

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 технологического процесса листовой  
штамповки лонжеронов легкового автомобиля в САПР

---

Студент	<u>В.О. Базаров</u> <small>(И.О. Фамилия) (личная подпись)</small>
Научный руководитель	<u>к.т.н., П.Н.Шенбергер</u> <small>(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)</small>
Консультант	<u>к.т.н , Е.Н. Почекуев</u> <small>(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)</small>

Тольятти 2020

## Содержание

Введение.....	4
1 Анализ конструкции лонжеронов легковых автомобилей и тенденций развития их производства .....	6
1.1 Обзор конструкционных особенностей лонжеронов легковых автомобилей.....	6
<b>1.2 Механические свойства материалов лонжеронов современных легковых автомобилей.....</b>	<b>11</b>
<b>1.3 Упругое пружинение и методы повышения точности изготовления лонжеронов легковых автомобилей.....</b>	<b>16</b>
1.4 Тенденции развития производства изготовления лонжеронов легкового автомобиля.....	19
2 Разработка конструкции и технологии изготовления лонжеронов в САПР	
2.1 Моделирование лонжеронов легковых автомобилей в САПР .....	28
2.3 Методы повышения точности изготовления лонжеронов.....	41
2.3.1 Конструктивные способы обеспечения жесткости лонжеронов .....	41
2.3.2 Технологические методы обеспечения снижения пружинения.....	43
<b>3 Анализ напряженного деформированного состояния заготовки при п-образной гибки.....</b>	<b>45</b>
<b>3.1 Особенности анализа процесса гибки .....</b>	<b>45</b>
3.2 Методы численного анализа напряженно-деформированного состояния.....	48
<b>3.3 Анализ напряженного состояния в САЕ .....</b>	<b>51</b>
<b>3.4 Анализ деформированного состояния в САЕ.....</b>	<b>59</b>
4 Моделирование в САПР технологии гибки лонжеронов и анализ точности их изготовления .....	63

4.1 Моделирование штамповки и анализ точности лонжерона при свободной гибки .....	63
4.2 Моделирование штамповки и анализ точности лонжерона при гибки с выталкивателем .....	76
4.3 Моделирование процесса гибки и анализ точности штамповки методом планируемого эксперимента .....	81
4.3.1 Построение функции отклика для планируемого эксперимента без выталкивателя .....	81
4.3.2 Построение матрицы планируемого эксперимента для “улучшенной схемы” .....	89
Выводы .....	92
Заключение .....	93
Список используемых источников.....	94

## Введение

В мире автомобильной промышленности листовая штамповка занимает одну из главных ролей. С помощью пластической деформации металла изготавливают листовые детали автомобиля, несущий кузов или раму, а также комплектующие детали. Для повышения конкурентной способности легковых автомобилей и их модернизации инженерам-конструкторам и инженерам-технологам приходится работать в строгих рамках стандартов и ГОСТов. Современные стандарты и ГОСТы, а также развитие автомобилестроения, требуют скорейшего и качественного внедрения новых конструкций и технологий.

Конструкцию автомобильных лонжеронов из листового металла в современных автомобилях характеризует сложная форма поверхности. Для минимизации дефектов при последующем изготовлении конструкторы используют при проектировании элементы жесткости, а технологи создают процессы штамповки с заданным напряженно-деформированным состоянием для повышения надежности и точности лонжеронов.

Для производства лонжеронов высокой точности и определенными техническими характеристиками необходимы обширные знания о влиянии комплекса конструктивных и технологических параметров. Для формирования этой базы знаний, используются натурные испытания и численное моделирование. Компьютерные симуляции, основываются на методе конечных элементов, которое позволяет наблюдать эффекты влияния изменения любого параметра процесса и конструкции лонжеронов. Результаты численного моделирования снижают время на техническую подготовку и улучшают качество продукта.

**Актуальность исследования:** Все большее количество листовых деталей автомобиля в том числе и лонжероны изготавливаются из труднодеформируемых сталей. Использование листовых материалов с более высокими прочностными характеристиками приводит к ряду

технологических проблем: увеличение энергосиловых показателей процесса, меньший ресурс пластичности материалов, возрастание упругого пружинения и снижение точности изделий. Для изготовления изделий из труднодеформируемых материалов и снижения производственных затрат требует разработки новых методик моделирования процессов штамповки лонжеронов повышенного качества и точности. Совершенствование этапов разработки технологии и конструирования оснастки на основе методов моделирования технологических процессов изготовления лонжеронов из труднодеформируемых материалов в САПР является актуальной проблемой.

**Целью работы** является, разработка методики проектирования технологического процесса холодной листовой штамповки лонжеронов с минимальным значением пружинения на основе моделирования процесса штамповки п-образной гибки в САПР.

Задачи работы:

1. Анализ технологии и моделирования процессов пластической деформации лонжеронов п-образной гибкой.
2. Разработка в САПР электронной модели лонжерона.
3. Разработка методики численного анализа напряженно-деформированного состояния при п-образном изгибе.
4. Разработка методики проектирования процессов п-образной гибки лонжеронов в САЕ на основе планируемого эксперимента.

**Научная новизна:** Разработка новой методики проектирования технологических процессов п-образной гибки, которая позволит производить лонжероны без геометрических дефектов.

**Объект исследования:** Методика анализа напряженно-деформированного состояния при п-образном изгибе и метод проектирования процесса холодной листовой штамповки лонжеронов на основе планируемого эксперимента

**Предмет исследования:** Производство лонжеронов высокого качества без геометрических дефектов из труднодеформируемых материалов.

## **1 Анализ конструкции лонжеронов легковых автомобилей и тенденций развития их производства**

### **1.1 Обзор конструкционных особенностей лонжеронов легковых автомобилей**

Лонжерон автомобиля – прочный конструктивный элемент, который предназначен для создания несущей конструкции кузова легкового автомобиля. Он необходим для крепления силового агрегата, навесных элементов и других деталей кузова. Лонжерон должен выдержать значительные нагрузки, которые передаются на кузов через колеса транспортного средства во время движения и он необходим для обеспечения безопасности пассажиров в случае лобовых столкновений автомобиля. На рисунке 1.1 представлен кузов легкового автомобиля его лонжероны.



Рисунок 1.1 – Кузов легкового автомобиля

Главное назначение конструкции таких элементов – это возможность создания надлежащего и необходимого уровня прочности и жесткости при малой массе. Для того чтобы придать такие требования конструкция лонжерона должна имеет ряд особенностей :

1. Геометрию и различные размеры профилей сечений, для обеспечения прочности и жесткости

2. Технологические отверстия, а также отверстия для вентиляции и монтажа агрегатов и узлов выполняются в местах, где меньше нагрузка.

3. Ребра жесткости, для повышения прочности и жесткости конструкции и выполнения функций “демпфера” при лобовых столкновениях.

4. Фланцы для установки лонжерона в кузов автомобиля и для монтажа при сборке кузова, а также крепления навесных деталей.

Лонжероны автомобиля в легковых автомобилях могут иметь различные конструкции и выполнять разные функции. Лонжероны раздельной конструкции – устанавливаются в определенных местах кузова:

- В передней части для усиления конструкции моторного отсека
- В средней части для упрочнения днища салона
- В задней части укрепления для задка кузова

На рисунке 1.2 представлены лонжероны автомобиля «Волга», как можно увидеть из рисунка, конструкция очень проста, содержит минимальные усиления конструкции, также присутствуют отверстия овальной формы, для смятия лонжерона при аварии. Толщина металла 3 мм с внешней стороны и 2 мм со стороны моторного щита.



Рисунок 1.2 – Лонжероны автомобиля “Волга”

В настоящее время существует огромное количество разновидностей кузова, но не обязательно, что все указанные выше лонжероны используются. Зачастую в несущей конструкции могут отсутствовать лонжероны средней и задней части, но вот лонжероны передней части кузова есть всегда. Причиной тому служат несколько факторов:

- Установка силового агрегата выполняется в большинстве автомобилей в передней части кузова
- Обеспечение надлежащей безопасности пассажиров автомобиля (рисунок 1.3)
- Технологичность сборки несущего кузова автомобиля и навесных узлов и агрегатов.

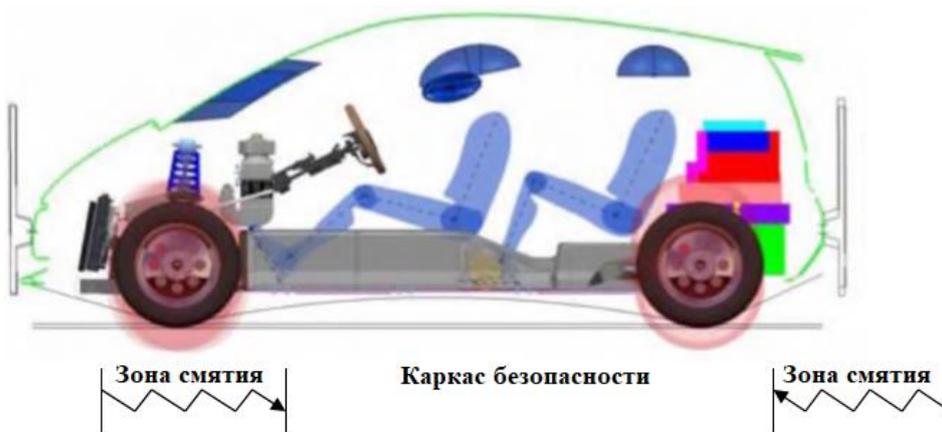


Рисунок 1.3 – Каркас безопасности

Также несущий кузов может быть спроектирован и с цельным лонжероном, который расположен от переднего бампера к заднему. Такая конструкция более надежна, очень близка по конструктивным особенностям к рамной конструкции (рисунок 1.4), которая, как и рама, сложна в изготовлении.



Рисунок 1.4 – Рама

Вне зависимости от вида лонжеронов, они всегда парные и располагаются параллельно друг относительно друга, иногда располагаются под небольшим углом.

В этой работе будут рассматриваться лонжероны современного легкового автомобиля (рисунок 1.5), которые устанавливаются в передней части автомобиля, в подкапотном пространстве. Причиной тому является достаточно важная роль, отведенная данному элементу несущей конструкции.

К основным конструктивными параметрам лонжерона можно отнести толщину заготовки, высоту вертикальных полок, ширину фланца, а также размеры нижней полки.

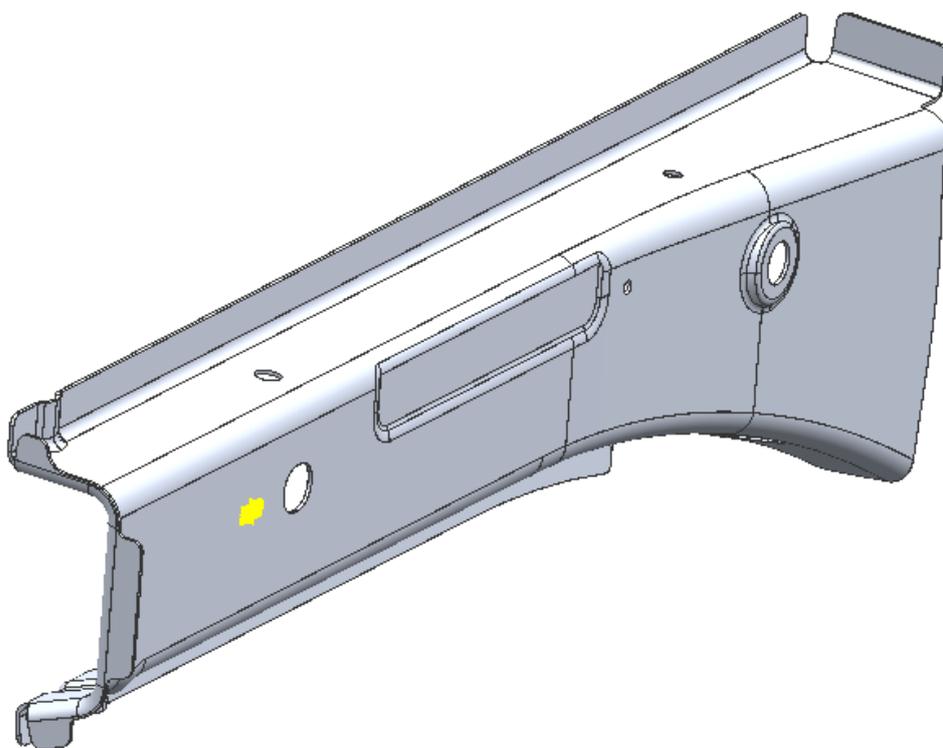


Рисунок 1.5 – Лонжерон современного автомобиля

## 1.2 Механические свойства материалов лонжеронов современных легковых автомобилей

Легковой автомобиля должен быть прочным, легким и экономичным. В автомобильной промышленности факторы развития определяются потребителями и возможностями производства. Эти три требования часто противоречат друг другу при разработке новых конструкций автомобилей (рисунок 1.6). Толчком к развитию и улучшению конструкции автомобиля чаще всего являются возникающие проблемы и противоречия.



Рисунок 1.6 – Блок-схема возникающих проблем при разработке концепции автомобиля

Точный прогноз и контроль пружинения позволят конструкторам оснастки численно оценить возможность получения заданной формы изделия и выполнить необходимые модификации только на основе этой информации. Надежная численная процедура может исключить потребность в

экспериментальных пробах, и, следовательно, радикально уменьшает время выполнения и производственные расходы.

Основными тенденциями развития автомобиля является дизайн, технологичность, безопасность пассажиров, показатели прочности, вес и экономический фактор. Иногда факторы меняются местами.

Удовлетворение этим требованиям во многом зависит от выбора материалов деталей автомобиля. В современном автомобилестроении используются различные материалы: металлы, пластики, композиты, стекло и др. Однако автомобили для массового пользователя изготавливают и собирают в основном из металлических деталей, выполненных из различных сталей.

Стали которые применяют в автомобилестроении принято группировать по двум показателям-пределу прочности ( $\sigma_b$ ) и предельной величине деформации растяжения до разрушения ( $\epsilon_p$ ) (рисунок 1.7).

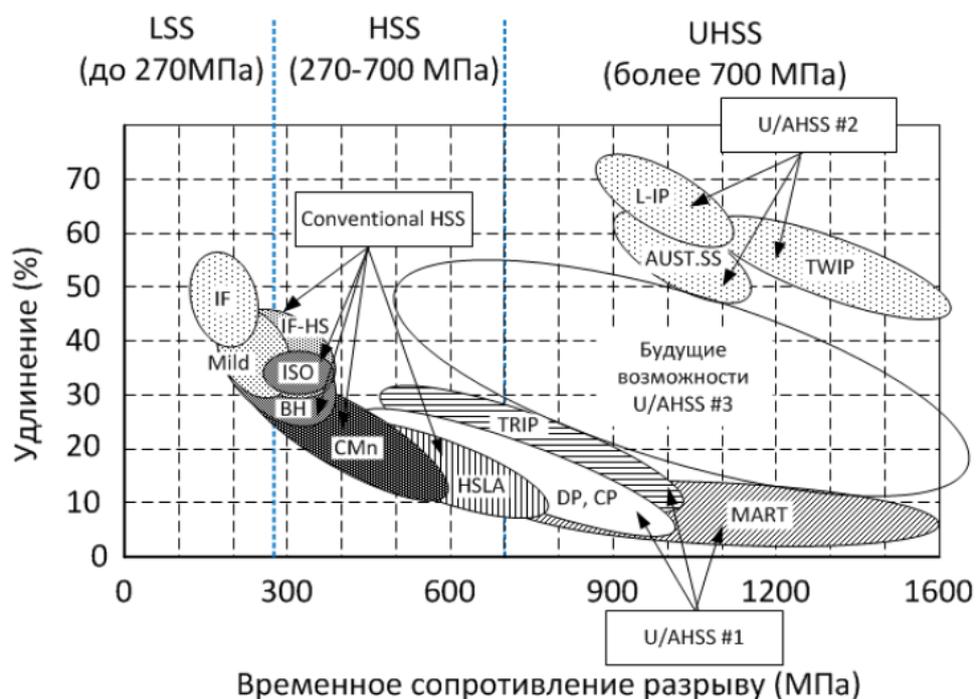


Рисунок 1.7 - Диаграмма, иллюстрирующая диапазон свойств для современных стальных материалов в автомобилестроении

Они обычно подразделяются на три группы:

- стали с пониженной прочностью (LSS-Low Strength Steels). К ним относятся высокопластичные IF (Interstitial Free), низкоуглеродистые стали марок 01,08, мягкие Mild стали;
- стали высокой прочности (HSS-High Strength Steel), такие стали с как сталь с термическим упрочнением при сушке (BH –стали), низколегированные стали (HSLA- High Strength Low Alloy), стали (C-Mn), двухфазные стали (DP);
- стали ультравысокой прочности AHSS (Advanced high strong steels) или усовершенствованные высокопрочные стали. К таким сталям относят:

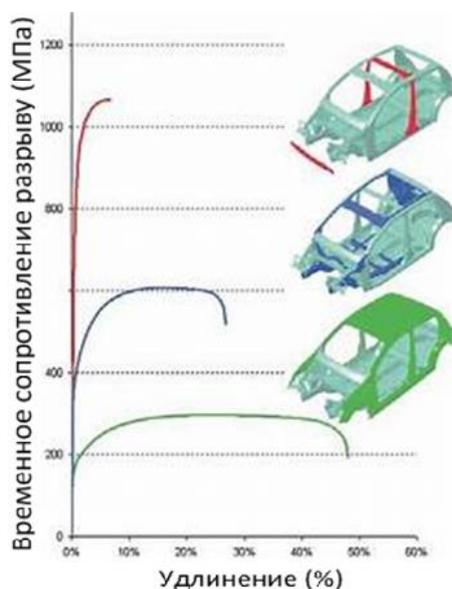
DP стали, TRIP (Transformation Induced Plasticity) стали, CP (Complex Phase) стали, мартенситные (MS) и феррито-бейнитные (FB) стали, TWIP (Twinning-Induced Plasticity) стали у которых пластическая деформация также происходит за счет механизма двойникования.

В силу большого разнообразия требований, которым должны удовлетворять конструкции узлов и деталей автомобиля материалы, в которых они используются разделены также и на функциональные группы (рисунок 1.8):

1. Стали группы AHSS имеют достаточно высокий предел прочности, но малую предельную пластическую деформацию. Такие стали применяются для штамповки средних стоек, поперечины крыши, а также усилителя бампера.

2. Стали группы HSS имеют достаточный предел прочности при хороших показателях пластичности (штампуемости). Такие стали применяются для штамповки передних стоек, лонжеронов, брызговика среднего пола и панели багажника

3. Стали группы LSS, применяются для штамповки лицевых деталей автомобиля, а также некоторым деталям несущего кузова автомобиля, имеющих сложную геометрическую форму: крылья, капот, двери и т.д.



- Стали для ответственных деталей, обеспечивающих безопасность пассажира в случае аварии
- Высокопрочные стали с хорошим балансом прочности, формоустойчивости, поглощения энергии и долговечности
- Стали с отличной формоустойчивостью (например, для глубокой вытяжки)

Рисунок 1.8 Напряжение (в МПа) в зависимости от удлинения (в процентах) для различных типов стали и их применения в конструкции кузова

Лонжерон легкового автомобиля относится ко 2-ой группе и может быть изготовлен из HSS сталей.

Поскольку к второй группе относятся большое количество кузовных деталей, около 50% от всего кузова, поэтому и выбор сталей HSS для конструкторов очень большой. При выборе стали производители руководствуются следующими причинами:

- Локализацией автопроизводителя
- Классом выпускаемого автомобиля
- Предназначением изделия
- Экологическими нормами
- Стоимостью стали

### **1.3 Упругое пружинение и методы повышения точности изготовления лонжеронов легковых автомобилей**

Конструкция лонжерона и материал, из которого он изготовлен, а также технология производства определяют возникающие дефекты в процессе производства и сборки кузова.

Основным способом изготовления лонжерона легкового автомобиля является штамповка из листового металла. Главная операция для получения формы лонжерона-гибка. Лонжероны изготавливаются из труднодеформируемых листовых материалов, которые при гибке могут приводить к дефектам. Типичные дефекты, свойственные в практике листовой штамповки складкообразование и волнистость, пережим, последующий перелом, царапины и шероховатая поверхность. Эти дефекты усугубляют искажение формы, получившееся в результате пластического пружинения. Деформирование высокопрочных сталей HSLA вызывает значительные по величине остаточные напряжения, которые влияют на конечную форму изделия после снятия нагрузки. Точность изготовления конечного продукта зависит от формы инструмента, параметров процесса, геометрии и материала заготовки. Важно учитывать все эти факторы при производстве, чтобы не изготовить дефектный продукт. В момент окончания деформирования, геометрия изготовленной детали должна соответствовать размерам и форме инструмента.

Пружинение может быть определено как упругое деформирование изделия за счет остаточных напряжений, возникающих при снятии внешних нагрузок. Пружинение сложный физический процесс и состояние, которые в основном определяются напряжениями и деформациями, возникающим в конце штамповки перед разгрузкой, геометрией детали и ее физико-механическими свойствами. В зависимости от геометрии искажения изделия после разгрузки, выделяют несколько видов пружинения в листовой штамповке: изгибные, мембранные, кручения и комбинированные. Изгибное

пружинение можно наблюдать после гибки материала при плоской деформации. Мембранное пружинение происходит при разгрузке материала от плоского растяжения или сжатия. Пружинение кручения можно наблюдать при деформировании изделий с большой разницей в форме и размерах сечения, например, для панелей и лонжеронов. Пружинение результат неравномерных пластических деформаций в различных направлениях. Комбинированное и изгибное пружинение - тип, который чаще всего наблюдается в промышленной практике. Геометрия изделия обычно такая сложная, что материал изгибается вне плоскости и одновременно растягивается или сжимается в плоскости (рисунок 1.9).

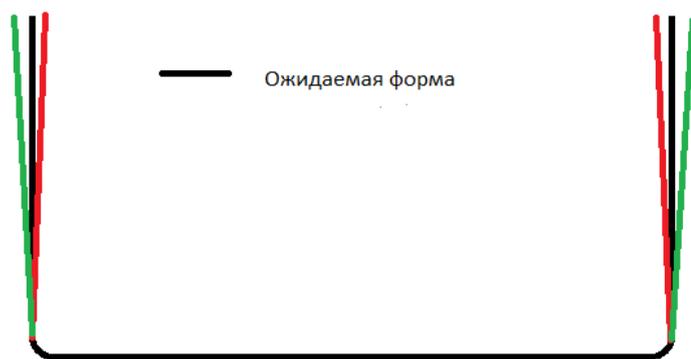


Рисунок 1.9 – Искажения геометрии изделия, вызванные пружинением

После разгрузки упругие остаточные напряжения изменяют форму изделия. Результат искажения формы после пружинения показан на рисунке 1.10, где геометрия автомобильной детали показана в двух сечениях. Профили сечения, измерены с помощью оптического сканера. Как можно заметить, пружинение вызывает значительные отклонения геометрии детали от проекта дизайнеров, что является одной из причин проблем сборки. В современных конструкциях автомобилей, пружинение приводит к серьезным

проблемам в связи с возрастающей тенденцией использования листов из алюминиевых сплавов и высокопрочных сталей. Так как из-за своих механических свойств изделия из этих материалов при разгрузке проявляют более высокие геометрические искажения.

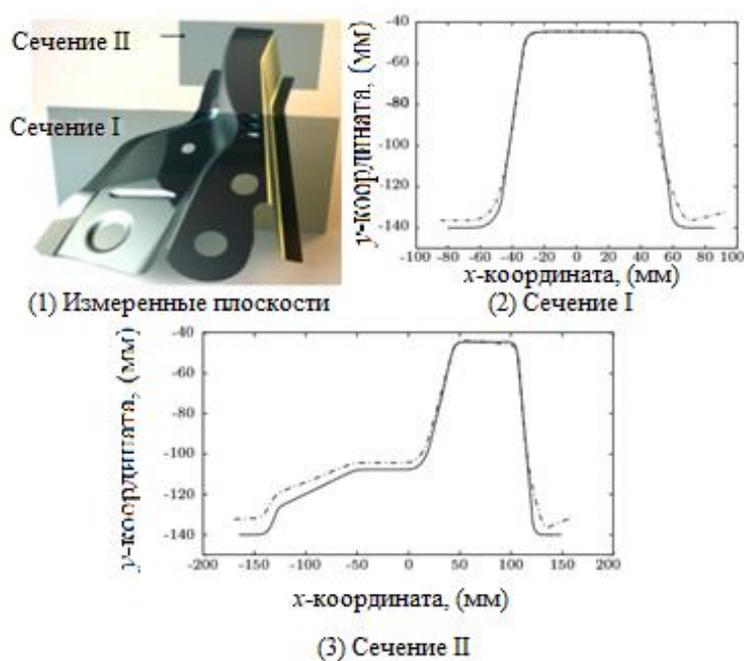


Рисунок 1.10 – Проявление феномена пружинения в двух сечениях

В производстве лонжеронов управление пружинением осуществляют на основе технического контроля и определения искажения геометрии детали. Применяют различные методы измерения искажения формы: применение калибров; измерение пружинения на матрице. Эти технологии дают надежную информацию компенсации пружинения, но могут занимать много времени и быть нерентабельными, особенно когда сложные детали, изготавливаются из высокопрочных сталей или алюминия.

Поэтому для разработки технологии штамповки лонжеронов используют компьютерные симуляции на этапе проектирования процесса штамповки и оснастки, с целью управления пружинением.

Выделяют две группы методов управления снижения пружинения:

- Управление непосредственно в процессе штамповки (оптимальный прижим, деформирование за несколько стадий процесса штамповки и др.);
- Управление посредством компенсации пружинения (за счет изменения формы изделия, инструмента или хода деформирования. Эти меры компенсации назначаются в процессе разработки технологии штамповки).

#### **1.4 Тенденции развития производства изготовления лонжеронов легкового автомобиля**

Точность и качество изготовления лонжеронов «закладываются» в процессе их проектирования и изготовления.

Полный цикл современного производства легкового автомобиля (рисунок 1.11) состоит из нескольких этапов,

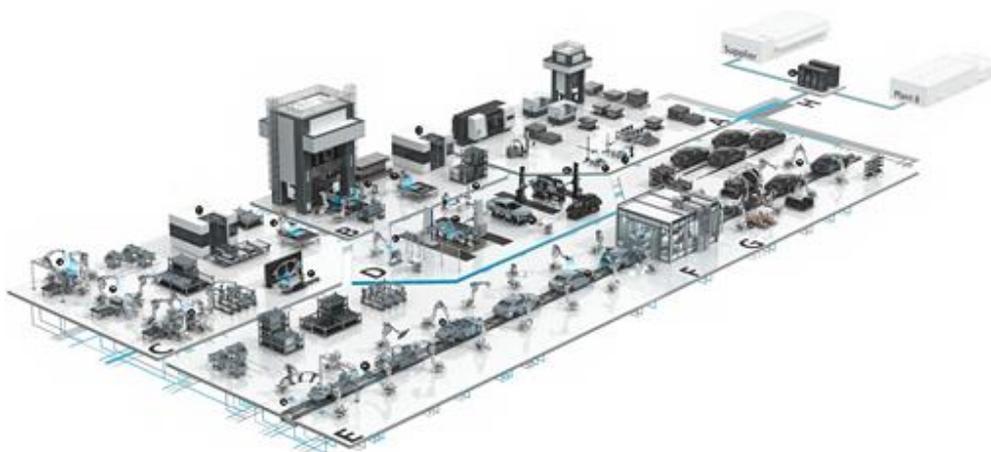


Рисунок 1.11 – Полный цикл производства легкового автомобиля

Рассмотрим основные этапы производства автомобиля с момента получения полуфабрикатов, до полной сборки автомобиля и выхода ее с конвейера.

Вся производственная цепочка изготовления автомобиля основана на принципе Деминга- «следующий процесс – ваш потребитель» [1]. Согласно этому принципу (рисунок 1.12), после каждого этапа производственного процесса необходим контроль(1 и 2).



Рисунок 1.12 – Контроль производства легкового автомобиля

На заготовительном этапе в цехах прессового производства, изготавливаются изделия из листового металла (рисунок 1.13) в том числе и лонжероны. Также на этом этапе присутствует проверка штампованных изделий, чтобы избежать дальнейших проблем при сборке (1 и 2).

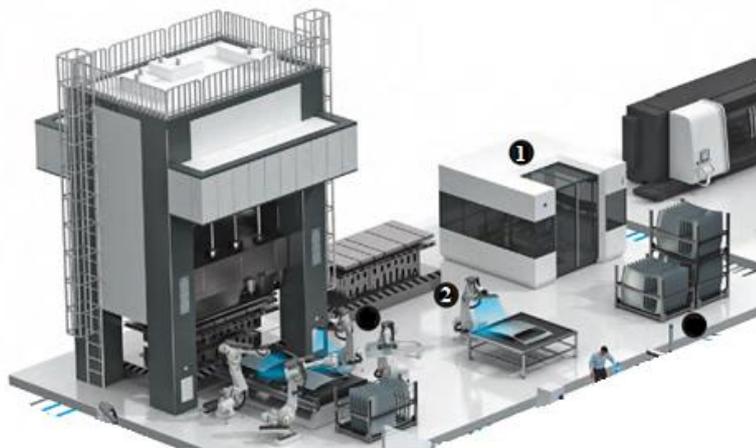


Рисунок 1.13 – Прессовое производство

В последние годы возросла производительность труда в результате широкого применения полной или частичной автоматизации процессов листовой штамповки. Наряду с ранее известными операциями листовой штамповки лонжеронов при помощи гибки (рисунок 1.14) получают развитие такие процессы, как глубокая вытяжка, формовка, горячая штамповка и ряд других процессов деформирования лонжеронов, с помощью пластической деформации металла.



Рисунок 1.14 – Технология изготовления лонжеронов гибкой.

Исторически с начала производства автомобиля лонжероны автомобиля изготавливаются с помощью холодной листовой штамповки в штампах (рисунок 1.15), затем была предложена и применена горячая штамповка листового материала.



Рисунок 1.15 Механический пресс и штамповая оснастка

Сейчас используются оба варианта. Технологию горячей штамповки применяют в тех случаях, когда мощности используемого оборудования не хватает для деформирования металла в холодном состоянии, и когда при обработке необходимо подвергнуть деформации деталь из металла, отличающегося невысокой пластичности.

В процессе сборки автомобиля (рисунок 1.16) важным этапом является операция сварки кузова.

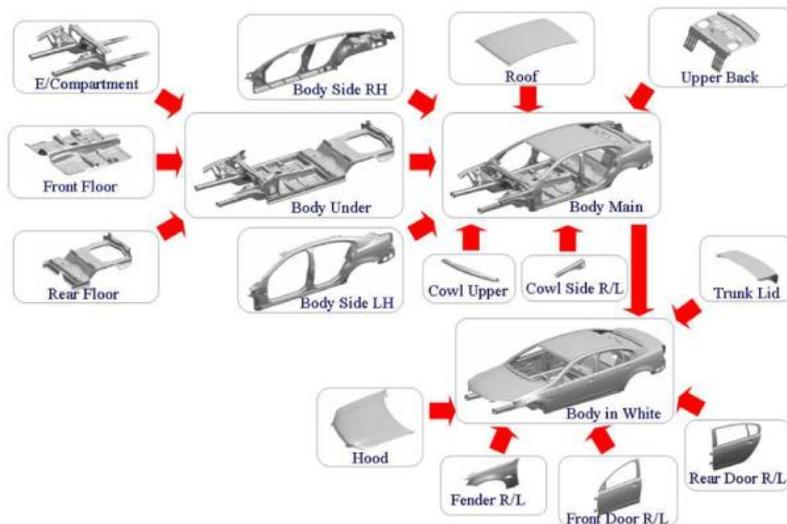


Рисунок 1.16 – Сборка кузова легкового автомобиля

При сборке кузова с помощью сварки детали устанавливаются в кондуктора и соединяются между собой с помощью сварки (рисунок 1.17).



Рисунок 1.17 – Сварка элементов кузова в кондукторе

На рисунке 1.18 представлена часть производства, где происходит сварка отдельных элементов кузова в промежуточные более крупные узлы, например средний пол, задний пол, передний модуль (1). Также на этом этапе сварка происходит в кондукторах, где детали устанавливаются в соответствующие пазы, отверстия и т.д. На этом этапе также важно проконтролировать изготовленные узлы (2,3,4,5,6), потому что это начальный этап сборки кузова и важно проконтролировать его, чтобы в дальнейшем не возникло проблем, таких как, наличие зазора капота или невозможность установки фары в соответствующий ответный паз.

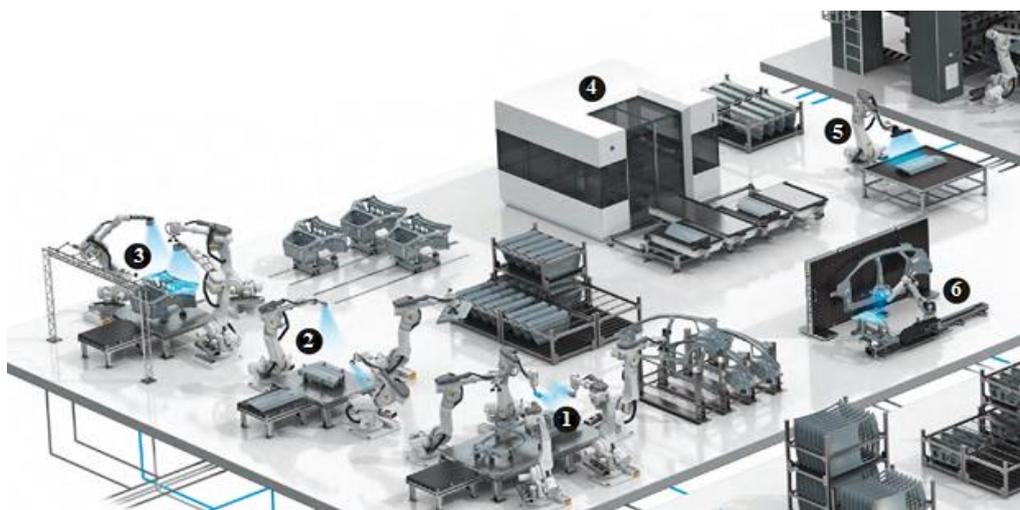


Рисунок 1.18 – Сварочный цех

Процесс контроля кузова легкового автомобиля регулярно проводят сложный с помощью измерений на контрольно-измерительных машинах (КИМ). Качество каждой детали кузова очень важно. Поэтому проверки геометрии кузова проходят после каждого из этапов сборки, так как от этого зависит качество автомобиля.

На рисунке 1.19 представлен промежуточный контроль сборочной линии, где производят контроль отдельных элементов лицевых деталей автомобиля (1,2), контроль крупно-узлового элемента сборки кузова (3), показанного на рисунке 1.20, контроль уже собранного кузова с навесными элементами на кондукторе, без силовой структуры, без двигателя, трансмиссии и прочих узлов (15,16), контроль отдельно взятого элемента на общий кондуктор (18).



Рисунок 1.19– Измерительная лаборатория



Рисунок 1.20- Контроль геометрии крупно-узлового элемента кузова

На рисунке 1.21 представлен этап создания кузова автомобиля, к этому этапу все элементы кузова прошли уже немало проверок, но, несмотря на это, после сборки-сварки кузова автомобиля, существует этап контроля кузова на конвейере (Check in-line) (4).

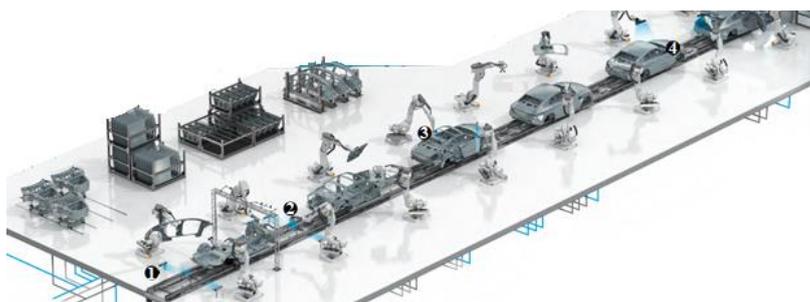


Рисунок 1.21 – Конвейер сборочно-кузовного производства

После сборки кузова и проверки его на (4) этапе, происходит сертификация геометрии кузова. Затем кузова отправляются в покрасочные цеха, где происходит нанесение защитных покрытий, краски и лака. Последним этапом сборки автомобиля является, так называемая “свадьба” и сборка всех остальных комплектующих на этапе (1), последним этапом является окончательный сборка автомобиля на этапе (2). Все эти этапы представлены на рисунке 1.22.

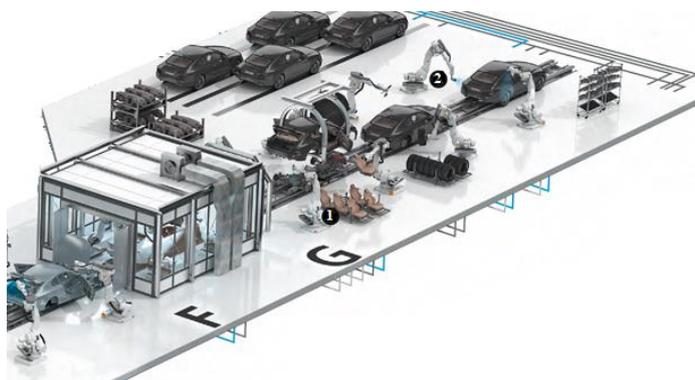


Рисунок 1.22 – Окончательная сборка легкового автомобиля

## Выводы:

1. Анализ литературных источников позволил установить, конструкции, физико-механические свойства и технологии производства лонжеронов легковых автомобилей, которые определяют их внешний вид, качество, экономичность и безопасность пассажиров.
2. Выявлено, что точность изготовления лонжеронов определяется процессом пружинения, возникающим после разгрузки
3. С целью повышения качества, экономичности автомобилей и безопасности пассажиров за счет изготовления эффективных лонжеронов легковых автомобилей в магистерской диссертации необходимо решить следующие задачи:
  - провести анализ литературы и патентных источников о процессах, влияющих на точность изготовления лонжеронов легковых автомобилей;
  - создать CAD и CAE модель лонжерона, поставить задачу численного моделирования процесса пружинения лонжеронов;
  - разработать метод планируемого численного эксперимента для оценки влияния технологических и конструктивных параметров лонжерона на точность его штамповки;
  - выявить оптимальную величину хода гибки п-образного профиля лонжерона с минимальным значением пружинения.

## **2 Разработка конструкции и технологии изготовления лонжеронов в САПР**

### **2.1 Моделирование лонжеронов легковых автомобилей в САПР**

При проектировании лонжерона, в первую очередь нужно рассмотреть его “окружение”. Окружение - это то пространство, которое окружает деталь или узел во время его сборки и эксплуатации. В случае с лонжероном этим пространством будет почти все подкапотное пространство. В первую очередь нужно рассмотреть, внешние габариты лонжерона, которые задаются другими более фундаментальными элементами кузова. На рисунке 2.1 изображена передняя часть кузова автомобиля Лада Веста. Как видно из рисунка, лонжерон окружают такие элементы, как брызговик, кронштейн опоры двигателя, поперечина моторного щита и сам моторный щит. Все эти детали при проектировании в САПР будут представлять из себя поверхности, которые будут описывать внешние габариты этих деталей, для того чтобы при проектировании лонжерона избежать самопересечений деталей при сборке.

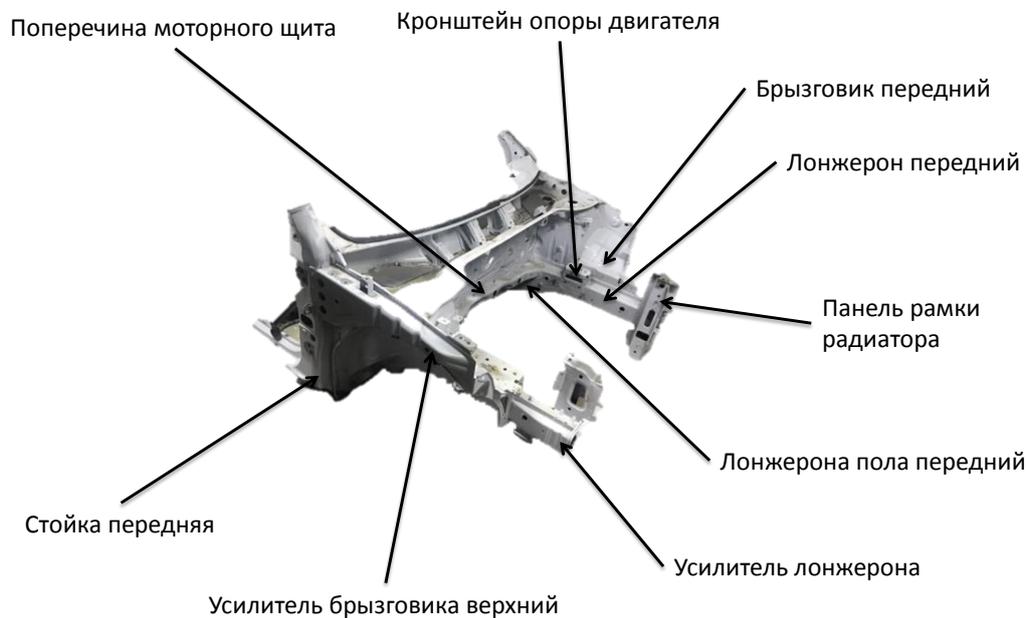


Рисунок 2.1 – Передняя часть кузова автомобиля Лада Веста.

Лонжерон имеет сложную пространственную геометрию, так как взаимодействует с множеством узлов и элементов при сборке и эксплуатации. Исходя из рисунка 2.1, можно увидеть, что почти 90% деталей кузова являются парными и зеркально отраженными относительно средней продольной плоскости автомобиля. Они располагаются по правую и левую сторону автомобиля, выполняя одну и ту же функцию, но могут иметь и различия в конструкции:

- Подштамповки, чтобы избежать пересечения со смежными деталями или элементами по правую или левую сторону
- Отверстия, чтобы обеспечить присоединение различных датчиков крепежных элементов и т.д.
- Вырезки, чтобы избежать пересечения со смежными деталями.

В России основным автопроизводителем считается ОАО АВТОВАЗ, поэтому в этой работе будут применяться следующие конструктивные особенности, принятые на заводе:

- Расположение руля по левой стороне
- Фиксирование силового агрегата на лонжероны автомобиля
- Расположение аккумулятора по левой стороне
- Расположение блока предохранителей и реле под капотом с левой стороны
- Прокладка жгута проводов по левой стороне
- Для некоторых автомобилей наличие блока Антиблокировочной системы. На автомобилях ОАО «АВТОВАЗ», он располагается на лонжерона с левой стороны.

Для ранее определенных функций и назначений лонжерона, был выбран левый лонжерон. С целью проектирования были созданы изображенные на рисунке 2.2. границы. На рисунке 2.2. видны ограничивающие плоскости, которые задают внешние габариты. Лонжерон не должен заходить за эти плоскости, чтобы не произошло самопересечения с другими деталями и узлами, также показаны отверстия, для присоединения навесного оборудования, ориентирования детали в штампе во время изготовления и сборки.

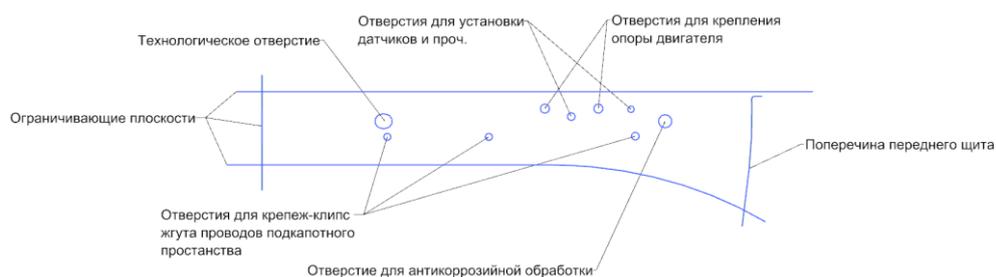


Рисунок 2.2 – «Окружение» лонжерона в плоском виде.

На рисунке 2.3 изображено электронная модель «окружения» лонжерона. Представлены все плоскости, относительно которых лонжерон будет конструироваться. На этом этапе уже можно представить геометрию лонжерона и его внешние габариты. Также понять, с какими кузовными деталями он будет соединяться при сборке кузова, продумать места крепления с кузовом и навесными узлами и агрегатами.

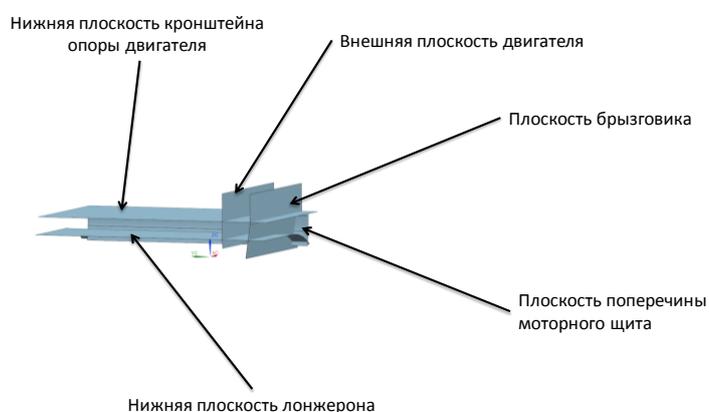


Рисунок 2.3 – Окружение в 3D.

Лонжерон автомобиля имеет фланцы по всему контуру на одном из концов, который в свою очередь сопрягается с усилителем бампера или панели рамки радиатора, как это показано на рисунке 2.4. Именно в этом места важно получить соответствие реальной й геометрии с электронной моделью, поскольку в этом соединении есть продольные и поперечные защитные элементы каркаса безопасности, лонжероны и передний усилитель, соответственно.

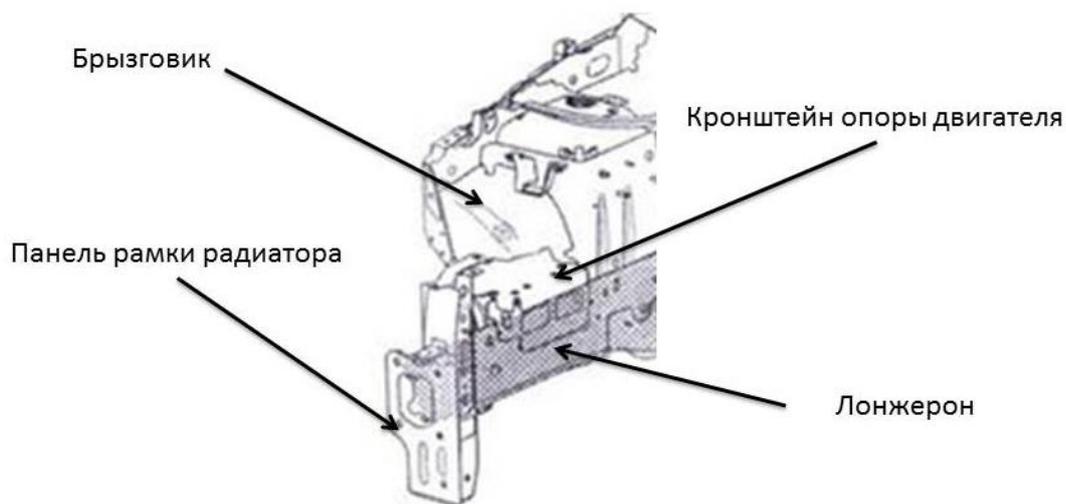


Рисунок 2.4 – Присоединение лонжерона с панелью рамки радиатора.

На рисунке 2.5 изображены все плоскости, которые ограничивают геометрию лонжерона. После того как мы получили полное окружение, можно приступить к непосредственному проектированию лонжерона в САПР.

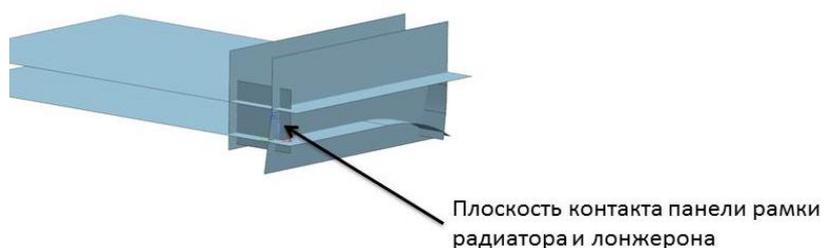


Рисунок 2.5 – Плоскость контакта панели рамки радиатора и лонжерон

Моделирование лонжерона будет производиться в САД-система Siemens NX 9.0. Поскольку лонжероны изготавливаются из листового металла, в Siemens NX есть возможность использовать приложение

«Листовой металл NX», но лонжероны проектируются чаще всего посредством приложений «Моделирование» и «Поверхность». Там лонжерон приобретает изначальную форму. Затем, благодаря функции «Преобразовать в листовой металл», показанной на рисунке 2.6, можно любое тело преобразовать в листовой металл.

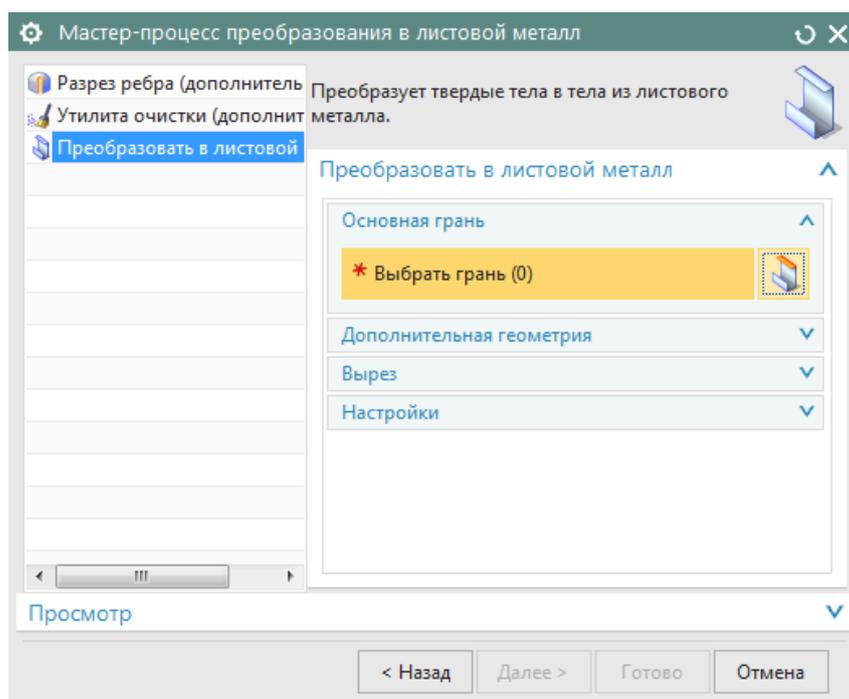


Рисунок 2.6 – Преобразовать в листовой металл

Изначальная геометрия будет сконструирована в модуле «Моделирование», после средствами функции, указанной на рисунке 2.6, преобразована в листовой металл. Сначала была построена плоскость, располагающаяся на расстоянии 53,4 мм от вертикальной плоскости брызговика, получившая название плоскость лонжерона (рисунок 2.7).

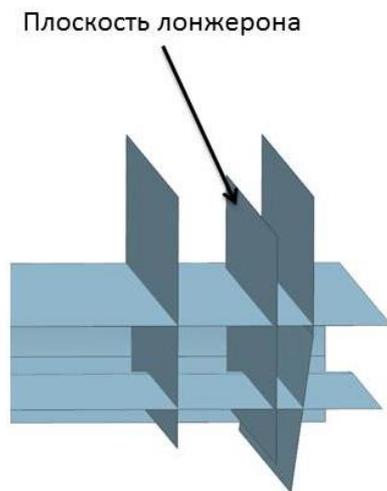


Рисунок 2.7 – Плоскость нижней полки лонжерона

Далее плоскость лонжерона обрезается другими плоскостями с помощью функции поверхность обрезки, показанной на рисунке 2.8. Целью является получения поверхности лонжерона с границами, используя плоскости, изображенные на рисунке 2.5.

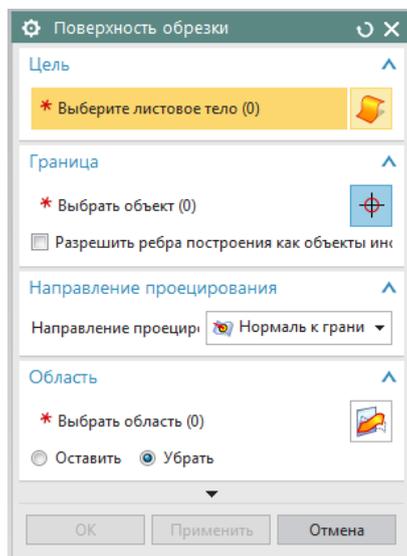


Рисунок 2.8 – Поверхность обрезки

Результат, который получился после проведения всех обрезок, изображен на рисунке 2.9.

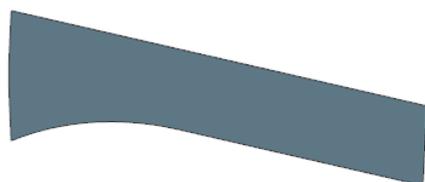


Рисунок 2.9 – Нижняя плоскость лонжерона

Поскольку длина лонжерона достаточно большая, 730 мм, было принято решение изогнуть данную плоскость лонжерона по середине на 4 градуса, место изгиба было скруглено с  $R=381,5$  мм. Результат представлен на рисунке 2.10.

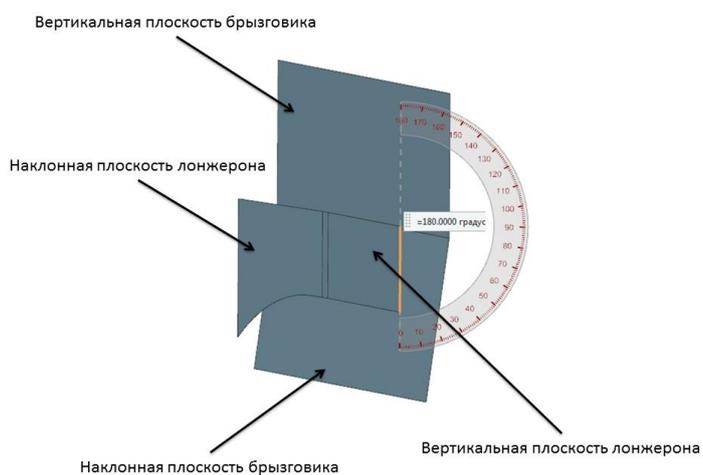


Рисунок 2.10 – Плоскость лонжерона и плоскость брызговика

На следующем шаге, необходимо выполнить сопряжение между брызговиком и лонжероном. На рисунке 2.11 показаны все возможные способы соединения кузовных деталей между собой:

- а — применяемые сварные соединения (1 — внахлест; 2 — с накладкой; 3 и 4 — прилегающие);
- б — нежелательные сварные соединения (1 — встык; 2 — угловое; 3 — Т-образное; 4 — крестообразное);
- с — дуговая сварка в газовой среде (СО<sub>2</sub>);
- д — двусторонняя контактная сварка (1 — точечная; 2 — шовная);
- е — односторонняя контактная сварка (1 — верхний лист более тонкий; 2 — верхний лист значительно тоньше; 3 — неподвижный вспомогательный электрод).

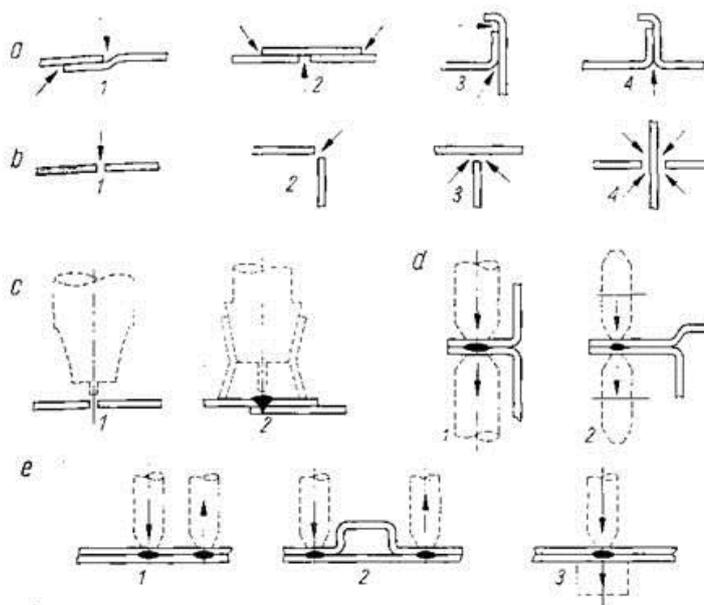


Рисунок 2.11 - Неразъемные соединения кузовных деталей, выполняемые сваркой.

Был выбран способ двухсторонней контактной сварки, поскольку необходимо достичь максимальной прочности конструкции кузова. Для

обеспечения возможности двухсторонней контактной сварки требуется выполнение ряда условий:

1. Для соединения с брызговиком, фланцы лонжерона должны быть параллельны плоскостям брызговика.
2. Для получения более плотного прилегания, необходимо чтобы фланцы были плоскими
3. Радиус фланца лонжерона должен иметь один радиус по всей длине лонжерона, поскольку поверхность лонжерона имеет криволинейную геометрию.
4. Радиусы обоих фланцев должны иметь одинаковый радиус по всей длине контакта их с брызговиком, для упрощения процесса сварки и изготовления штамповой оснастки.

Результат моделирования при соблюдении выше определенных условий представлен на рисунке 2.12.

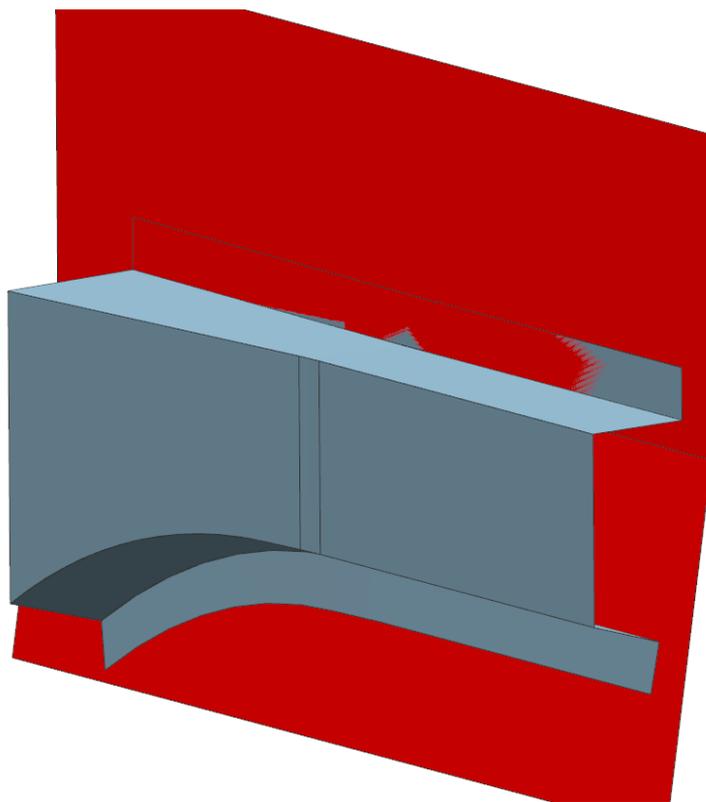


Рисунок 2.12 – Геометрия лонжерона

Поскольку профиль геометрии лонжерона сформирован, следующим шагом, нужно создать сопряжение его с другими деталями, которые задают положение лонжерона (панель рамки радиатора, моторный щит). Результат представлен в сборке на рисунке 2.13

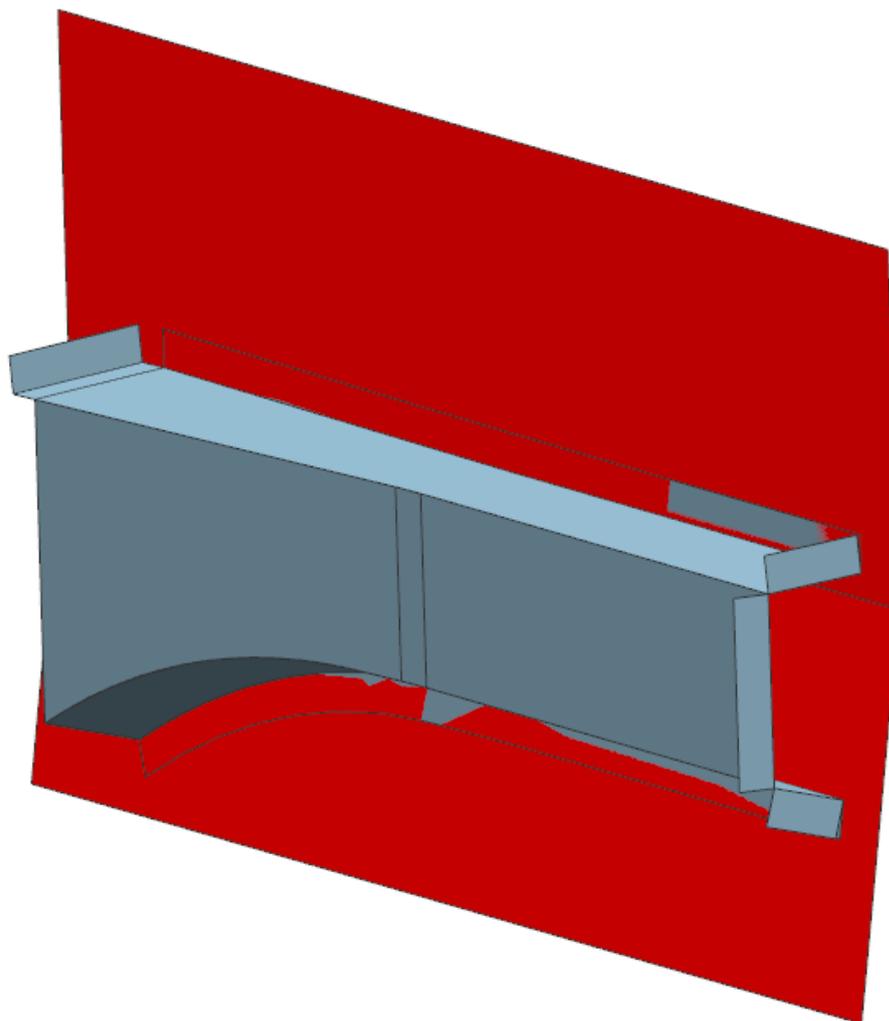


Рисунок 2.13 – Геометрия фланцев для соединения с кузовом

Следующим шагом, необходимо преобразовать поверхность лонжерона в трехмерное тело с толщиной. Результат этой операции представлен на рисунке 2.14.

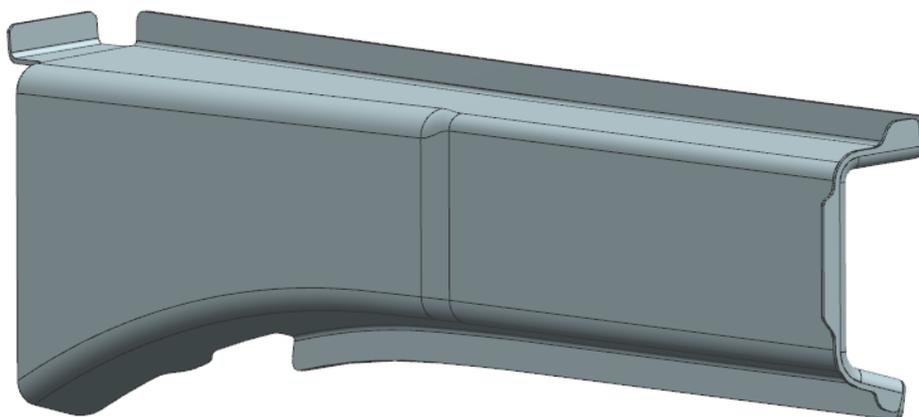


Рисунок 2.14 – Твёрдотельное представление лонжерона

Следующим шагом нужно выполнить отверстия, согласно схеме на рисунке 2.2.. Результат представлен на рисунке 2.15.

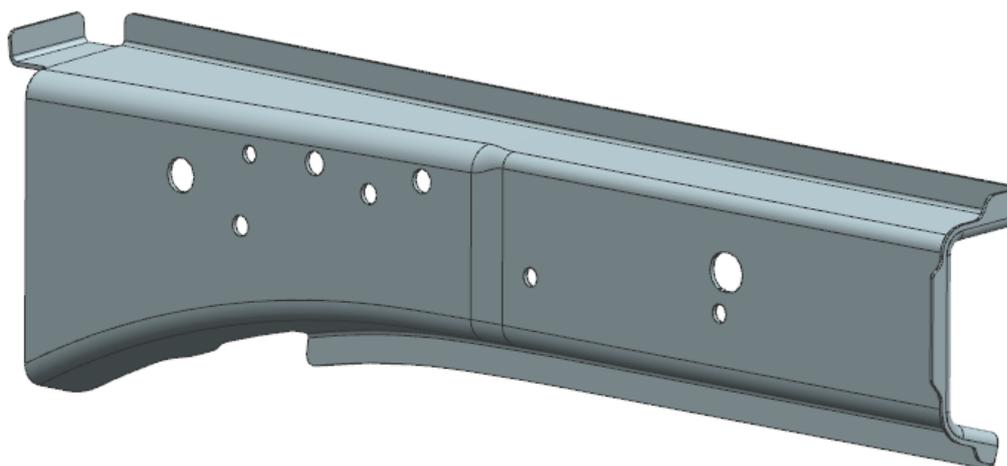


Рисунок 2.15 – Окончательная геометрия лонжерона.

## 2.2 Разработка технологии изготовления лонжеронов

В любом технологическом процессе листовой штамповки все операции можно разделить на следующие виды:

1. Разделительные операции
2. Формообразующие операции
3. Штамповочные операции

На рисунке 2.16 представлена схема, на которой продемонстрированы все операции:

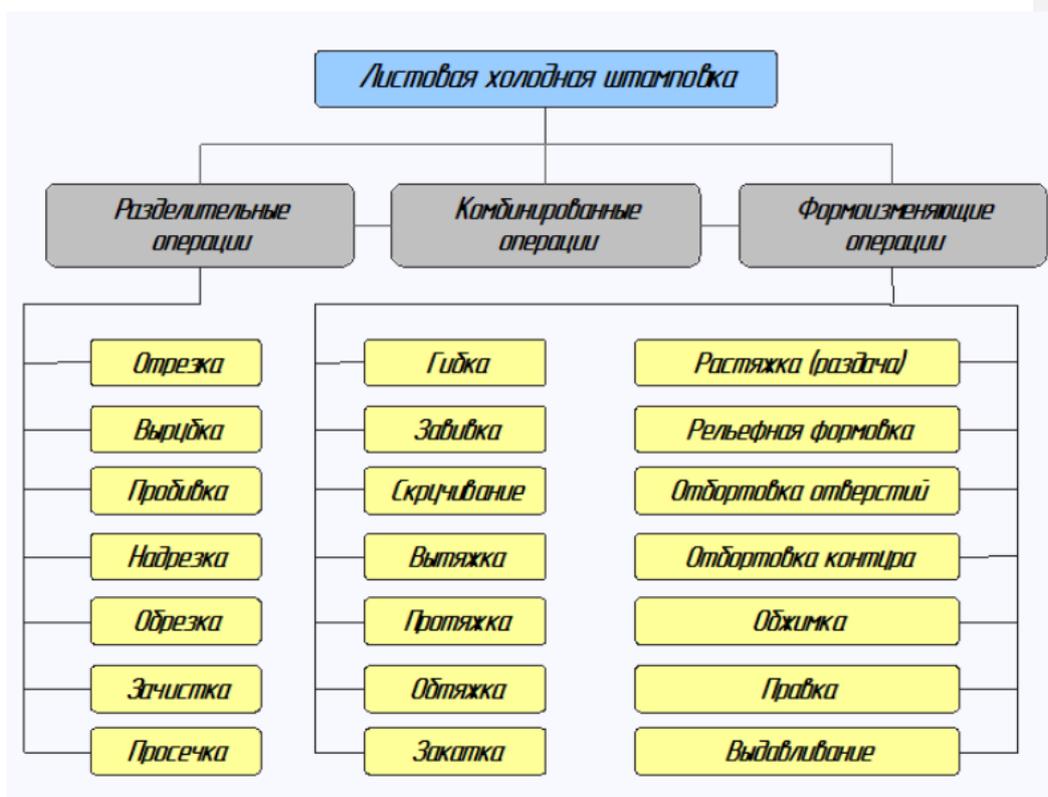


Рисунок 2.16 – Классификация основных операций листовой штамповки

В базовом технологическом процессе изготовления лонжеронов листовой штамповке основной формообразующей операцией является

вытяжка с применением прижима. В предложенном варианте данная операция заменена на двухугловую гибку, для того чтобы изменить напряженно-деформированное состояние металла, а также изменить течение металла, чтобы была возможность управления явлением пружинения во время и после разгрузки.

На рисунке 2.17 представлен технологический процесс изготовления лонжерона.

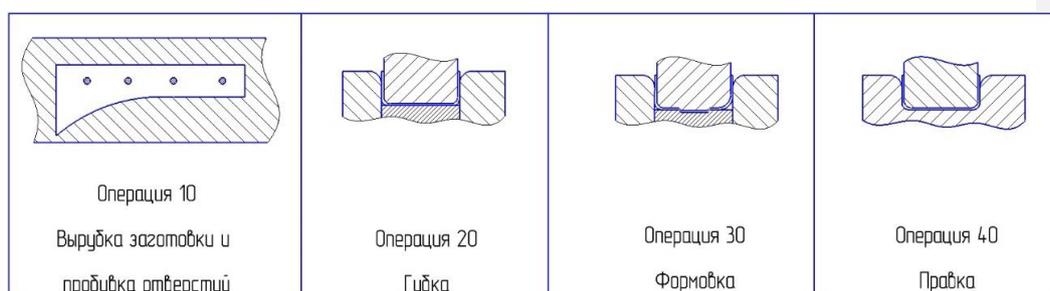


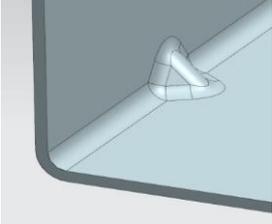
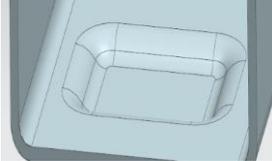
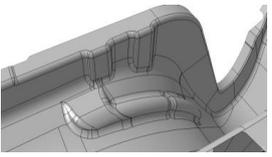
Рисунок 2.17 – Техпроцесс изготовления лонжерона

## 2.3 Методы повышения точности изготовления лонжеронов

### 2.3.1 Конструктивные способы обеспечения жесткости лонжеронов

Для усиления конструкции, в целях обеспечения должной жесткости и возможности выполнения функции демпфера во время эксплуатации и при ДТП, в конструкцию лонжерона внедряют ряд конструктивных элементов, представленных в таблице 1.

Таблица 1 – Конструктивные элементы, увеличивающие жесткость конструкции

Название	Визуализация	Преимущества	Недостатки
Рёбра жёсткости		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Минимизирует геометрические дефекты</li> <li>- Придаст жесткость конструкции в углах</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Усложняет сопряжение деталей с внутренней поверхностью лонжерона</li> <li>- Способствует короблению после штамповки</li> </ul>
Подштамповка на нижней полке		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Придаёт жесткость нижней полке</li> <li>- Уменьшает коробление при штамповке</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ухудшает скручивание при ДТП</li> <li>- Усложняет сопряжение деталей</li> </ul>
Подштамповка на боковых полках		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Придаёт жесткость боковой полке</li> <li>- Улучшает демпфирующие свойства</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Необходимо более мощное оборудование</li> </ul>
Отверстия, отверстия овальной формы		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Улучшает демпфирующие свойства</li> <li>- Улучшает скручиваемость при ДТП</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Усложняет технологический процесс штамповки, добавляет разделительную операцию</li> <li>- Требуется дополнительный штамп для вырубки/пробивки</li> </ul>

### 2.3.2 Технологические методы обеспечения снижения пружинения

Изменения технологии штамповки (различные виды компенсации пружинения, изменение вида напряженно-деформированного состояния (растяжение, чеканка и др.), приводят к увеличению количества переходов и др.)

На практике чаще всего применяются технологические методы компенсации пружинения и ряд других способов:

1. Применение компенсаторов (рисунок 2.18);
2. Изменение анизотропии материала (рисунок 2.19);
3. Увеличение количества штамповочных переходов (рисунок 2.20);
4. Применения дополнительных калибрующих операций (калибровка) (рисунок 2.21).

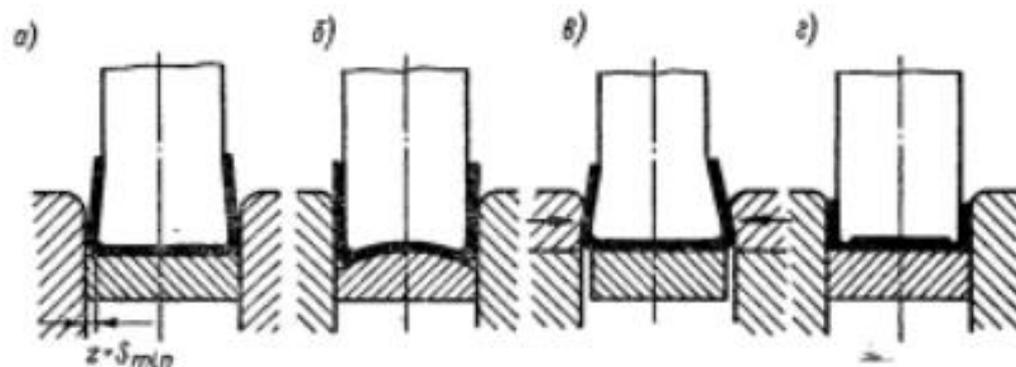


Рисунок 2.18 – Способы компенсации угла пружинения

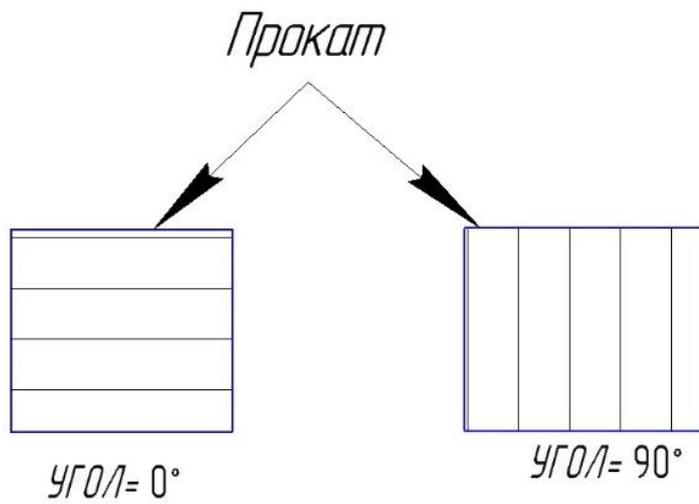


Рисунок 2.19 – Изменение угла проката (анизотропия)

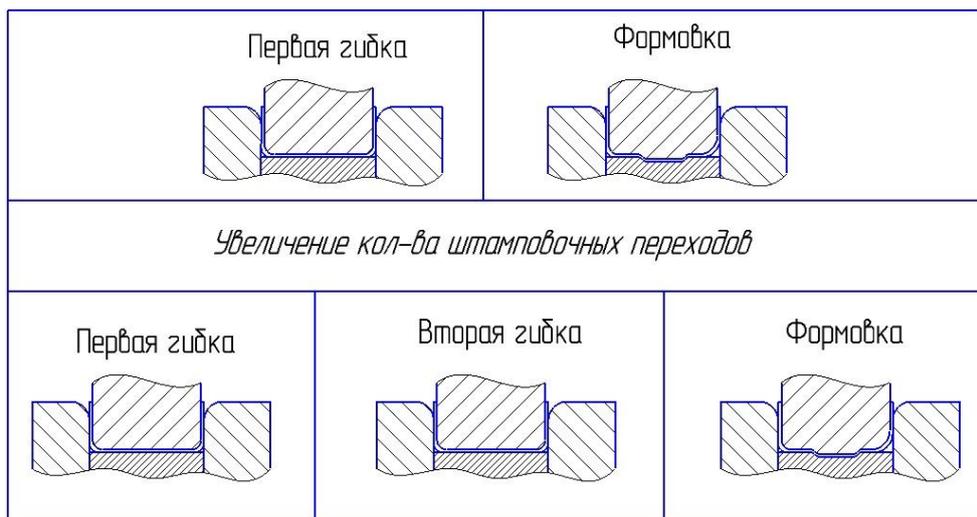


Рисунок 2.20 – Увеличение количества штамповочных переходов.

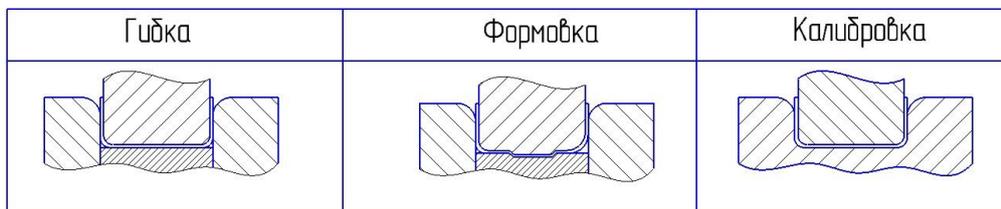


Рисунок 2.21 – Применение калибрующих операций

### **3 Анализ напряженного деформированного состояния заготовки при п-образной гибки**

#### **3.1 Особенности анализа процесса гибки**

Получения точной формы, угловых и линейных размеров при гибке на практике зависит от процесса деформирования материала. Технологические требования к конструкции штампуемых деталей должны соответствовать параметрам и возможностям процессов холодной листовой штамповки. Конструкция детали должна обеспечивать следующие факторы:

- 1) возможность получения спроектированной конструкции с помощью пластической деформации металла;
- 2) возможность производить инструмент с необходимым запасом прочности при массовом производстве;
- 3) возможность избежать применения корректирующих форму операций (калибровка, правка);
- 4) исключение применения сложных геометрических форм, тем самым усложняя стоимость изготовления и эксплуатации штампа и оборудования.

Гибка является одной из распространенных формоизменяющих операций листовой штамповки, сопровождающаяся упругой и пластической деформацией металла. Зоны упругой деформации находятся вблизи срединной поверхности заготовки. Величина упругой зоны напрямую зависит от значений деформации при гибке, т.е. от величины радиуса и угла гибки.

В зависимости от размеров и формы детали, профиля исходной заготовки и характера производства, гибка осуществляется:

- методом свободной гибки в универсальных штампах на специальных гибочных прессах;
- методом гибки в инструментальных штампах на кривошипных, эксцентриковых, фрикционных и гидравлических прессах;

- гибкой-прокаткой на валковых копиравально-гибочных станках;
- гибкой-прокаткой на роликовых станках;
- гибкой с растяжением на специальных обтяжных и профилегибочных станках;
- гибкой на универсально-гибочных автоматах.

По способу приложения внешних нагрузок, процессы гибки подразделяются следующим образом:

- гибка моментом;
- изгиб поперечной силой;
- гибка с приложением торцевого усилия (растяжения или сжатия);
- гибка с радиальным сжатием;
- гибка с аксиальным сжатием (растяжением).

Минимально допустимые радиусы гибки  $R$  применяют только в случаях когда это заложено конструкцией, в силу технологичности или по причине “инструмента”. В большинстве случаев на практике используют  $R \geq s$ , особенно для толстолистовых трудно деформированных сталей.

При гибки П- образных, V-образных деталей можно получить детали, у которых высота полок  $h \geq 2s$ . При гибке твёрдых и трудно деформированных металлов или гибке на малый радиус изгиб желательно располагать поперёк волокон проката и  $R_{\min} = (2 \div 4) s$ . В практике симметричная конструкция гнутых деталей более востребована, так как при несимметричной гибке возможно искажение детали, например коробление или кручение, в силу неоднородности распределения напряженно-деформированного состояния. Для предотвращения этого требуется усложнение штампа, что приводит к его повышенному износу. На рисунке 3.1 представлены основные ограничения при операции гибка.

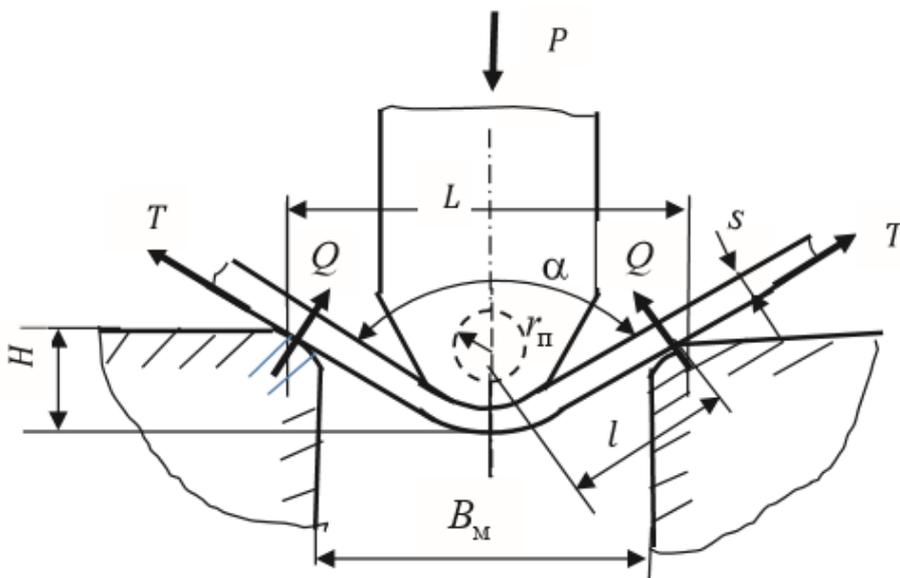


Рисунок 3.1 – Схема свободной U-образной гибки

Основные показатели технологичности гибки:

Для гибочных операций необходимо:

- а) определить размеры полуфабриката (заготовки);
- б) определить количество и последовательность операций в техпроцессе;
- в) рассчитать усилие гибки и выталкивателя детали;
- г) выбрать минимально-допустимые радиусы гибки, исходя из толщины изделия;
- е) рассчитать зазор между инструментами

При разработке технологического процесса изготовления детали с помощью листовой штамповкой, необходимо выбрать наиболее вариант, который будет предоставлять на выходе изделие с минимальными отклонениями формы от заданной и с минимальной стоимостью на изготовление.

**Примечание [ENP1]:** Указать ссылки на литературу

### 3.2 Методы численного анализа напряженно-деформированного состояния.

К основным методам численного анализа напряженно-деформированного состояния можно отнести метод конечных элементов (рисунок 3.2).

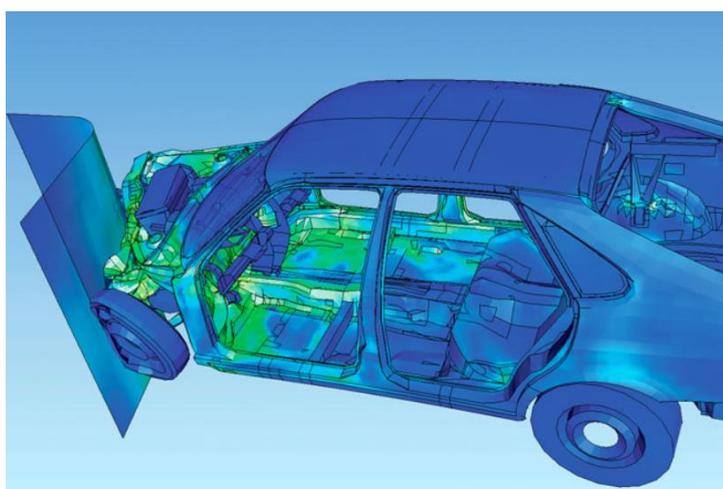


Рисунок 3.2 – Метод конечных элементов для crash тестов легкового автомобиля

Основные этапы МКЭ:

#### 1. Препроцессор.

Он позволяет упростить геометрию, выбрать тип конечных элементов и построить сетку конечных элементов (рисунок 3.3), выбрать модель материала и задать его свойства, определить ограничения и задать нагрузки.

#### 2. Решатель.

Он формирует в зависимости от типа конечных элементов и их сетки систему линейных или нелинейных алгебраических уравнений. Определяет метод их решения и производит вычисления в зависимости от этапов процесса, заданных в препроцессоре.

### 3. Постпроцессор.

Он позволяет осуществить анализ полученных результатов в решателе. Постпроцессор наделен широкими возможностями анализа механики сплошных сред, структурной прочности, теплообмена, гидро и аэромеханики жидких и газообразных объектов и др.

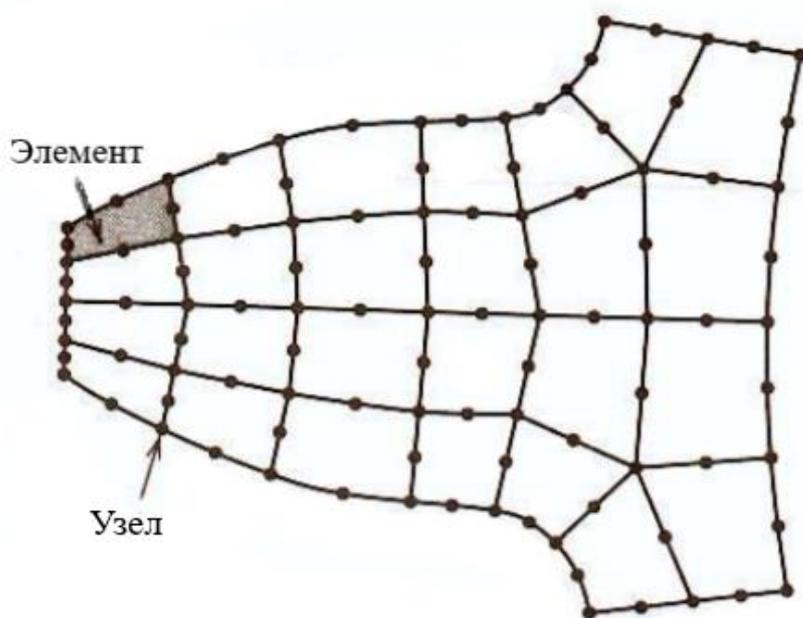


Рисунок 3.3 – Представление элементов и узлов

Метод конечных элементов в листовой штамповке, общепринятый инструмент, который используется в промышленной практике с целью:

1. Определения геометрических дефектов;
2. Расчета количества штамповочных переходов;
3. Оптимизации получения заданной геометрии;
4. Проверки геометрии инструмента;
5. Выбора и назначения материала.

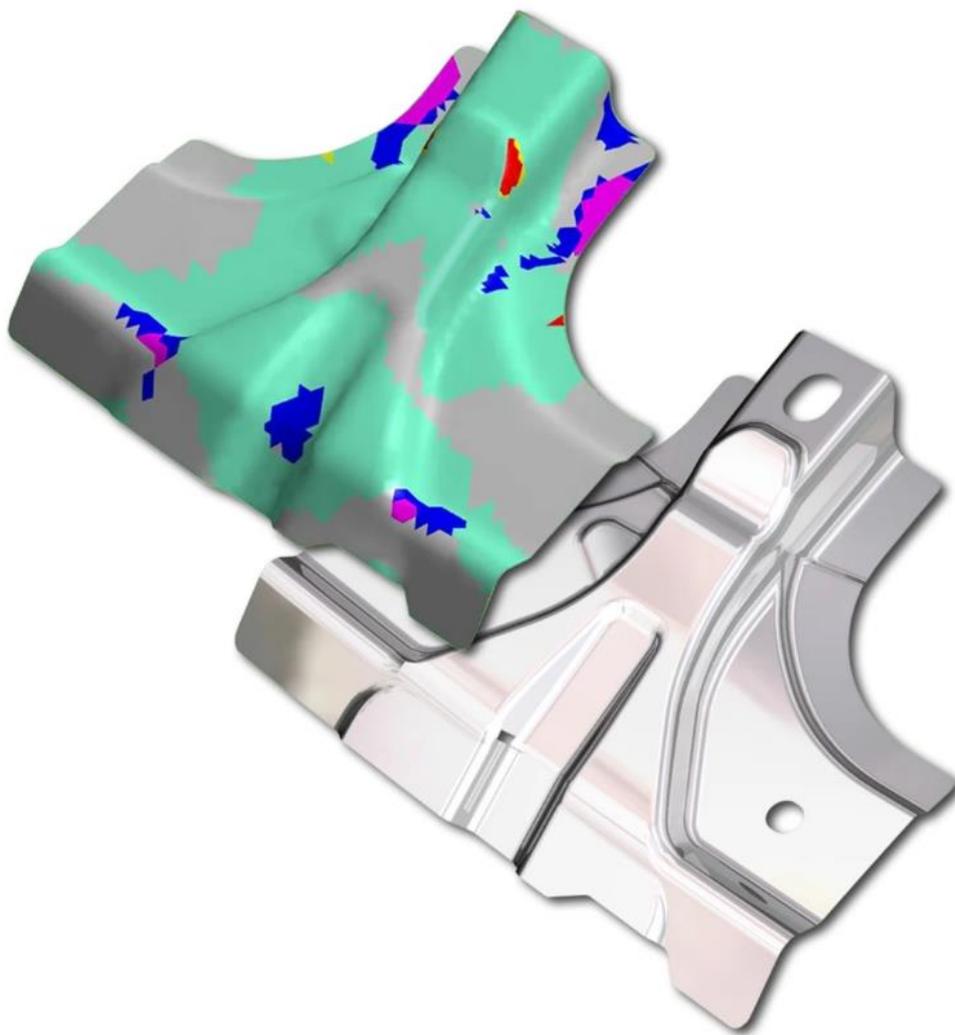


Рисунок 3.4 – Метод конечных элементов в листовой штамповке

Полученные решения с помощью конечных элементов зависят от типа и количества элементов, используемых в численной модели. Обычно в программных продуктах, предназначенных для анализа и моделирования листовой штамповки (Autoform, PamStamp, LS-Dyna и др.), используются адаптивные сетки КЭ для задания заготовки. Т.к. листовой металл деформируется упруго-пластически, то необходимо определять напряжения

и деформации по толщине заготовки. Это вызывает необходимость в оболочечных конечных элементах интегрирования по толщине заготовки и приводит к введению виртуальных слоев и увеличению узлов для представления напряжений и деформаций.

### **3.3 Анализ напряженного состояния в САЕ**

Одной из основных причин для проведения инженерного анализа – это необходимость установить напряженно-деформированное состояние модели. Напряженное состояние описывается тензором напряжений. В случае листовой штамповки этот анализ необходим также, для определения остаточных напряжений после проведения деформации и для вычисления необходимой нагрузки. На практике в листовой штамповке остаточные напряжения после окончания штамповки приводят к ряду проблем, поэтому необходимо выявить их значения, определить области их распределения.

Выбор типа элемента тоже очень важен для точного моделирования с использованием метода конечных элементов. В зависимости от проблемы и геометрии листовой металлической детали и могут быть использованы для различные типы КЭ: пластина, мембранные КЭ, оболочечные КЭ. Из-за вычислительной эффективности, оболочечные элементы чаще всего используются в симуляции деформировании листового металла. Они основываются на различных теориях изгиба, которые подходят для ситуаций, когда толщина материала гораздо меньше по сравнению с другими размерами. Теории предполагают, при изгибе пластины возникает плоское напряженное состояние, и геометрия пластины представлена средней плоскостью. Поскольку, только средняя плоскость пластины описывается элементами, число независимых степеней свободы может быть уменьшено существенно.

В нескольких случаях, для ускорения времени анализа, полноценная 3D симуляция может быть представлена в модели, в которой используются плоские (2D) элементы плоской деформации.

В общем, каждая симуляция феномена пружинения в деформировании листового металла состоит из двух главных шагов: нагрузка (штамповка продукта) и разгрузка (пружинение). Два разных способа могут быть использованы для симуляции разгрузки. Мгновенное освобождение инструмента - метод, который обычно используется в промышленности для его вычислительной эффективности. Кроме того, во время разгрузки можно использовать постепенный отвод инструмента. Этот метод можно рассматривать как обратную формовку, во время которой нагрузки меняются местами, а инструменты постепенно отводятся, это менее популярно, из-за своей стоимости вычисления. Хотя этот метод более реалистичен из-за того, что контактные силы присутствуют на этапе разгрузки, он менее популярен, потому что он является вычислительно дорогостоящим.

Для гарантированно точного прогнозирования феномена пружинения в штамповке листового металла, с использованием анализа конечных элементов, важно минимизировать ошибки моделирования. Это может быть достигнуто, принимая во внимания следующее:

- Точность напряженного состояния в конце деформации может получена, если используется материал модели, наиболее полно описывающий свойства заготовки. Важно, если модель основана на исходных характеристиках текучести и прочности, полученных в результате нескольких испытаний. Модель должна описать поведение материала, подвергающегося произвольной разгрузке. Дополнительно к этому, модель материала должна описать неэластичные эффекты, которые могут возникнуть во время разгрузки и которые могут повлиять на общее значение пружинения и параметры, описывающие контакт заготовки и инструмента. Коэффициент трения может оказать высокое влияние на точность определения пружинения. Модели

способные описать возможные вариации во время деформации предпочтительнее;

- Во время оценивания результатов числового анализа, важно помнить, что имеется несколько типов пружинения в штамповке листового металла. Использование высокой прижимной силы или коэффициента трения уменьшает изгибающее пружинение, но увеличивает неоднородность деформации по толщине заготовки и может повлиять на результат пружинения, что может привести к большим искажениям формы продукта во время разгрузки;
- Постепенная разгрузка предпочтительнее, нежели мгновенного разгрузка. Из-за наличия контактирующих сил, деталь может испытывать дополнительные пластические деформации во время разгрузки.

Для получения более точной картины напряжено-деформированного состояния материала после штамповки, будет использована CAE-модель, в которой материал будет интегрироваться по 7 слоям по толщине, что позволит получить более точное представление и детально построенные эпюры напряжений.

За модель для проведения исследования был взят п-образный профиль, проведена симуляции штамповки (нагрузка и разгрузка). Инженерный анализ был проведен в CAE-программе AutoForm, В этой программе есть возможность экспортировать результаты симуляции, рисунок 3.5. Для этого необходимо выбрать *Menu – Export*, здесь можно указать формат, в который будет переводится модель с напряженно-деформированным состоянием из AutoForm. Был выбран формат *DYNA*. Количество слоев 7. Также заданы следующие результаты симуляции:

1. Толщина
2. Пластическая деформация
3. Тензор напряжений

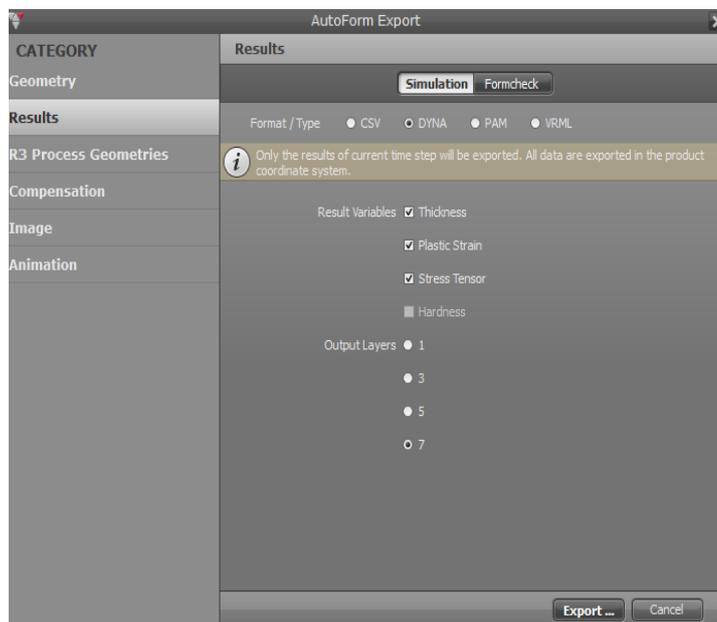
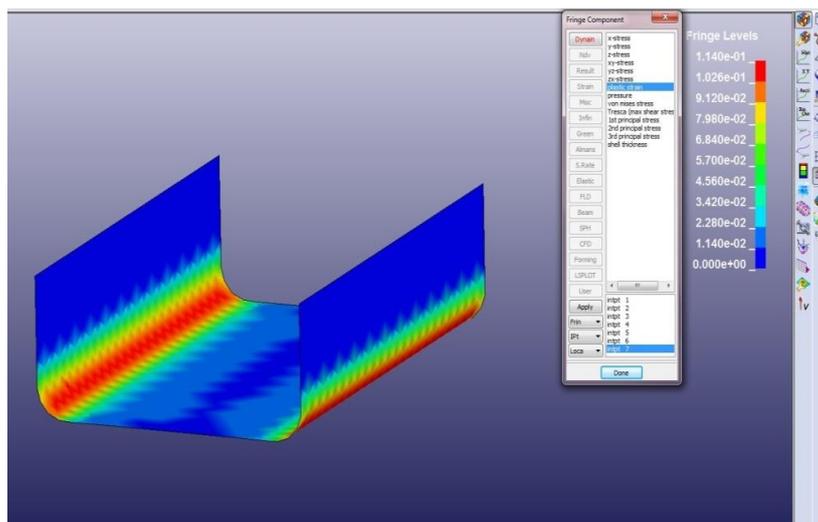


Рисунок 3.5 – Экспорт результатов.

Полученный DYNA-файл был открыт в LS-PrePost, в открытом окне можно увидеть количество слоев интегрирования по толщине для нагруженной модели, рисунок 3.6.





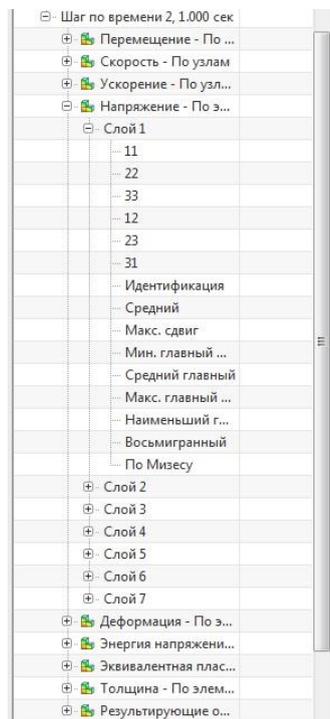


Рисунок 3.8 – Возможные напряжения для отображения по слоям.

Для построения эпюр НДС по 7 слоям вдоль сечения, необходимо создать графики для каждого слоя и наложить их друг на друга. На рисунке 3.10 представлено основное окно для построения графиков, на рисунке 3.11 показано как строится сечение, на рисунке 3.12 продемонстрирован график.

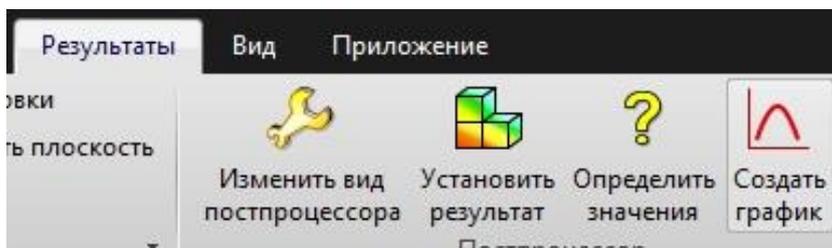


Рисунок 3.9 – Работа с результатами в NX Advanced Simulation.

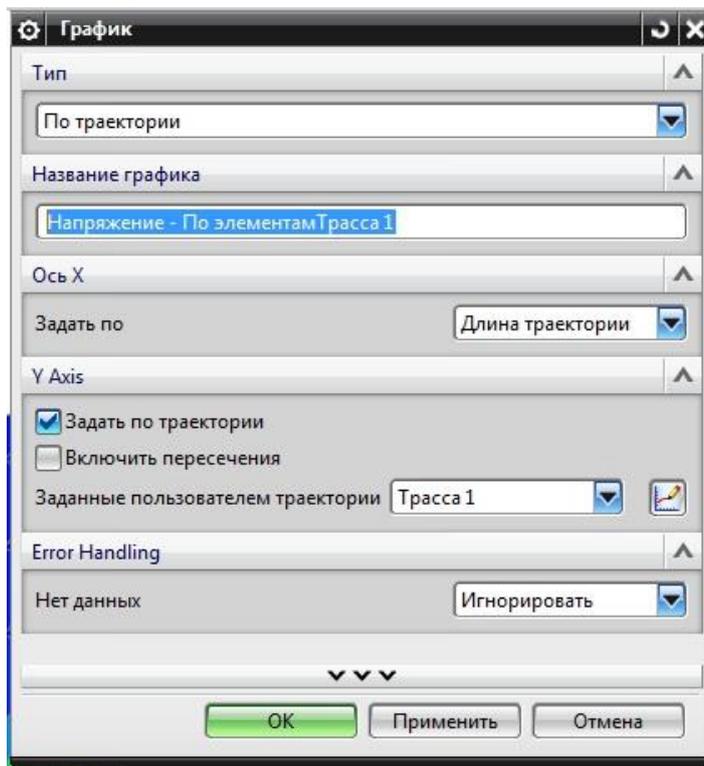


Рисунок 3.10 – Создание графика

Импортированный результат: d3rplot  
 Случай нагружения 1, Шаг по времени 2, 1.000 сек  
 Напряжение - По элементам, По Мизесу, Слой 1 Середина  
 Мин. : 0.001, Макс. : 0.186, Единицы = Н/мм<sup>2</sup>(МПа)  
 Система координат : Собственный  
 Деформация : Перемещение - По узлам Величина

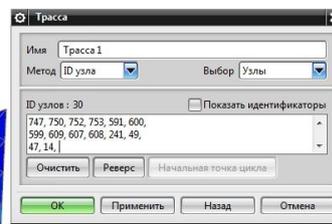
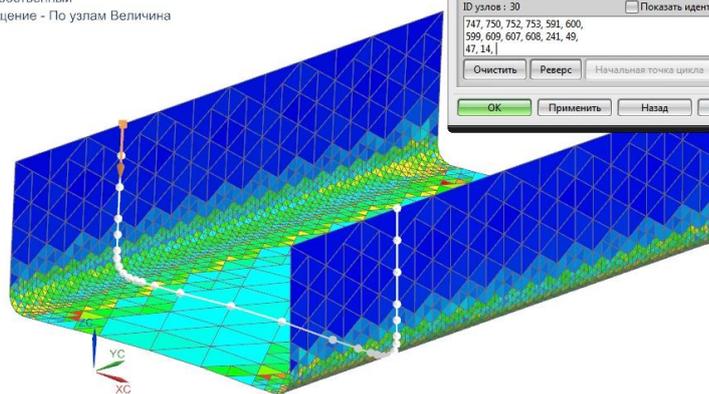
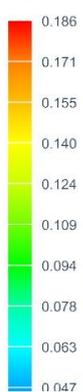


Рисунок 3.11 – Построение сечения

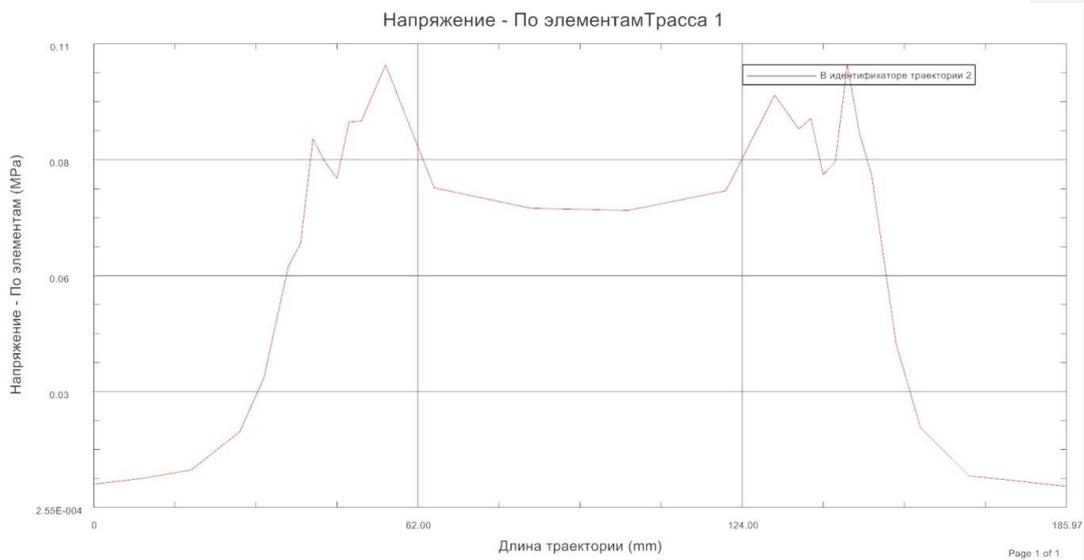


Рисунок 3.12 – График напряжений по Мизесу вдоль сечения.

Выполнив такие же операции для каждого из слоев, можно наложить графики друг на друга, рисунок 3.13. Результат наложения представлен на рисунке 3.14.

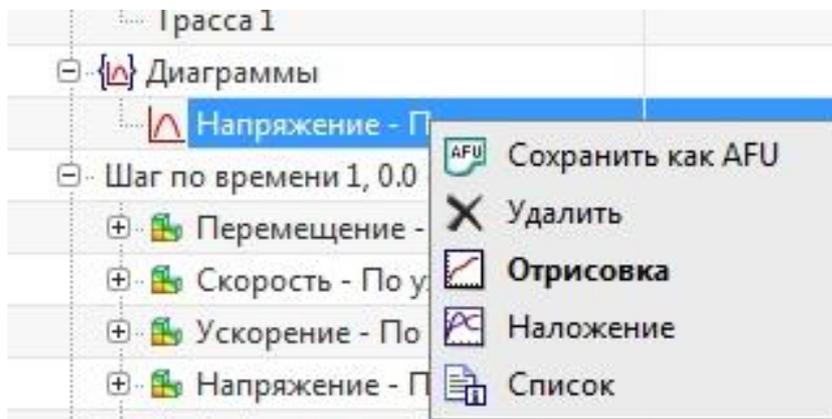


Рисунок 3.13 – Наложение

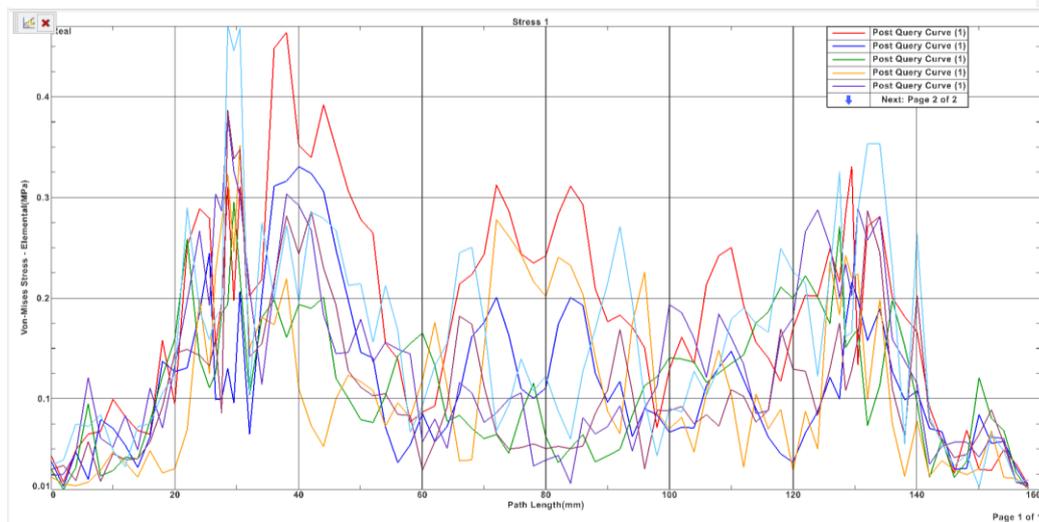


Рисунок 3.14 – Эпюры напряженного состояния

### 3.4 Анализ деформированного состояния в САЕ

Влияние упругой деформации на геометрию, свойства и структуру тела в процессе деформирования малы, и обычно не учитываются при анализе полученных данных.

Пластическая (остаточная) деформация после снятия всех внешних сил, связана с перемещением атомов внутри деформируемого тела на относительно большие расстояния и они вызывают остаточные изменения формы и структуры.

В AutoForm после проведения симуляции программа автоматически строит диаграмму предельных формоизменений (FLD) – метод, позволяющий предсказать разрушения листового материала при штамповке, рисунок 3.15.

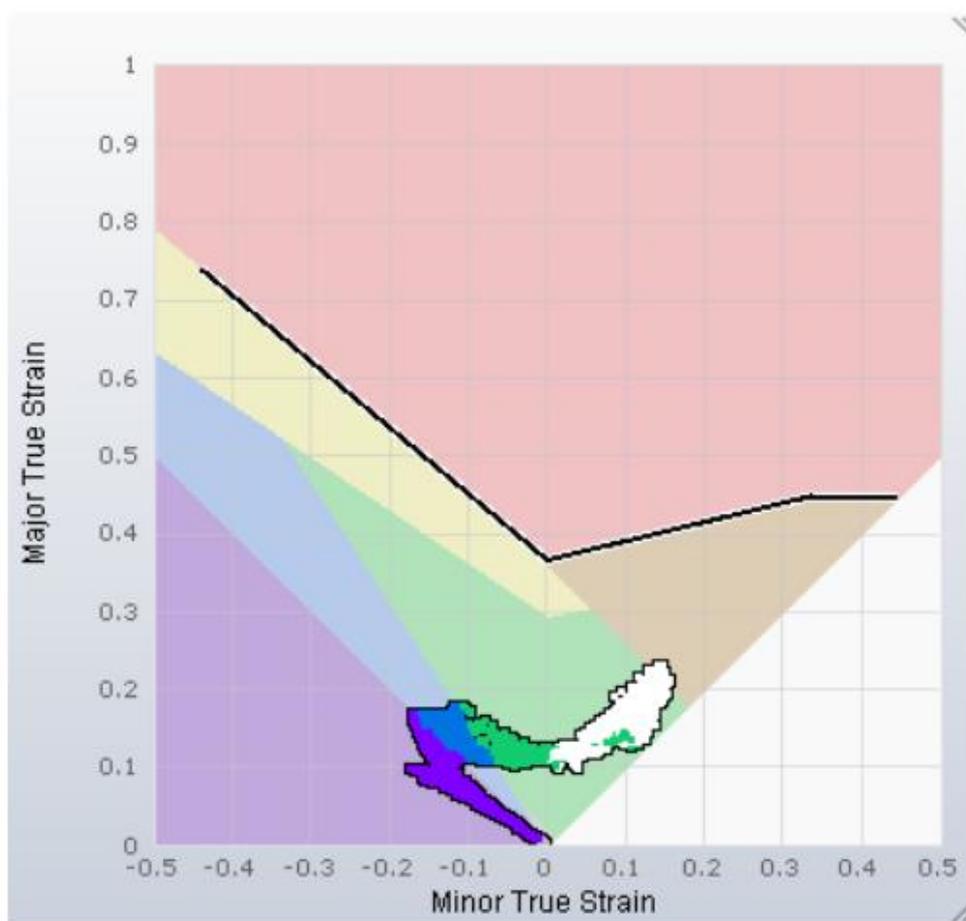


Рисунок 3.15 – FLD-диаграмма.

Для каждого материала FLD-диаграмма имеет свой вид, на рисунке 3.16 показан пример с описанием цветных зон диаграммы. Диаграмма разделяется на зоны, сочетание главных деформаций в которых прогнозирует тот или иной дефект. Как видно на рисунке по вертикальной оси откладываются наибольшие главные деформации, на горизонтальной оси – наименьшие главные деформации. Полученная кривая называется кривой предельного формоизменения.

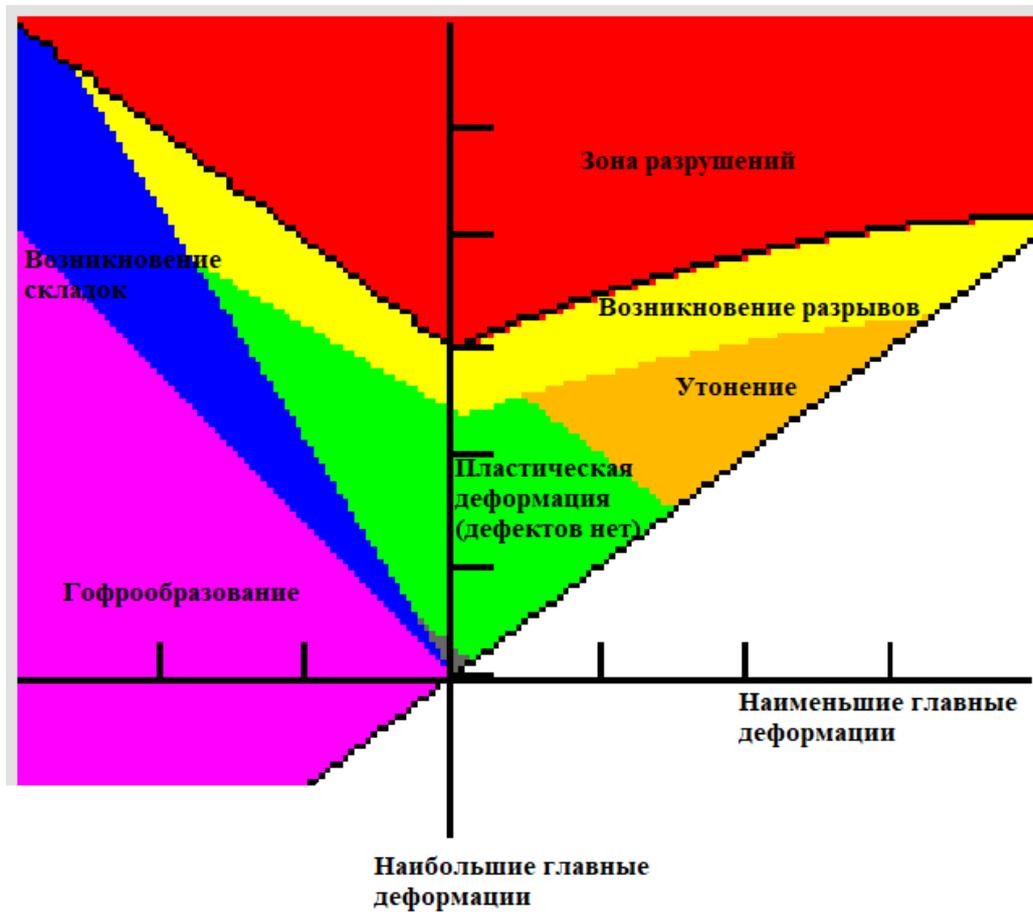


Рисунок 3.16 – Описание зон FLD-диаграммы

Наибольшие главные деформации показывают наибольшие значения главных логарифмических деформаций.

Наименьшие главные деформации показывают наименьшие значения главных логарифмических деформаций.

Положительное значение деформации подразумевает растяжение материала, в то время как отрицательное значение указывает на вероятность образования складок. Для устойчивой пластической деформации без гофрообразования незначительное напряжение должно иметь положительное значение.

Интенсивность пластической деформации представляет накопленную (эквивалентную) пластическую деформацию материала.

**Выводы:**

1. Разработана методика определения напряженно-деформированного состояния по толщине изделия.
2. Построена эпюра НДС по толщине.
3. Проанализирована структура FLD-диаграммы.

## **4 Моделирование в САПР технологии гибки лонжеронов и анализ точности их изготовления**

### **4.1 Моделирование штамповки и анализ точности лонжерона при свободной гибки**

Прежде чем приступить к моделированию штамповки в САЕ-системе, необходимо разработать модель лонжерона. Модель – набор признаков определяющих реальное изделие, которые учитывают наиболее важные и главные свойства этого изделия. Для выявления механизмов пружинения упростим модель лонжерона до П-образного профиля, сохраняя лишь габаритные и размеры. В любом сечении смоделированного ранее лонжерона, будет наблюдаться П-образный профиль, за исключением нескольких частей. Для упрощения симуляции и демонстрации действующих формоизменяющих сил на изделие при штамповке, будет использован штамп без прижима. В таблице 2 приведены основные параметры моделирования.

Таблица 2 – Геометрические размеры модели

Параметр	Значение (критерий)
Габариты (Д×Ш×В)	150 × 100 × 45 мм
Радиус	8 мм
Типа штамповки	Свободная, без применения прижима
Толщина материала	2 мм
Материал	DP590 (HCT450X)

Проводить моделирование будем в программном продукте AutoForm R7, поскольку он обладает необходимой базой материалов и является популярным программным продуктом в автомобилестроении.

Стартовое окно AutoForm выглядит, как показано на рисунке 4.1.

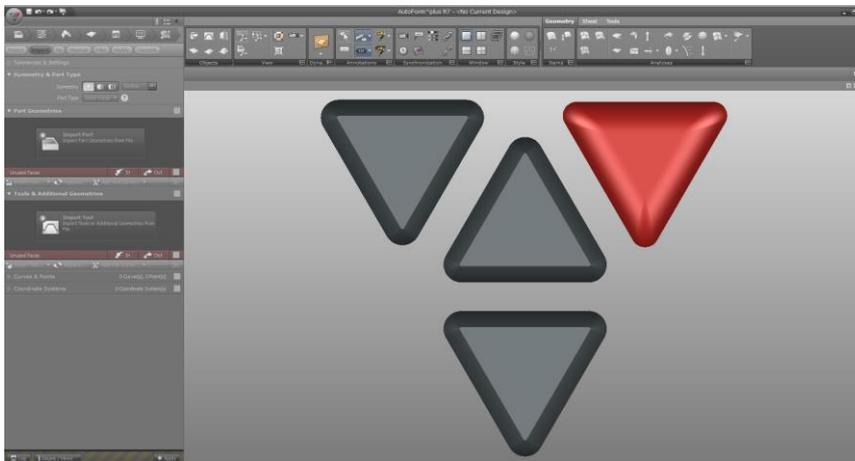


Рисунок 4.1 – AutoForm

Меню препроцессора, решателя и постпроцессора находится в левой части окна и наверху в панели инструментов

Вначале загружается модель детали, геометрия инструментов (Рисунок 4.2) , участвующих в симуляции, а также вспомогательные кривые и точки, например, для межоперационной обрезки или задания фиксаторов и ловителей по координатам.

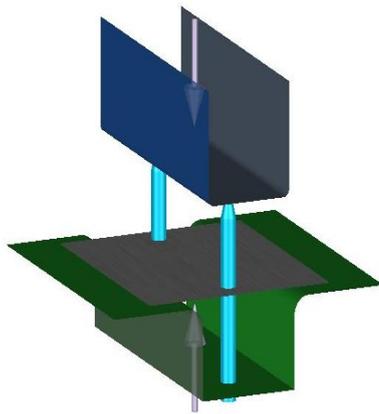


Рисунок 4.2 – Загруженная геометрия инструментов

Следующим шагом будет ориентирование геометрии инструментов и заготовки в пространстве, задание базы координат симуляции. Это необходимо, чтобы движение инструментов и деформация были направлены по нормали, избегая возникновения поднутрений, которые могут привести к разрыву материала в этом месте.

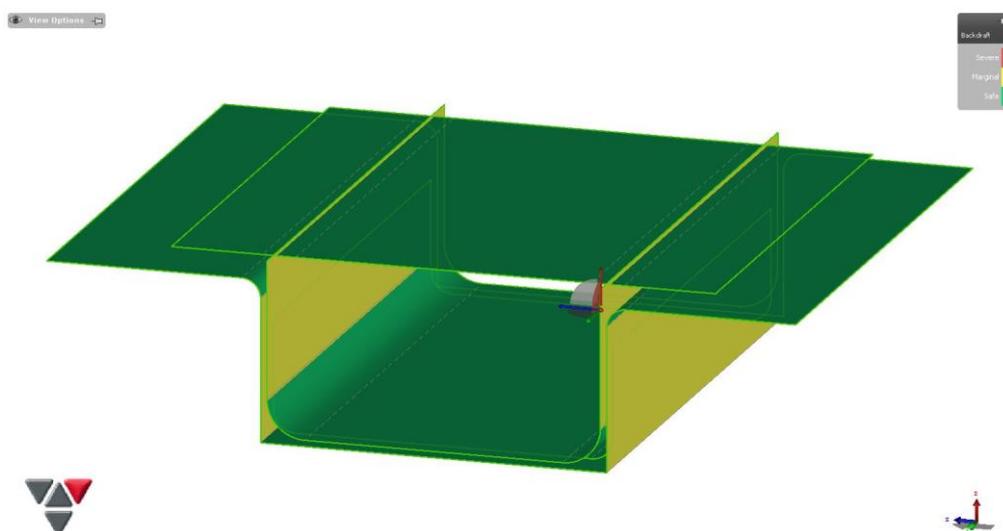


Рисунок 4.3 – Ориентирование модели в пространстве

Далее производится задание материала и его толщины. Был выбран материал НСТ450Х, который является аналогом стали DP450, с пределом текучести 260-340 Мпа, временным сопротивлением разрыву 450 Мпа и относительным удлинением  $> 27\%$ .

Также на этом этапе задается толщина используемого материала. Это значение было взято из таблицы 2 – Геометрические размеры модели.

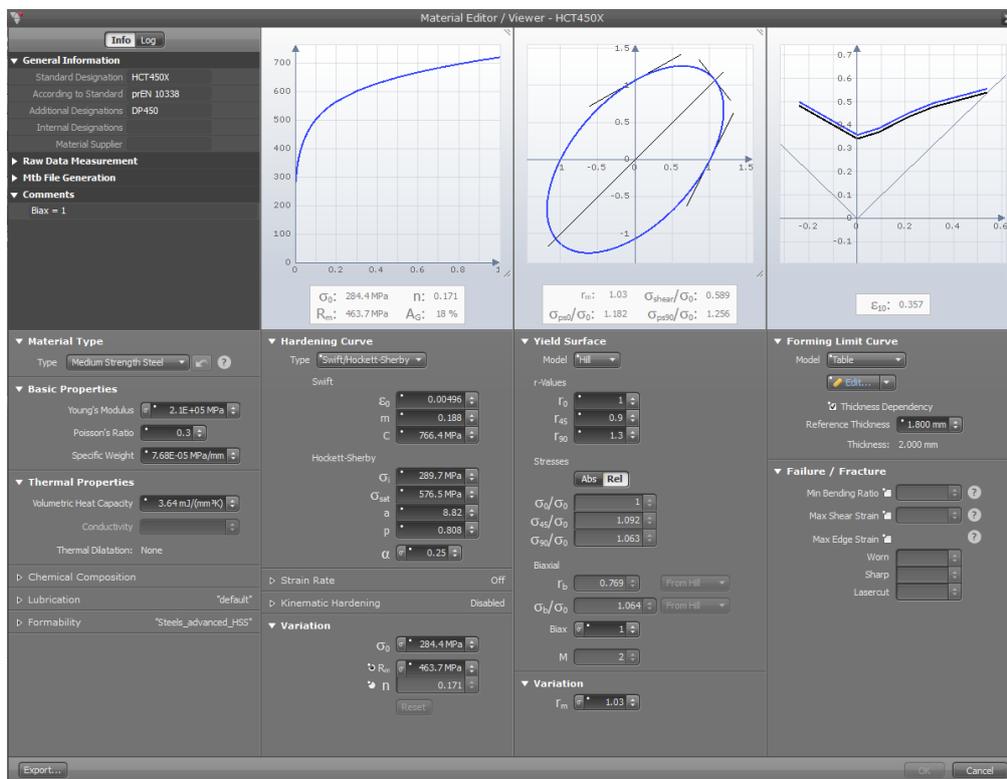


Рисунок 4.4 – Материал HCT450X

Следующий шаг, создание плана. План – технологический процесс, который будет применяться в симуляции. Поскольку процесс П-образной гибки осуществляется без прижима, выберем иконку свободной формовки. Для получения необходимых результатов, необходимо добавить в план симуляции функцию “Measuring Equipment” – оборудование для измерений. Данная функция позволяет наблюдать изменения сил и напряжений внутри модели, а также изменение геометрии после снятия всех внешних нагрузок. На рисунке 4.5 изображен план симуляции, где:

- С-20 – Формообразующая операция, свободная формовка.
- М-30 – Инструмент для измерения деформированного полуфабриката



Рисунок 4.5 – План симуляции.

После того, как определен план операций, нужно задать заготовку. В AutoForm, возможно задавать симметричную заготовку, выбирать ее геометрию из уже загруженных моделей поверхностей инструментов, детали или из ранее загруженной, геометрии заготовки. Также есть возможность изменять ориентацию заготовки в пространстве, задавать любой угол проката, и производить изменения геометрии, например, после получения первых результатов симуляции, если потребуется редактирование заготовки, рисунок 4.6.

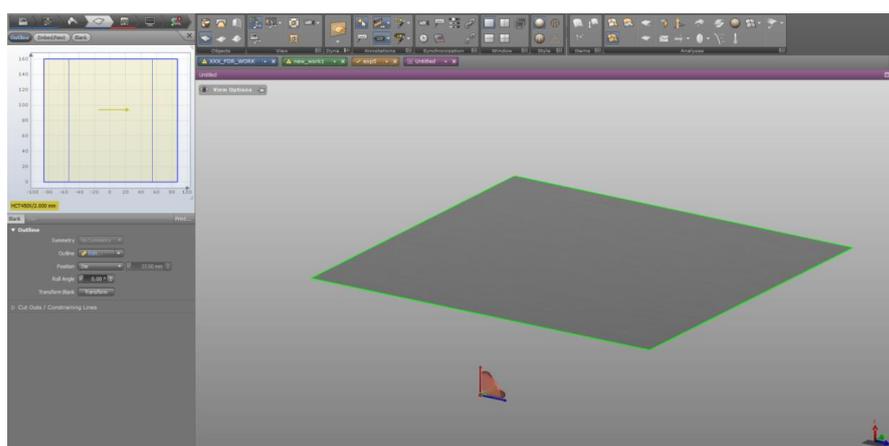


Рисунок 4.6 – Задание геометрии и свойств заготовки.

После того, как определена геометрия и положение заготовки, во вкладке “Процесс”, переходим к заданию рабочих инструментов, пуансона и матрицы, рисунок 4.7. Здесь задаются все параметры для ранее созданных операций. Также во вкладке *Pilots/Spacers* (Ловители/фиксаторы), можно определить положение ловителей, для точного ориентирования заготовки в штампе, рисунок 4.8.

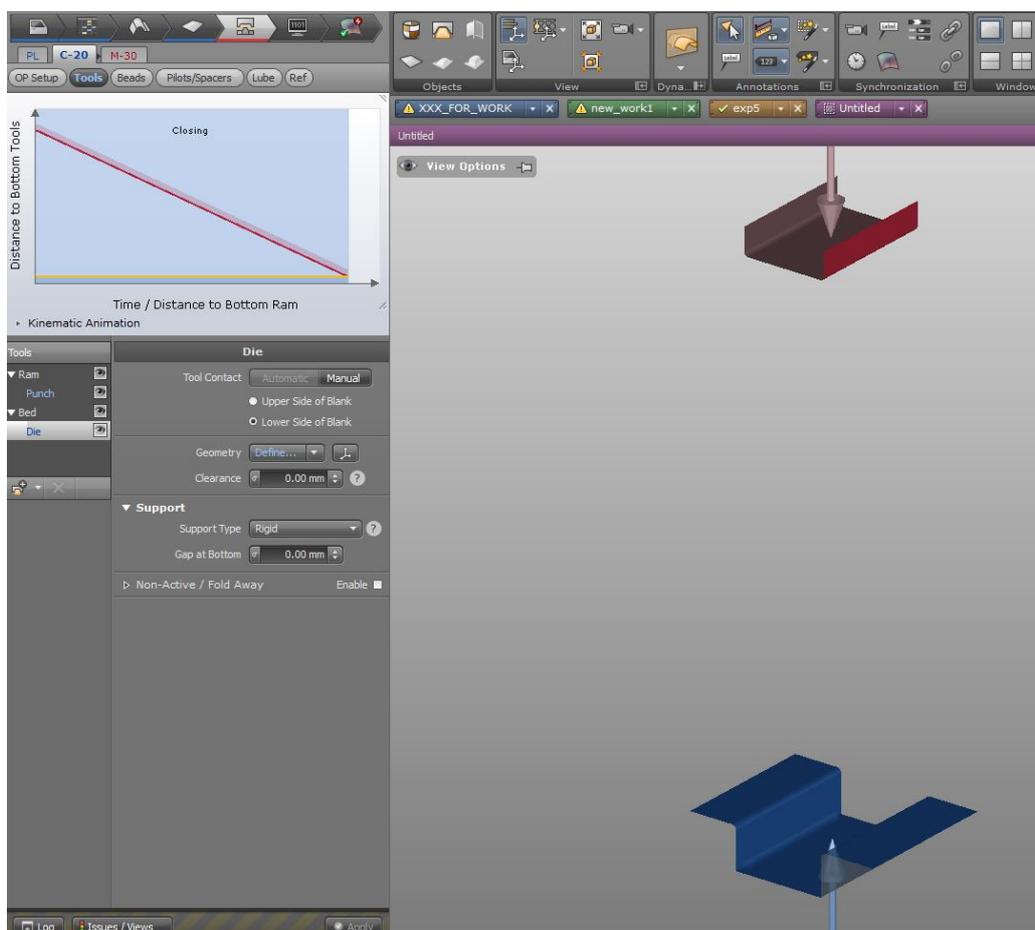


Рисунок 4.7 – Рабочие инструменты симуляции

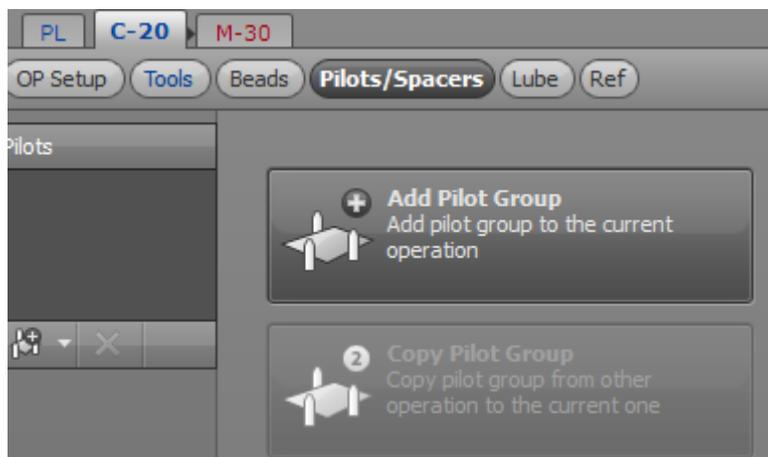


Рисунок 4.8 – Создание ловителей

После того, как заданы все параметры для формообразующей операции (рисунок 4.9), производится выбор параметров операции М-30. В этой вкладке необходимо выбрать из 4 существующих измерений, необходимое. В данном случае, случае для свободной гибки, необходимо определить геометрию изделия после разгрузки, выбираем Free Springback – свободное пружинение.



Рисунок 4.9 – Свободное пружинение.

После того, как мы задали все нужные параметры расчета, переходим к этапу выбора параметров расчета и выбора нужных результатов, рисунок 4.10. На первом рисунке необходимо выбрать Engineering Phase (Инженерный этап). Здесь есть выбор между 2:

- CE – оценка концепта
- FV – финальная валидация

Одним из основных различий, является интегрирование по слоям. На этапе концепта, необходимо определить возможность данной формообразующей операции, поэтому и интегрирование проводят по 3 слоям. Меньше слоев, быстрее расчет, тем раньше будет выявлена ошибка.

На финальной стадии валидации, необходимо тщательнее изучить процессы гибки и разгрузки, протекающие во время симуляции. Здесь уже интегрирование происходит по не менее чем 7 слоям.

На рисунке 4.11 происходит выбор результатов для расчета, здесь важным будет изменить количество результирующих слоев.

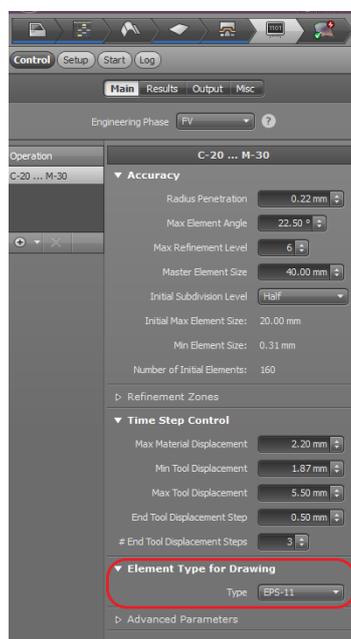


Рисунок 4.10 – Настройки типа элемента, точности расчета и контроля по времени

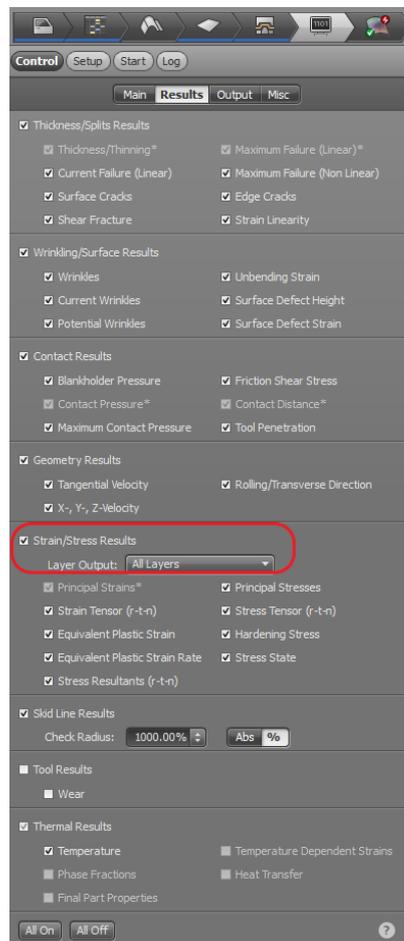


Рисунок 4.11 – Окно выбора результатов расчета.

На данном этапе, все настройки симуляции окончены, переходим к этапу начала расчета, рисунок 4.12. Как видно из этого рисунка, все вкладки синие, а это означает, что данные введены корректно.

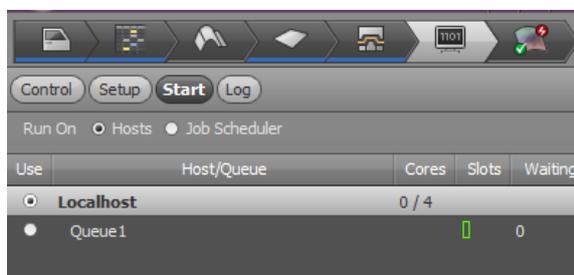


Рисунок 4.12 – Начало расчета

По результатам моделирования свободной гибки можно сделать следующие выводы:

1. Наибольшие главные напряжения на внутреннем слое имеет отрицательное значение, рисунок 4.13, а на внешнем положительные, рисунок 4.14.

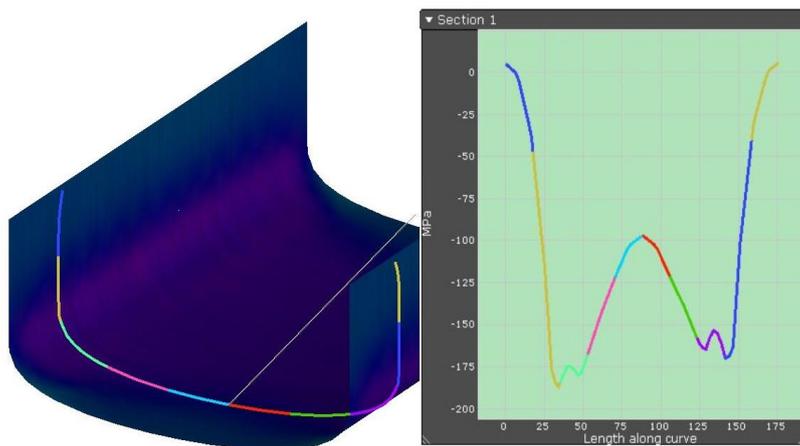


Рисунок 4.13 – Наибольшие главные напряжения на внутреннем слое во время деформации

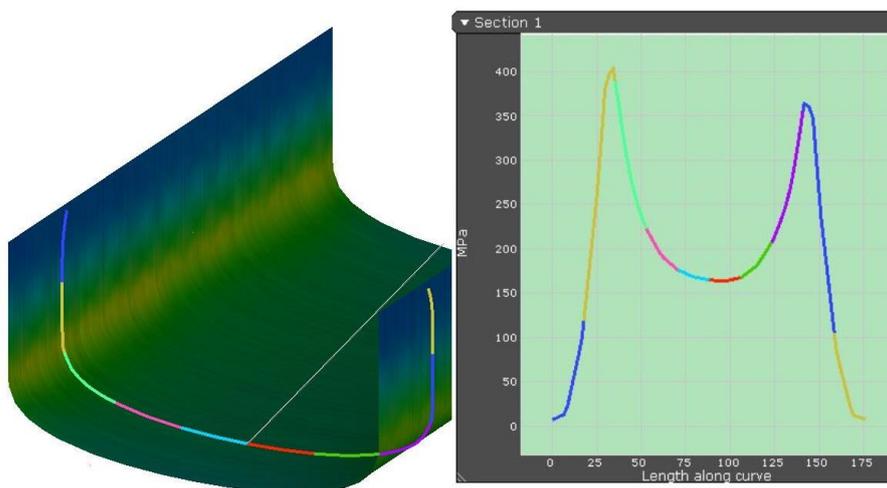


Рисунок 4.14 – Наибольшие главные напряжения на внешнем слое во время деформации.

2. Наибольшие главные напряжения в закрытом штампе на внутреннем слое (рисунок 4.15), меняют свой знак на противоположный, кроме закруглений, а на внешнем слое (рисунок 4.16) изменяется знак везде, кроме около радиусных зон.

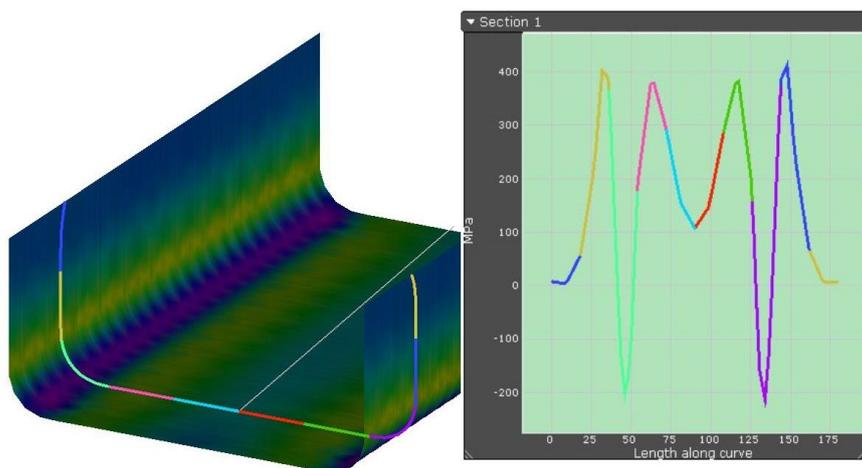


Рисунок 4.15 – Наибольшие главные напряжения на внутреннем слое в закрытом штампе

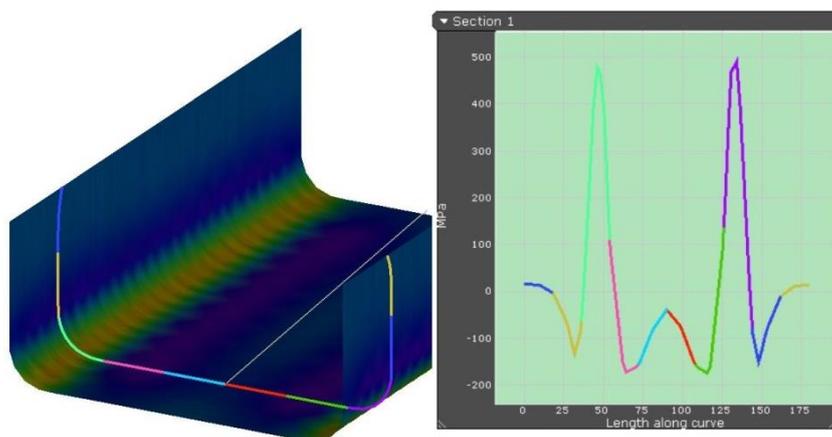


Рисунок 4.16 – Наибольшие главные напряжения на внешнем слое в закрытом штампе.

3. Наибольшие главные напряжения, после разгрузки, изображены соответственно на рисунках 4.17 на внутреннем слое, 4.18 на внешнем слое, 4.19 по средней плоскости. Из рисунков видно, что эпюра остаточных напряжений по всем слоя неоднородна, что отрицательно скажется на конечной геометрии изделия. Также наличие остаточных напряжений на нижней полке приведет к короблению металла после разгрузки, это явно будет видно на эпюре пружинения.

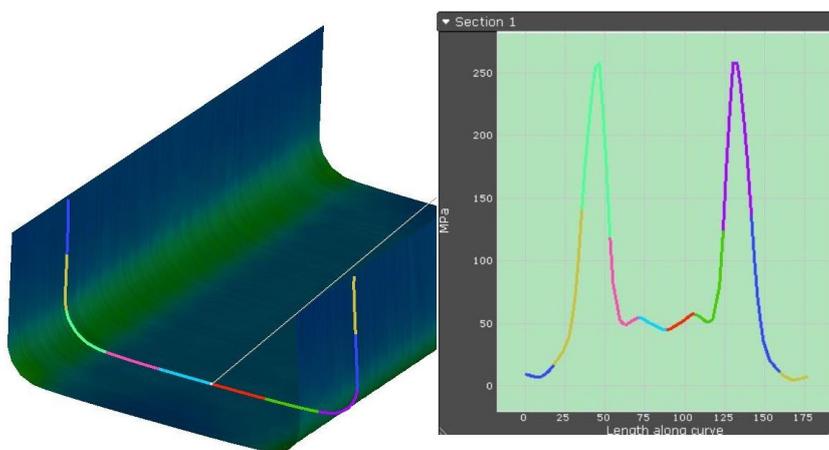


Рисунок 4.17 – Наибольшие главные напряжения на внутреннем слое после разгрузки

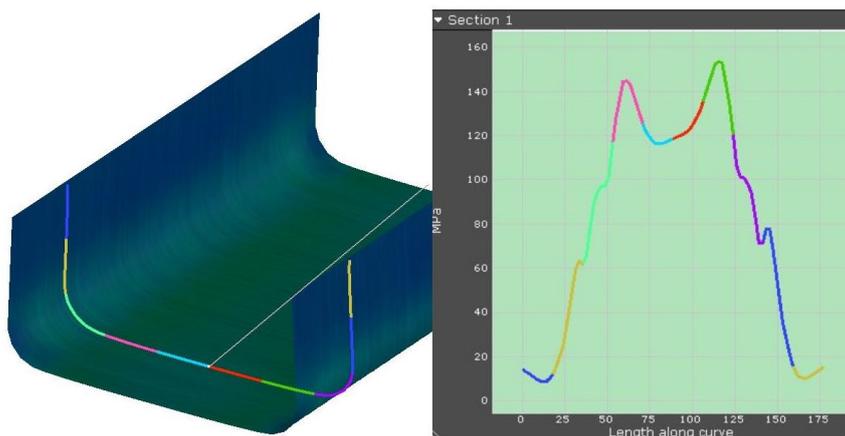


Рисунок 4.18 – Наибольшие главные напряжения на внешнем слое после разгрузки

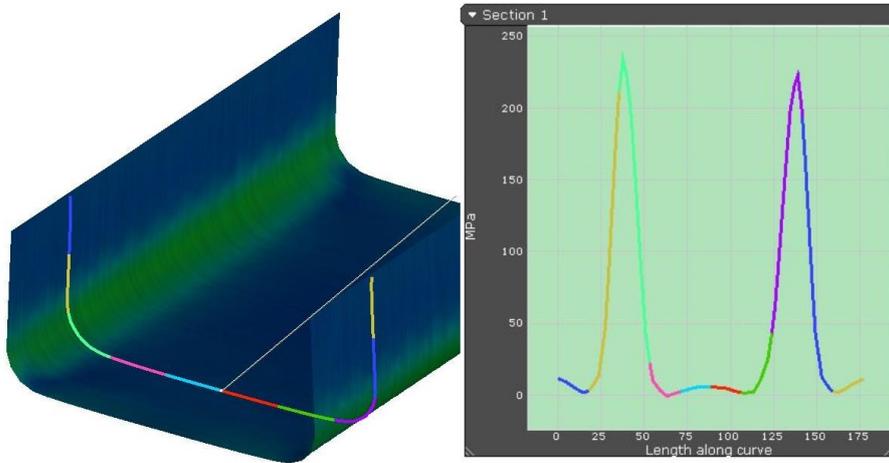


Рисунок 4.19 – Наибольшие главные напряжения по средней плоскости после разгрузки

4. Как результат всех трех выше упомянутых выводов, получаем следующие значения:

1. Значение пружинения, рисунок 4.20. Как видно из рисунка значения пружинения на нижней полке в местах около радиусов имеют критические значения, что было доказано в пункте 3.

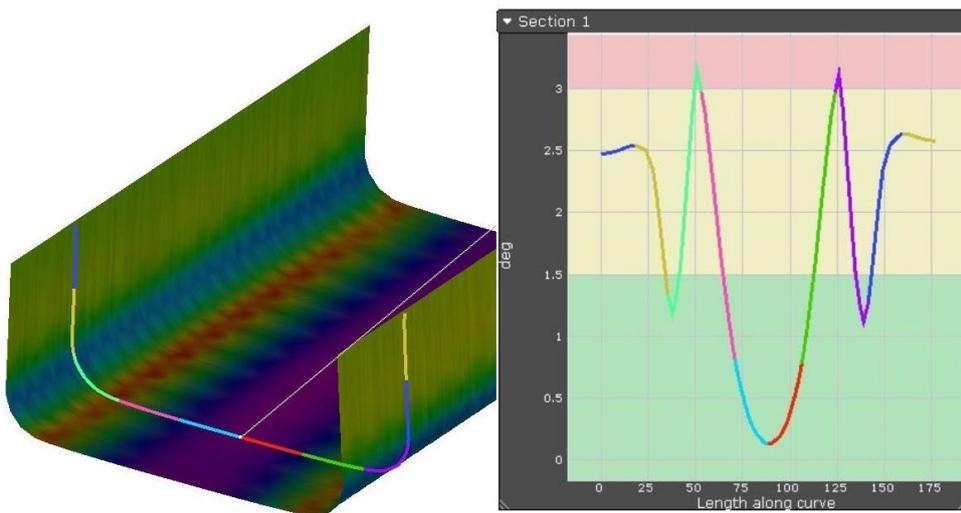


Рисунок 4.20 – Пружинение

2. Поперечный изгибающий момент – показывает влияние кривизны в поперечном направлении на нижней полке, который остался даже после снятия нагрузки. Это приведет к искажению плоской поверхности нижней полки, поэтому ее форма будет отличаться от заданной при проектировании.

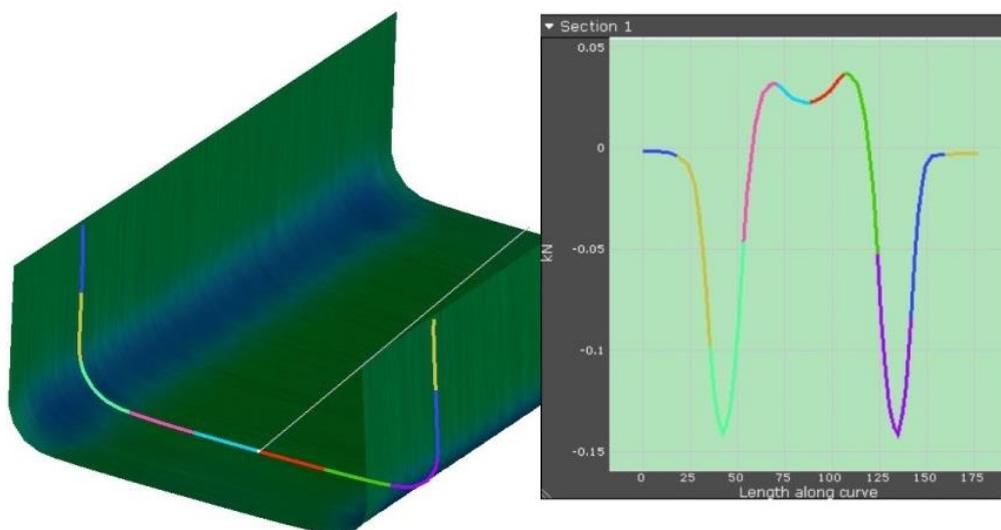


Рисунок 4.21 – Поперечный изгибающий момент после разгрузки.

По результатам проведенного моделирования предлагается использовать в штампе схему с применением выталкивателя, чтобы минимизировать остаточные напряжения на нижней полке.

#### 4.2 Моделирование штамповки и анализ точности лонжерона при гибки с выталкивателем

В этом подразделе единственным изменением параметров симуляции, относительно моделирования штамповки при свободной гибке, является включение в модель симуляции выталкивателя

(рисунок 4.23) (матрица скрыта, движение выталкивателя задано желтой стрелкой). Как видно из рисунка, нижняя полка прижимается к плите выталкивателя, поэтому изгиб нижней полки во время пластической деформации в сторону, обратную основному движению инструмента, исключается.

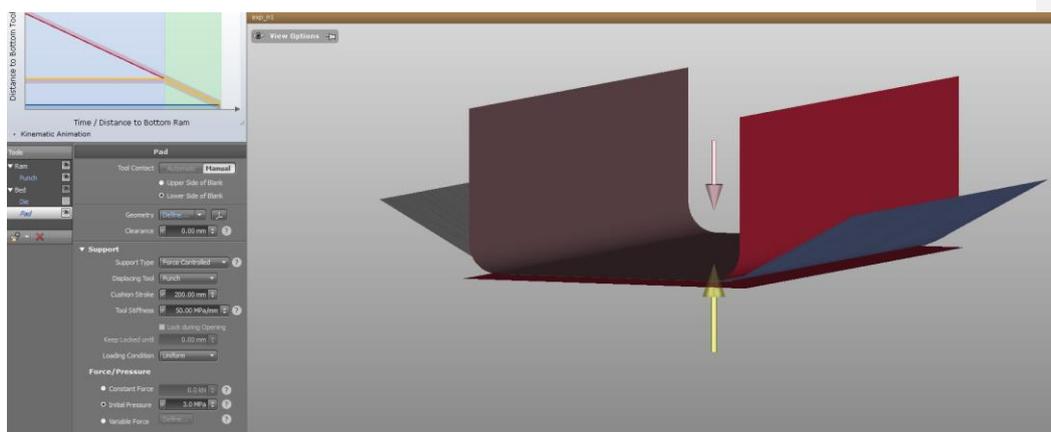


Рисунок 4.23 - Выталкиватель

После моделирования были получены следующие результаты:

1. Значения наибольших главных напряжений на внутреннем слое, показаны на рисунке 4.24, на внешнем слое, рисунок 4.25, по средней плоскости рисунок 4.26. Как видно из рисунков, значения остаточных напряжений по всем слоям равнозначны, имеют приблизительно равные значения.

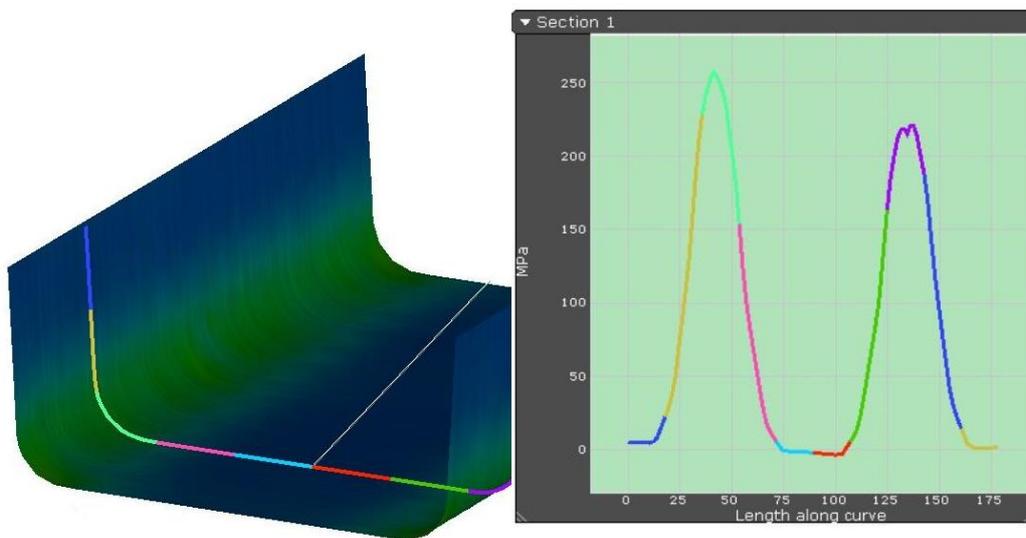


Рисунок 4.24 – Наибольшие главные напряжения на внутреннем слое после разгрузки

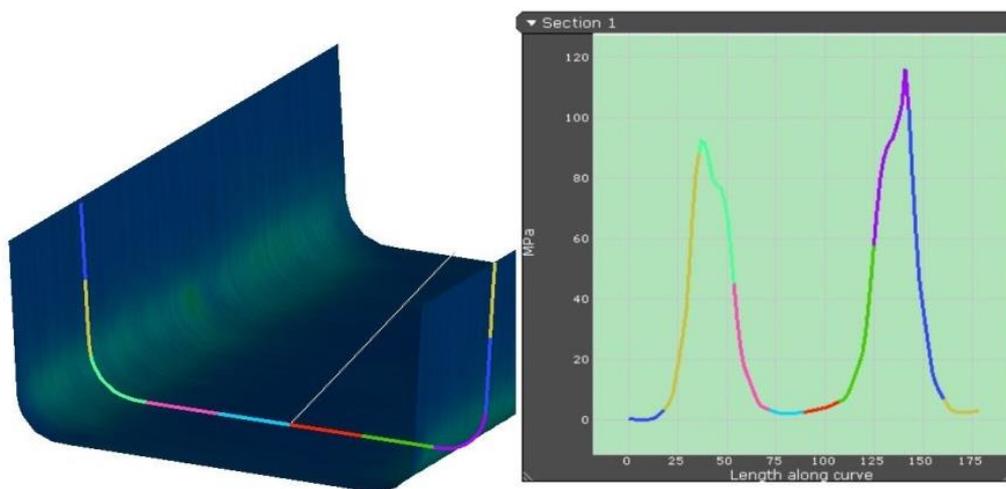


Рисунок 4.25 – Наибольшие главные напряжения на внешнем слое после разгрузки

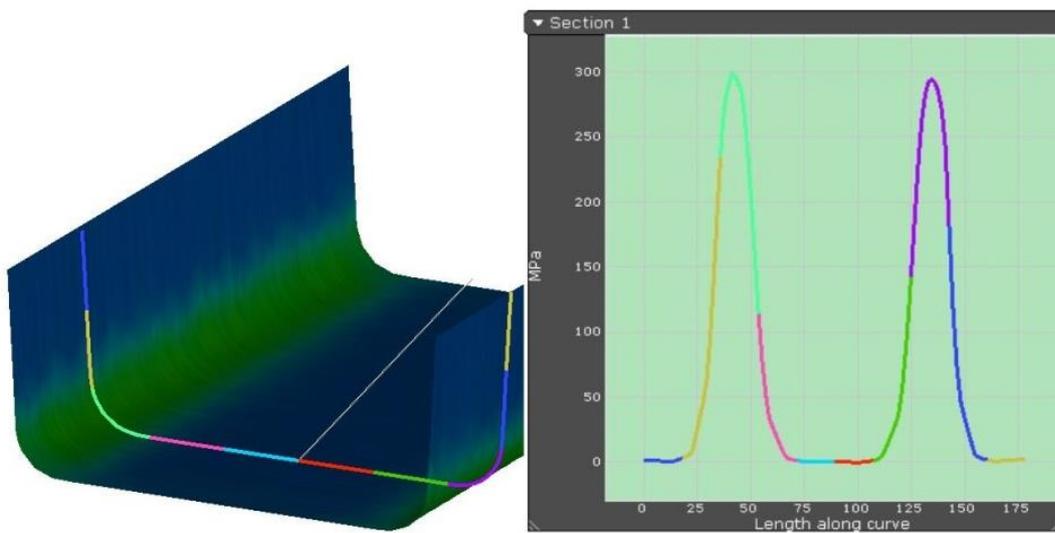


Рисунок 4.26 – Наибольшие главные напряжения по средней плоскости после разгрузки

2. Значения изгибающего момента после разгрузки на нижней полке приближены к нулю, а значит, плоскостность в данном месте будет близка к форме заданной конструктором (рисунок 4.27).

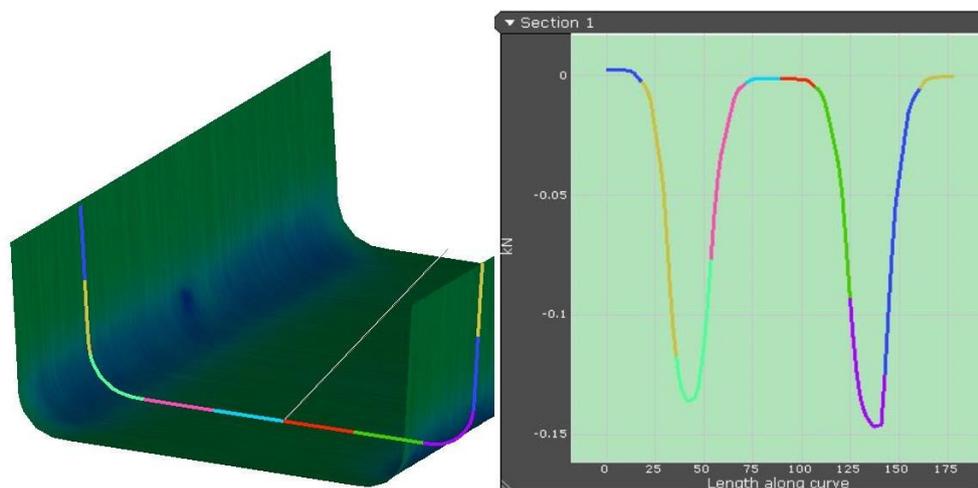


Рисунок 4.27 – Значения поперечно изгибающего момента после разгрузки.

3. Значения углового пружинения на нижней полке равны нулю, уменьшилось угловое пружинение на боковых полках.

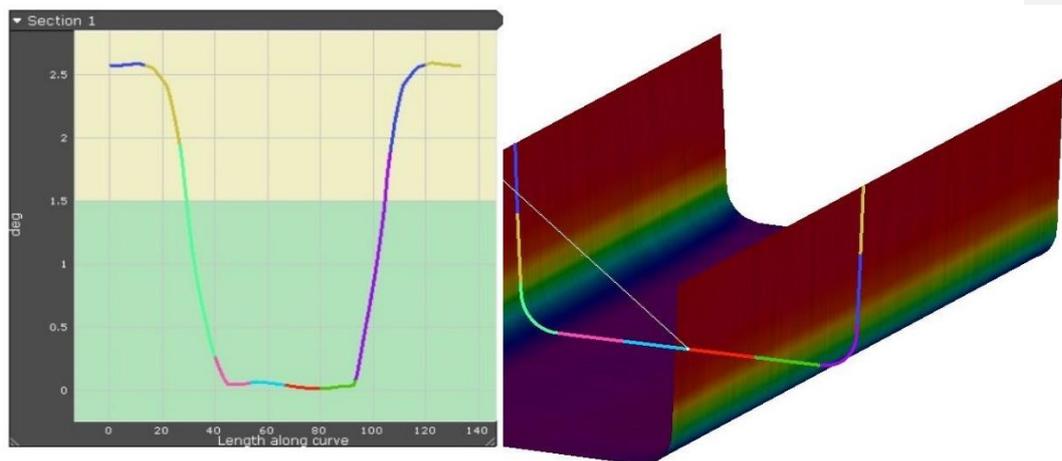


Рисунок 4.28 – Показания углового пружинения, с применением выталкивателя.

Схема технологического процесса, с применением выталкивателя нижней полки требует оптимизации технологических параметров. На данный момент можно сделать следующий вывод:

1. Анализ полей напряжений показал, что отклонение геометрии лонжерона связано с проявлением отрицательных и положительных напряжений на внешних и внутренних слоях, которые приводят к появлению изгибающего момента и изменению формы изделия от ожидаемой.

### **4.3 Моделирование процесса гибки и анализ точности штамповки методом планируемого эксперимента**

#### **4.3.1 Построение функции отклика для планируемого эксперимента без выталкивателя**

Инженеру в процессе своей деятельности неоднократно приходится проводить измерения различных параметров и даже проводить исследования зависимости некоторой величины (функции отклика) от какого-то параметра (фактора). Поэтому планирование эксперимента, выбор методики, приборов и обработка результатов измерений является необходимой составляющей деятельности инженера.

Детальный анализ сложной ситуации в процессах машиностроения и аппаратах представляет собой трудную задачу. Исследователи прибегают к некоторой формализации представлений об объекте, к упрощениям, иначе говоря, к моделированию. Моделирование – это метод изучения объектов, систем, при котором вместо интересующего оригинала используется эксперимент на модели, а результаты количественно переносятся на оригинал. Модель служит средством, помогающим в объяснении, понимании или совершенствовании объектов и систем. Модель может быть или точной копией этого объекта (хотя и выполненной из другого материала и в другом масштабе), или отображать некоторые характерные свойства объекта в абстрактной форме. Модель приближительна, эскизна и может уточняться. К процессу моделирования предъявляют два основных требования:

1. Эксперимент на модели должен быть, проще, быстрее, экономичнее, безопаснее.

2. Исследователю должно быть известно правило, по которому проводится расчет параметров оригинала на основе испытания модели. Без этого даже самое лучшее исследование окажется бесполезным.

Основной целью проведения современного эксперимента с позиций производителя продукции является разработка математической модели, адекватно описывающей процесс и позволяющей, в конечном результате, осуществлять его управление. При планировании эксперимента исследователь должен: 1) обеспечить надежность и четкость интерпретации результатов исследований; 2) составить четкую и последовательную логическую схему построения всего процесса исследования: что, когда и как нужно делать; 3) максимально формализовать процесс разработки модели и сопоставления экспериментальных данных различных опытов одного и того же объекта исследований с целью широкого применения ЭВМ

Всем перечисленным требованиям отвечают статистические методы планирования эксперимента. При применении статистических методов планирования эксперимента математическое описание представляется в виде полинома, где  $Y$  — функция отклика, а  $x_1, x_2, \dots, x_k$  — факторы (аргументы) исследуемого процесса. План эксперимента в этом случае определяет расположение экспериментальных точек в  $k$ -мерном факторном пространстве. Обычно план задается в виде матрицы планирования, каждая строка которой определяет условия опыта, а каждый столбец — значения контролируемых и управляемых параметров в исследуемом процессе, т.е. значения факторов, соответствующих условию опыта. Большинство современных процессов характеризуется наличием значительного числа разнообразных факторов, влияющих на процесс. Представив процесс в виде «черного ящика», все многообразие действующих на его входе параметров (факторов) можно разбить на группы (рис. 1.1)

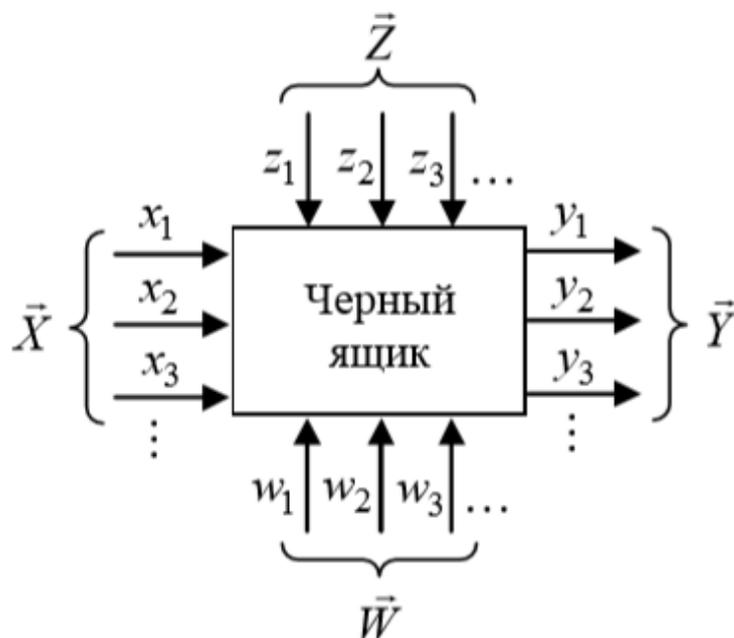


Рисунок 4.29 – Схема сложного процесса

Вектор отклика  $Y$  является функцией входных параметров. Первая группа составляет  $k$ -мерный вектор  $X$  управляемых параметров, т.е. таких, которые можно измерять и целенаправленно изменять.

Вторая группа образует вектор  $W$  контролируемых, но неуправляемых параметров, характеризующихся состоянием функций отклика на операциях, предшествующих исследуемому процессу (чистота исходного кремния, алюминия, используемых при изготовлении ИС).

Третья группа входных параметров составляет вектор  $Z$  неконтролируемых, а, следовательно, и неуправляемых входных параметров. Сюда относятся параметры, оказывающие случайные возмущающие воздействия на процесс.

Планирование эксперимента начинают с выбора центра плана, т.е. точки, соответствующей начальному значению всех используемых в эксперименте факторов в окрестностях которой в дальнейшем ставится серия

планируемых опытов. Очевидно, начальным значениям факторов будет соответствовать начальное значение функции отклика  $Y_0$ . Центр плана обычно выбирается на основе априорных сведений о процессе. Если же их нет, то обычно в качестве центра плана принимается центр исследуемой области.

Значение факторов в каждом опыте отличается от начального их значения на величину интервала  $\Delta X$ . Одним из важнейших предварительных условий успешного эксперимента с целью разработки математической модели, является выбор оптимальной величины  $\Delta X$ .

На основании информации изложенной в предыдущем разделе, были проведены следующие действия:

1. Выбраны основные параметры, путем анализа эпюр напряженно-деформированного состояния (НДС)
2. Представлен процесс в виде “черного ящика”
3. Составление полно факторного эксперимента:
  - Составление матрицы планируемого эксперимента
  - Определен центр плана
  - Определены оптимальные значения  $\Delta X$

Выбор факторов и параметров оптимизации является очень ответственным этапом при подготовке лабораторного и промышленного эксперимента. Эта задача бывает почти очевидной, если хорошо проработан вопрос о целях или назначении исследования. Трудности возникают при определении, какие факторы вызывают наблюдаемые эффекты и какими из них необходимо манипулировать, чтобы получить желаемые эффекты. К тому же исследователи сталкиваются со следующим противоречием, когда, с одной стороны, стремятся сделать модель как можно проще, чтобы облегчить ее понимание, упростить задачу формулирования и повысить эффективность моделирования, с другой – желательнее получить как можно более точную модель. Следовательно, реальные объекты и системы можно упрощать, но

лишь до тех пор, пока это не приводит к существенной потере точности. Необходимо найти правильный баланс. Тут приходится полагаться на здравый смысл, интуицию и предыдущий опыт тех, кто хорошо знаком с системой. Обычно на начальных этапах исследования у многих исследователей наблюдается тенденция к учету чрезмерно большого числа факторов и параметров оптимизации. Однако в этом случае, по утверждению многих авторов, степень понимания явления обратно пропорциональна числу переменных, фигурирующих в его описании. Но и без строгого обоснования исследователи не должны исключать из рассмотрения ни одной переменной. Решив, какие факторы и параметры оптимизации включить в исследуемую модель, необходимо далее определить функциональные связи между ними, а также значения используемых параметров.

На основании проведенного ранее инженерного анализа, были получены эпюры НДС. Также проведя литературный обзор, были выявлены способы компенсации пружинения, не только путем изменения конструкции, но и путем изменения технологического процесса. Благодаря чему были сделаны следующие выводы:

- При 2-ух угловой гибке, как в нашем случае, основным конструктивным элементом, который подвергается деформации, является радиус (радиус пуансона). Если взглянуть на модель, на которой нанесено НДС, можно увидеть что основной зоной пластической деформации является радиусная часть.
- От ширины матрицы, а, следовательно, и ширины нижней полки детали, также зависит как поведет себя изделие после разгрузки.
- На течение металла при штамповке также влияет радиус матрицы. Именно в этом месте, металл подвергается первым деформациям.

Управлять такими параметрами как величина высоты полки, а также длина детали нецелесообразно, поскольку эти размеры имеют очень большой разброс.

Также требуется учесть влияние смазки и зазора. Они были выбраны постоянными:

- Зазор составил  $(1-1,1)S$  от толщины металла, поскольку при данных начальных условиях он оптимален.
- Смазка определена значением коэффициента трения 0.15. Этому коэффициенту трения соответствует консервационная смазка.

К факторам влияния предъявляются следующие требования:

1. Управляемость. Это значит, что исследователь, выбрав нужное значение фактора, может его поддерживать в течение всего опыта, т.е. может управлять фактором.
2. Точность замера факторов должна быть более высокой.
3. Однозначность. Трудно управлять фактором, который является функцией других факторов.
4. При наличии нескольких факторов они должны быть совместными и независимыми. Совместность факторов означает, что все их комбинации осуществимы и безопасны. Независимость дает возможность установления фактора на любом уровне независимо от уровней других факторов.

Рассматривая созданный в предыдущем пункте “черный ящик”, можно определить следующее:

К входным параметрам можно отнести:

- Радиус пуансона
- Радиус матрицы
- Ширину матрицы

Контролируемые, но неуправляемые параметры:

- Высота стенок

- Смазка

К неконтролируемым и неуправляемым параметрам:

- Зазор

Ниже представлена получившаяся матрица планируемого эксперимента.

№ опыта	В-ширина матрицы		Rm-радиус матрицы		Rp-радиус пуансона		Hр-рабочий ход		Y	
	80	110	10	14	6	12	H	H/2	стенки	дно
1	1		1		1		1		1,60	1,8
2		1	1		1		1		4	0,3
3		1		1	1		1		4,5	0,3
4		1		1		1	1		2	3,7
5		1		1	1		1		3,8	2,6
6	1		1			1	1		1,7	2,4
7	1			1			1		1,4	2
8	1			1	1		1		2	1,5
9	1			1	1			1	0,3	2,70
10	1		1		1			1	1,7	1
11	1			1		1		1	1,4	2
12	1		1			1		1	1,5	2
13		1	1		1			1	2,5	3
14		1		1	1			1	3,4	3,4
15		1	1			1		1	3	2,7
16		1		1	1			1	2	2

Рисунок 4.30 – Матрица планируемого эксперимента.

Данные таблицы были занесены в Microsoft Excel, в котором есть возможность провести анализ для получения функции отклика для данного эксперимента.

Многофакторный анализ позволяет проверить влияние нескольких факторов на зависимую переменную. Для проведения многофакторного анализа необходимо сделать следующий ряд действий:

1. Занести результаты исследования в Microsoft Excel.
2. Перейти во вкладку *Данные - Анализ данных - Двухфакторный дисперсионный анализ*.
3. Выбрать входной интервал, рисунок 4.31.

№ опыта	В-ширина матрицы		Rm-радиус матрицы		Rp-радиус пуансона		Hr-рабочий ход		Y	
	80	110	10	14	6	12	47	23,5	стенки	дно
1	1		1		1		1		1,6	1,8
2		1	1		1		1		4	0,3
3		1		1	1		1		4,5	0,3
4		1		1		1	1		2	3,7
5		1		1	1		1		3,8	2,6
6	1		1			1	1		1,7	2,4
7	1			1		1	1		1,4	2
8	1			1	1		1		1,9	1,5
9	1			1	1			1	0,3	2,2
10	1		1		1			1	1,7	1
11	1			1		1		1	1,4	2
12	1		1			1		1	1,5	2
13		1	1		1			1	2,5	3
14		1		1	1			1	3,4	3,4
15		1	1			1		1	3	2,7
16		1		1	1			1	2	2
17										
18										
19										

Рисунок 4.31 – Входной интервал для анализа

4. В созданном листе мы увидим результаты анализа.

Двухфакторный дисперсионный анализ						
ИТОГИ	Счет	Сумма	Среднее	Дисперсия		
Строка 1	4	87	21,75	1048,25		
Строка 2	4	111	27,75	1964,25		
Строка 3	4	115	28,75	1920,92		
Строка 4	4	121	30,25	1838,92		
Строка 5	4	115	28,75	1920,92		
Строка 6	4	93	23,25	994,25		
Строка 7	4	97	24,25	962,917		
Строка 8	4	91	22,75	1020,92		
Строка 9	4	90,5	22,625	1028,23		
Строка 10	4	86,5	21,625	1055,23		
Строка 11	4	96,5	24,125	970,729		
Строка 12	4	92,5	23,125	1001,73		
Строка 13	4	110,5	27,625	1973,23		
Строка 14	4	114,5	28,625	1930,23		
Строка 15	4	116,5	29,125	1895,73		
Строка 16	4	114,5	28,625	1930,23		
Столбец 1	16	1312	82	153,6		
Столбец 2	16	196	12,25	4,2		
Столбец 3	16	132	8,25	9		
Столбец 4	16	564	35,25	45,3		
Дисперсионный анализ						
Источник вариации	SS	df	MS	F	P-Значение	F критическое
Строки	573,75	15	38,25	0,89219	0,577209371	1,894874695
Столбцы	68440,8	3	22813,6	532,13	3,84525E-35	2,811543506
Погрешность	1929,25	45	42,8722			
Итого	70943,8	63				

Рисунок 4.32 – Двухфакторный дисперсионный анализ.

Для расчета функции отклика необходимо сложить получившиеся значения дисперсий для каждого из столбцов (формула 1):

$$Y = 153,6 X_1 + 4,2X_2 + 9X_3 + 45,3X_4 \quad (1)$$

Выводы:

1. Исходя из уравнения функции отклика можно сделать выводы, что наибольшее влияние оказывает параметр ширины матрицы, но в этот параметр относится к конструктивным, и во время проведения анализа изменению подлежать не может.
2. Значительное влияние на пружинение по результатам исследования оказывает величина рабочего хода, этот параметр относится к технологическим и во время производства может меняться.
3. Уменьшение глубины рабочего хода уменьшает значения углового пружинения на стенках П-образного профиля после разгрузки.
4. Необходимо использовать схему с применением выталкивателя нижней полки, для компенсации углового пружинения после разгрузки на “дне” изделия.

#### **4.3.2 Построение матрицы планируемого эксперимента для “улучшенной схемы”**

Для того чтобы определить оптимальное значения величины рабочего хода инструмента, необходимо составить однофакторную матрицу планируемого эксперимента, в которой будет рассматриваться влияние

изменения величины рабочего хода пуансона на проявление углового пружинения стенок П-образного профиля.

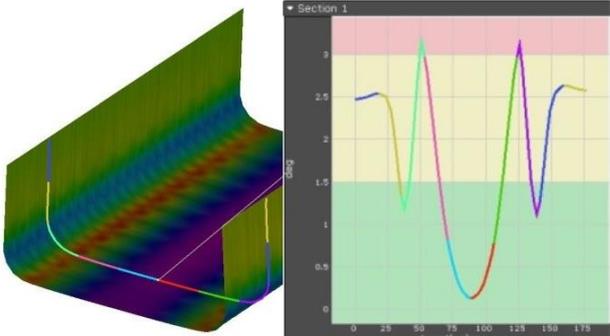
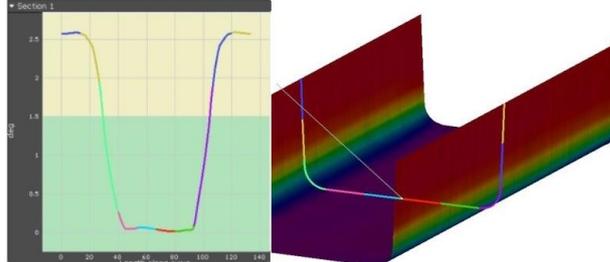
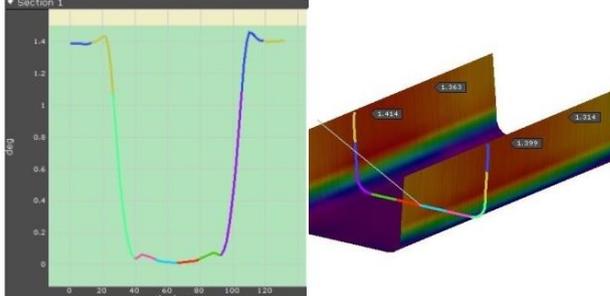
Матрица планируемого эксперимента показана на рисунке 4.31. В этом эксперименте были заданы следующие условия:

1. Была выбрана одна конкретная модель
2. Изменение величины рабочего хода взято в процентах от высоты стенок П-образного профиля
3. В симуляции применяется схема с плитой выталкивателя, для уменьшения влияния величины остаточных напряжений нижней полке на поведение стенок П-образного профиля после разгрузки.
4. Материал и прочие параметры процесса остались теми же, что и в эксперименте подраздела 4.1.

Величина рабочего хода относительно высоты полки, %	Значения пружинения стенок, градусы
40	2,50
50	1,60
60	1,80
70	1,80
80	2,00
90	2,00
100	2,20

Рисунок 4.31 – Матрица для однофакторного эксперимента

Таблица 3 – Сравнение углового пружинения свободной гибки с предложенными улучшенными схемами.

Название схемы	Результаты	Показатель пружинения
Свободная гибка		2,5°
Гибка с выталкивателем		2,5°
“Оптимизированная” гибка		1,6°

Выводы:

1. Самым оптимальным значением величины рабочего хода пуансона можно считать равную 40-50 % от высоты полки П-образного профиля.
2. Схема “оптимизированной” гибки исключила проявление углового пружинения на нижней полке после разгрузки, также уменьшила значения пружинения на стенка П-образного профиля после разгрузки.

## Выводы

1. На основании проведенного поанируемого эксперимента были определены основные факторы, которые имеют воздействие на величину угла пружинения стенок п-образного профиля. К ним относятся:
  - Изгибающий момент на нижней полке во время деформации
  - Глубина рабочего хода инструмента
  - Размеры модели радиус матрицы и ее ширина
2. Найдены оптимальные значения факторов п-образной гибки, гарантирующие величину минимального углового пружинения стенок п-образного профиля
3. В процессе численных экспериментов установлено, что изменение напряженно-деформированного состояния с применением плиты выталкивателя, относительно напряженно деформированного состояния свободной п-образной гибки позволяет обеспечить однородность напряжений и деформаций в нижней полке и тем самым снизить величин угла пружинения вертикальных стенок
4. На основании минимизации величины угла пружинения установлена величина оптимального захода пуансона при п-образной гибке, которая составляет 40...50% высоты вертикальных стенок.
5. Разработана методика численного моделирования и проектирования процессов п-образной гибки лонжеронов легковых автомобилей из труднодеформируемых материалов

## Заключение

1. Анализ литературных источников позволил установить, конструкции, физико-механические свойства и технологии производства лонжеронов легковых автомобилей, которые определяют их внешний вид, качество, экономичность и безопасность пассажиров.
2. Выявлено, что точность изготовления лонжеронов с помощью листовой штамповки определяется процессом пружинения, возникающим после разгрузки.
3. В процессе численных экспериментов установлено, что изменение напряженно-деформированного состояния с применением плиты выталкивателя, относительно напряженно деформированного состояния свободной п-образной гибки позволяет обеспечить однородность напряжений и деформаций в нижней полке и тем самым снизить величину угла пружинения вертикальных стенок после снятия внешних нагрузок.
4. На основании минимизации величины угла пружинения установлена величина оптимального захода пуансона при п-образной гибке, которая составляет 40...50% высоты вертикальных стенок.
5. Разработана методика проектирования процессов п-образной гибки лонжеронов из труднодеформируемых материалов в САПР на основе двухфакторного планируемого эксперимента.
6. Разработана методика, позволяющая анализировать напряженно-деформированное состояние по семи слоям и строить эпюры напряжений.

### Список используемых источников

1. Дж. Лайкер. Дао Toyota: 14 принципов менеджмента ведущей компании мира / Джеффри Лайкер; Пер. с англ. – М.: Издат. группа «Точка», 2019 – 400 с.
2. В. Г. Бурдуковский. Технология листовой штамповки : учебное пособие / В. Г. Бурдуковский. — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2019. — 224 с.
3. Burchitz I.A. Improvement of Springback Prediction in Sheet Metal Forming [Text] / I.A. Burchitz. – Rotterdam Institute for Metal Research, 2008 - 156p.
4. П.С. Гончаров. NX Advanced Simulation. Инженерный анализ / Гончаров П.С., Артамонов И.А., Халитов Т.Ф., Денисихин С.В., Сотников Д.Е.; ДМК Пресс, 2012. - 504с.
5. Keeler S. Advanced High-Strength Steels Application Guidelines Version 6.0 [Text] / Keeler S. M.Kimchi, J. Mconey P.– WorldAutoSteel 2017. – 300 p.
6. Balon P., Springback Compensation in Cold Forming Process for High Strength Steel [Text] / P. Balon. A. Swlatoniowski // Archives of Metallurgy and materials. - 2016. – PP 2471-2478.  
<https://content.sciendo.com/view/journals/amm/60/4/article-p2471.xml>
7. Ю.А. Аверкиев. Технология холодной штамповки / Аверкиев Ю.А., Аверкиев А.Ю. – М.: Машиностроение, 1989. – 304 с.
8. А.Н. Малов, Технология холодной штамповки. / Малов А.Н. – М.: Машиностроение, 1969, 568 с.
9. Биргер И. А., Мавлютов Р. Р. Сопротивление материалов: Учебное пособие.— М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986.— 560 с.
10. Охрименко Я.М. Технология кузнечно-штамповочного производства. – М.: Машиностроение, 1976. – 560 с.

Код поля изменен

11. Darmawan A.S., Anggono A.D., Hamid A., Die design Optimization on Sheet Metal Forming with Considering the Phenomenon of Springback to Improve Product Quality [Text] / A.S. Darmawan. - MATEC Web Conf. 2018. – 4p.

[https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/abs/2018/13/mateconf\\_icet4sd2018\\_01105/mateconf\\_icet4sd2018\\_01105.html](https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/abs/2018/13/mateconf_icet4sd2018_01105/mateconf_icet4sd2018_01105.html)

12. Kaiwei Jiang, Yong Hou, Jianping Lin, Junying Min. A springback energy based method of springback prediction for complex automotive parts [Text] / Kaiwei Jiang. - IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 8p.

<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/418/1/012104/pdf>

13. Дорфман В. С. Современные материалы в автомобилестроении: Справочник. / В. С. Дорфман, Н. И. Летчфорд, Э. Н. Либерман и др. - Москва, Машиностроение, 1977 – 271с.

14. Скороходов Е. А. Общетеchnический справочник / Е. А. Скороходов, В. П. Законников, А. Б. Пакнис и др.; - Москва, Машиностроение, 1990 – 496с. – ISBN 5-217-00423-1

15. Великанов К. М. Экономика и организация производства в дипломных проектах: учеб.пособие / К. М. Великанов, В. Ф. Власов, К. С. Карандашова – Ленинград, Машиностроение, 1973 – 256с.

16. ПочекуевЕ.Н. Проектирование штампов для последовательной листовой штамповки в системе NX / Е. Н. Почекуев, П. А. Путеев, П. Н. Шенбергер. - Москва : ДМК Пресс, 2012. - 331 с. : ил. - Библиогр.: с. 328 . - Предм. указ.: с. 329-331. - Прил.: с. 305-327. - ISBN 978-5-94074-858-8 : 665-00.

17. СкрипачевА.В. Технологичность листовых штампованных деталей. Методические указания по технологии листовой штамповки / А.В. Скрипачев, И.Н. Матвеевко. – Тольятти: ТолПИ, 1992.

18. Смолин Е.Л. Основы конструирования штамповой оснастки: учебное пособие. Тольятти: ТГУ, 2007. – 72 с.

Отформатировано: русский

Код поля изменен

Отформатировано: русский

19. Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке / В.П. Романовский. – Л.: Машиностроение, 1979. – 568 с.
20. Амиров Ю. Д. Технологичность конструкции изделия: Справочник / Ю. Д. Амиров, Т. К. Алферова, П. Н. Волков и др.; - Москва, Машиностроение, 1990 - 768с. ISBN 5-217-01121-1
21. Косилова А. Г. Справочник технолога-машиностроителя. В двух томах. Том 1. / А. Г. Косилова, Р. К. Мещеряков. – Москва: Машиностроение, 1972 – 694 с.
22. Горина, Л.Н. Раздел выпускной квалификационной работы «Безопасность и экологичность технического объекта»: уч. 72 методическое пособие / Л.Н. Горина, М.И. Фесина. – Тольятти изд-во ТГУ, 2016
23. Панов А. А. Обработка металлов резанием: Справочник технолога / А. А. Панов, В. В. Аникин, Н. Г. Бойм и др. ; Под общ. Ред. А. А. Панова. – Москва: Машиностроение, 1988 – 736с. ISBN 5-217-00032-5
24. Малов А. Н. Общетехнический справочник / А. Н. Малов – Москва, Машиностроение, 1971 - 464с.
25. Барташев Л. В. Справочник конструктора и технолога по техникоэкономическим расчетам / Л. В. Барташев – Москва, Машиностроение, 1979-221с.
26. Данилов Ю.В., Артамонов В.А. Практическое использование NX. М.: ДМК Пресс, 2011. – 332 с.
27. Ершов В.И., Совершенствование формоизменяющих операций листовой штамповки / В.И. Ершов, В.Ш. Глазков, М.Ф. Каширин.: М.: Машиностроение; .1990 - 312'с.
28. Ершов В.И, Листовая штамповка. Расчет технологических параметров / В.И. Ершов, А.С. Чумадин. Справочник — М.: Издательство МАИ, 1999. 516 с.
29. Попов Е.А., Технология и автоматизация листовой штамповки / Е.А. Попов, В.Г. Ковалев, И.Н. Шубин. Учебник для вузов. М.: Издательство ИГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. - 480 с.

30. Попов Е.А. Основы теории листовой штамповки. М., "Машиностроение", 1977.-278 с.