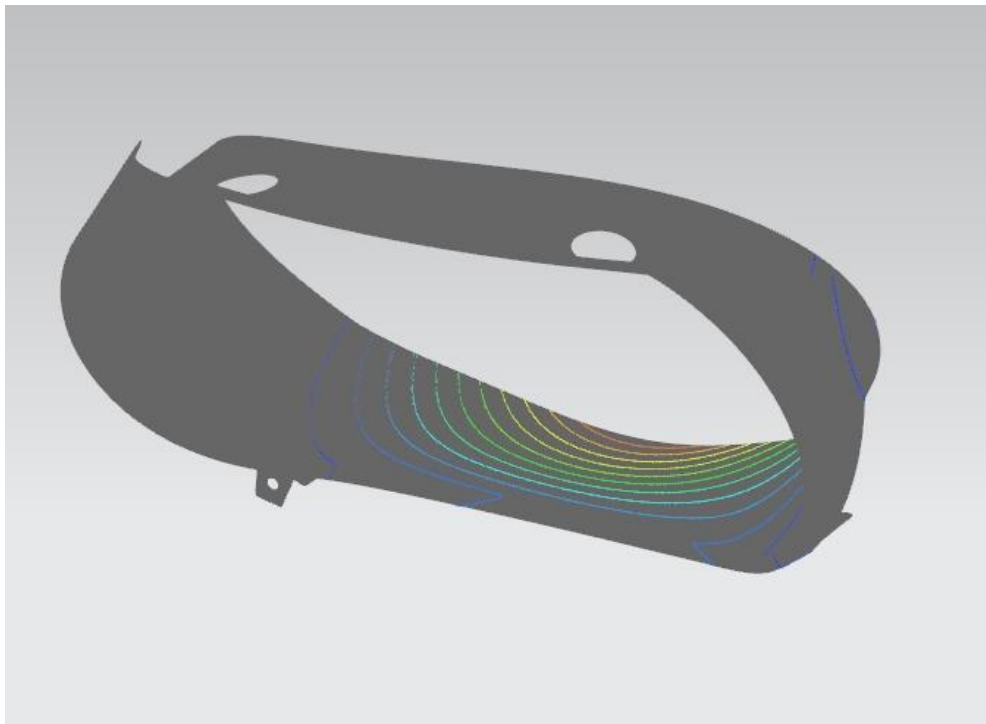


Рисунок 71 – Результат потери устойчивости: место возникновения дефекта «Коробление»

Результаты данного анализа помогут учесть места вероятного появления дефекта при проектировании детали и совершенствовании конструкции компонента до его реализации в оснастке. Дефектом является коробление (смещение определено величиной равной 13,33 мм) участка детали в месте наибольшего периметра поверхности, где нет мест крепления с жёсткой заделкой.

Таким образом, рекомендуется учитывать возможность появления коробления детали и место его возникновения при проектировании следующих деталей схожего назначения. В качестве предлагаемых путей решений данной проблемы могут быть рекомендованы следующие варианты работ:

- Проектирование рёбер жёсткости в соответствии с требованиями, описанными в разделе 1.
- Проектирование и учёт правильного расположения мест крепления деталей друг к другу.

Выводы по третьему разделу:

Работы, проведенные в рамках третьего раздела, позволили сформулировать следующие промежуточные выводы:

1) Проведена процедура идеализации моделей визора и щитка. Проведена проверка идеализированной геометрии, показавшая допустимость электронных моделей для разработки их КЭ моделей.

2) Разработана конечно-элементная модель сборочной конструкции моделей визора и щитка ПП на основе срединной геометрии.

3) Применены модели материалов для деталей панели приборов: АБС и ПП, на основе данных материалов, используемых в машиностроении для интерьера легкового автомобиля.

4) Проведена проверка сетки КЭ, которая показала допустимое

качество конечных-элементов для получения достоверных результатов CAE-расчетов.

5) Разработана расчетная конечно-элементная модель сборки на основе задания мест заделки, приложения нагрузок и указания условий взаимодействия поверхностей двух деталей в сборе.

6) Анализ с целью установления прочности детали показал, что форма детали закрепленной в положении установки в автомобиль составляет 40% от предела прочности материала.

7) Анализ с целью установления действительных собственных значений колебаний конструкции (частотный анализ) показал значение колебаний выше предельных значений, издаваемых деталями панели приборов под критичными нагрузками. Рекомендуется для устранения данного дефекта внедрить в конструкцию визора дополнительные рёбра жесткости.

8) Анализ устойчивости конструкции позволил установить возможность возникновения коробления детали в месте, где не проработан вариант жесткой заделки. Отсутствие жесткой заделки приводит к возможному появлению дефекта на стадии отливки и установки детали. Рекомендуется для устранения возможности появления данного дефекта осуществлять учёт дополнительных рёбер жесткости и правильных мест крепления деталей друг к другу.

## Заключение

В результате работы были сформированы закономерности, позволившие получить более подробные сведения о процессах, протекающих при проектировании пластмассовых деталей в САПР.

На основании полученных данных по материалам и дефектам, были обобщены основные требования к проектированию деталей интерьера автомобиля. Проведены CAE – расчёты с оценкой прочности, устойчивости конструкции, а также с определением частоты колебаний деталей.

На основании полученных результатов расчётов были сформулированы рекомендации, направленные на повышение качества полимерных деталей интерьера легкового автомобиля с целью уменьшения процента возникновения дефектов на стадии их эксплуатации.

В настоящей работе достигнуты следующие основные результаты:

1. Выполнен обзор методов проектирования полимерных деталей для группы панели приборов, где выделены особые требования: безопасность, долговечность и трудоёмкость процесса. Данные требования достигаются при соблюдении требований к радиусам, кромкам, бобышкам, а также обоснованным выбором подходящего материала для процесса литья.
2. Построены электронные модели выбранных деталей группы панели приборов с помощью ПО – NX. Собран сборочный узел деталей, проведён анализ зазоров и пересечений деталей электронной модели сборки.
3. Предложены подходы по идеализации электронных моделей тонкостенных деталей с геометрией повышенной степени сложности.
4. Выполнена разработка конечно-элементной модели с оценкой ее качества.
5. Проведена оценка частоты собственных колебаний, устойчивости и прочности деталей в сборе, даны рекомендации по снижению вероятности появления дефектов.



## Список используемой литературы и используемых источников

1. Бате К., Вилсон Е. Численные методы анализа и метод конечных элементов. М., 1982.
2. Голованов А.И., Тюленева О.И., Шигабутдинов А.Ф. Метод конечных элементов в статике и динамике тонкостенных конструкций. М., 2006.
3. Голушко С.К., Немировский Ю.В. Прямые и обратные задачи механики упругих композитных пластин и оболочек вращения. М., 2008.
4. Овсянников А.Д., Макаров А.Г., Сталевич А.М., Демидов А.В. - Математическое моделирование вязкоупругих процессов полимеров // Вестник СПбГУ, сер.10, 2006, вып.3 Д.А.
5. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. М., 1975.
6. Матвеев А.Д. Построение многосеточных конечных элементов для расчета оболочек, пластин и балок на основе образующих конечных элементов // Вестник ПНИПУ. Механика. 2019. No 3. DOI 10/15593/perm.mech/2019.3.05.
7. Матвеев А.Д. Построение сложных многосеточных конечных элементов с неоднородной и микронеоднородной структурой // Известия Алт. гос. унта. 2014. No 1/1. Серия: Математика и механика. DOI: 10.14258 /izvasu (2014)1.1-18
8. Матвеев А.Д. Метод многосеточных конечных элементов в расчетах трехмерных однородных и композитных тел // Учен. зап. Казан. унта. Серия: Физ.- матем. науки. 2016. Т. 158, кн. 4.
9. Матвеев А.Д. Метод многосеточных конечных элементов в расчетах композитных пластин и балок // Вестник КрасГАУ. 2016. No 12.
10. Матвеев А.Д. Метод образующих конечных элементов // Вестник КрасГАУ. 2018. No 6.

11. Матвеев А.Д. Многосеточное моделирование композитов нерегулярной структуры с малым коэффициентом заполнения // Прикладная механика и техническая физика. 2004. No 3
12. Матвеев А.Д. Расчет упругих конструкций с применением скорректированных условий прочности // Известия Алт. гос. ун-та. 2017. No 4. DOI 10.14258/izvasu(2017)4-21
13. Матвеев А.Д. Метод эквивалентных условий прочности в расчетах композитных конструкций — 2021
14. Немировский Ю.В., Резников Б.С. Прочность элементов конструкций из композитных материалов. Новосибирск, 1984.
15. Норри Д., Ж. де Фриз. Введение в метод конечных элементов. М., 1981.
16. Caliri M.F., Ferreira A.J.M., Tita V. A review on plate and shell theories for laminated and sandwich structures highlighting the Finite Element Method // Composite Structures. 2016. Vol. 156
17. Секулович М. Метод конечных элементов. М., 1993.
18. Смирягин, А. П., Днестровский Н. З., Ландихов А. Д. И др. Обработка цветных металлов и сплавов: Справочник. М.: Metallurgizdat, 1961. 872 с.
19. Фудзии Т., Дзако М. Механика разрушения композиционных материалов. М., 1982.
20. Ahmed A., Kapuria S. A four-node facet shell element for laminated shells based on the third order zigzag theory // Composite Structures. 2016. Vol. 158.
21. Carrera E., Pagani A. Valvano S. Shell elements with through-the-thickness variable kinematics for the analysis of laminated composite and sandwich structure // Composites Part B: Engineering. 2017. Vol. 111.
22. Carrera E. Theories and finite elements for multilayered, anisotropic, composite plates and shells // Archives of Computational Methods in Engineering. 2002. Vol. 9.

23. Cinefra M., Carrera E. Shell finite elements with different through-the-thickness kinematics for the linear analysis of cylindrical multilayered structures // *Int. J. Num. Meth. Eng.* 2013. Vol. 93. No 2.
24. Ghassemieh E. *Materials in Automotive Application, State of the Art and Prospects // New Trends and Developments in Automotive Industry.* – 2011, 367-372.
25. Hasim K.A., Kefal A., Madensi E. Isogeometric plate element for unstiffened and blade stiffened laminates based on refined zigzag theory // *Composite Structures.* 2019. Vol. 222.
26. Matveev A.D. Multigrid finite element method in stress of three-dimensional elastic bodies of heterogeneous structure // *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2016. Vol. 158. No 1. Art. 012067.
27. Miller W.S. Recent development in aluminum alloys for the automotive industry // *Materials Science and Engineering: A.* – 2000, 37-49.
28. Rah K., Van Paepegem W., Habraken A.M. and Degrieck J. A partial hybrid stress solid-shell element for the analysis of laminated composites // *Comp. Meth. Appl. Mech. Eng.* 2011. Vol. 200. No 49–52.
29. Soltani Z., Hosseini Kordkheili S.A. Interlaminar stress analysis of composite shell structures using a geometrically nonlinear layer-wise shell finite element // *Composite Structures.* 2021. Vol. 257.
30. Vasco Joel C. *Additive Manufacturing // Handbooks in Advanced Manufacturing.* – 2021, 505-530.
31. William D. Nielsen, Jr. *Metallurgy of Copper-Base Alloys.* – *Journal of Materials Processing Technology.* – 2020, 1–5.
32. Yasin M.Y., Kapuria S. An efficient layerwise finite element for shallow composite and sandwich shells // *Composite Structures.* 2013. Vol. 98.
33. Zienkiewicz O. C., Taylor R. L., Zhu J. Z. *The finite element method: its basis and fundamentals.* Oxford, 2013.